



Research Article

Received: November 26, 2023

Accepted: January 5, 2024

Published: January 30, 2024

ISSN 2658-5553

High performance polymer Zedex-100K based on polyethylene terephthalate: physical, mechanical and operational properties

Gutnikov, Vladimir Anatolevich¹ Kavkazsky, Vladimir Ivanovich² Usanova, Kseniia Iurevna^{3*} 

¹CIRD of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; lomonosov25@rambler.ru (G.V.A.)

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation; kavkazskiy_vn@mail.ru (K.V.N.);

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; plml@mail.ru (U.K.I.);

Correspondence:* email plml@mail.ru

Keywords:

Composite material; Plastic; Polymer; Polyethylene terephthalate; Strength; Elastic modulus; Water absorption

Abstract:

The object of research is a composite material, called ZEDEX-100K, based on polyethylene terephthalate with a complex of fillers made from mineral additives based on rare earth metals, when interacting with them in a special reactor, the structure of the polymer matrix and the physical and mechanical properties of the material change. The purpose of the work is to study the physical and mechanical characteristics of a composite material based on polyethylene terephthalate, used for the manufacture of wear-resistant sliding bearings, as well as to determine the performance characteristics of stern tube bushings made from this material. **Method.** The main physical and mechanical characteristics of the material under study were determined experimentally. Stern tube bushings made of ZEDEX-100K material passed a full-scale wear test. **Results.** The physical and mechanical characteristics of the ZEDEX-100K composite material were experimentally established: average density - 1327 kg/m³, water absorption by mass - 0.07%, Shore D hardness - 80 units, tensile strength and modulus of elasticity - 62 MPa and 2894 MPa, respectively, the tensile strength and modulus of elasticity in bending are 83 MPa and 2577 MPa, respectively, the compressive strength is 52 MPa, the compressive strength after exposure to diesel fuel for 30 days is 43 MPa and the compressive strength after exposure in sea water for 5 months - 31 MPa. The flexural strength is 34% and 60% higher than the tensile strength and compressive strength, respectively. The compressive strength decreased by 17% and 40% after exposure to diesel fuel for 30 days and exposure to seawater for 5 months, respectively. The maximum permissible wear of the 4.5 mm bow tube bushing and stern tube bushing installed on the Vagis tugboat will occur at 39000 hours of total operating time in the stern and 32500 hours in the bow of the vessel.

1 Introduction

Высокотехнологичные полимеры (высокоэффективные полимеры) — это термопластичные полимеры с высокими механическими, термическими и химическими свойствами, предназначенные для эксплуатации в экстремальные условия окружающей среды [1]. Самые известные из них – полиэфирэфиркетон (ПЕЕК), полиэфиримид (ПЕИ), полиэфиркетонкетон



(PEKK) и полисульфон (PSU), фторопласт, полиамидимид (PAI) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE).

Основными потребителями материалов на основе высокотехнологичных полимеров являются электротехническая промышленность, автомобильная промышленность, судостроение, медицина и авиационная промышленность, в которых процесс эксплуатации многих технических агрегатов и машин сопровождается износом [2], [3], [4]. Взаимное механическое воздействие деталей друг на друга с разной степенью интенсивности приводит к истиранию рабочих поверхностей и разрушению внутренней структуры. Как результат, наблюдается потеря работоспособности техники или снижение эксплуатационных свойств.

Высокотехнологичные полимеры показывают пониженную восприимчивость к коррозии [5], способность выдерживать механическое воздействие без ущерба для своей функциональности [6], что делает возможным замену деталей в узлах и механизмах трения-скольжения из стандартных материалов, таких как металл, асбест или стандартный пластик на изделия из материалов на основе высокотехнологических полимеров [7], [8].

Анализ научной литературы демонстрирует использование высокотехнологичных полимеров в инженерной практике для производства поршней и уплотнительных колец [9], [10]. В работе [11] представлено исследование по определению пригодности композитов в качестве материала для поршневых колец и поршневого штока в условиях высокого давления.

Для улучшения физико-механических характеристик к термопластичному полимеру добавляют различные модификаторы или наполнители с армирующей функцией.

Исследование [8] показало, что армирование сверхвысокомолекулярного полиэтилена добавками наноразмерного детонационного углерода и одностенными углеродными нанотрубками в количестве 0.5% по массе приводит к повышению твердости материала на 6.4% и 19.6%, повышению износостойкости в 1.13 и 1.63 раза и снижению коэффициента трения на 10% и 20%, соответственно.

Авторы [12] исследовали водопоглощение материалов на основе полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида, армированных углеродным волокном. Водопоглощение составило 0.059% и 0.138% для композитов с полиэфирэфиркетонам и полифениленсульфидом, соответственно. При повышенных температурах (80°C) и повышенной влажности (75%) оба материала сохранили свои механические свойства.

В исследовании [13] авторы выбрали для матрицы из полиамида-6 оптимальный процент добавки из стекловолокна, который составил 30% по массе. Авторы рекомендуют использовать такой материал в автомобильных и аэрокосмических отраслях для замены наиболее важных деталей.

В работе [14] установлено, что добавление к полиамиду-6 стекловолокна в количестве 25% по объему значительно уменьшает коэффициент трения.

Авторы [15] исследовали влияние наполнителя из рубленого углеродного волокна, покрытого дисульфидом молибдена, синтезированного гидротермальным методом и смешанного с нанокремнеземом на полиэфирэфиркетон. По сравнению с чистым полимером модуль упругости и прочность на разрыв композитов увеличились на 62.04% и 26.49% соответственно. Коэффициент трения и скорость изнашивания композитов снизились на 31.43% и 79.18% соответственно.

Не только синтетические наполнители улучшают механические свойства композитов с матрицей, но и натуральные волокна демонстрируют улучшение свойств композитов. В работе [16] исследуется влияние натуральных волокон на полиоксиметилен. При добавлении 30% волокон по массе модуль упругости при растяжении и модуль упругости при изгибе увеличились на 89% и 79% соответственно.

Обзор литературы показал, что для производства конструкционных пластиков редко используется полиэтилентерефталат. Несмотря на то, что этот полимер является четвертым по объему производства полимером в мире [17], его в основном применяют для изготовления ёмкостей различного назначения.

Таким образом, целью работы является исследование физико-механических характеристик композиционного материала на основе полиэтилентерефталата, применяемого для изготовления износостойких подшипников скольжения, а также определение эксплуатационных характеристик дейдвудных втулок, изготовленных из этого материала.

2 Materials and Methods

2.1 Объект исследования

Объектом исследования является композиционный материал на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов, при взаимодействии с которыми в специальном реакторе происходит изменение структуры полимерной матрицы и физико-механических свойств материала (ZEDEX-100K).

Из материала ZEDEX-100K были изготовлены образцы для определения физико-механических характеристик материала: 10 образцов с размерами 10x10x10 (мм) для определения средней плотности, 5 образцов с размерами 50x50x4 (мм) для определения водопоглощения по массе, 5 образцов с размерами 50x10x4 (мм) для определения твердости, 10 образцов (см. рисунок 1) для определения прочности и модуля упругости при растяжении, 10 образцов с размерами 80x10x4 (мм) для определения прочности и модуля упругости при изгибе, 5 образцов с размерами 15x10x10 (мм) для определения прочности при сжатии и 10 образцов с размерами 10x10x4 (мм) для определения прочности при сжатии после выдержки в дизельном топливе и после выдержки в морской воде.

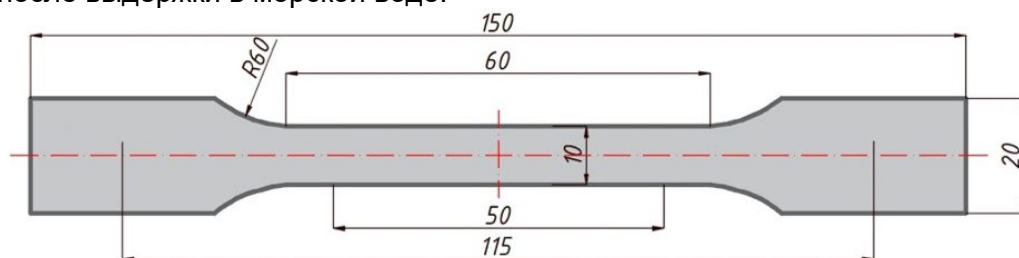
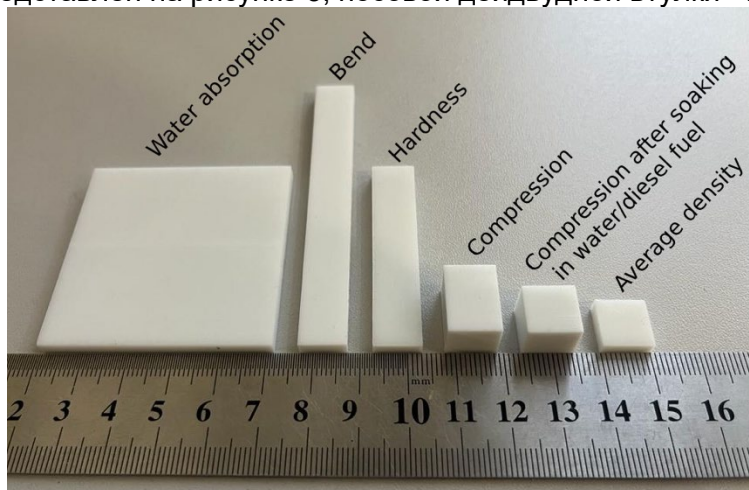


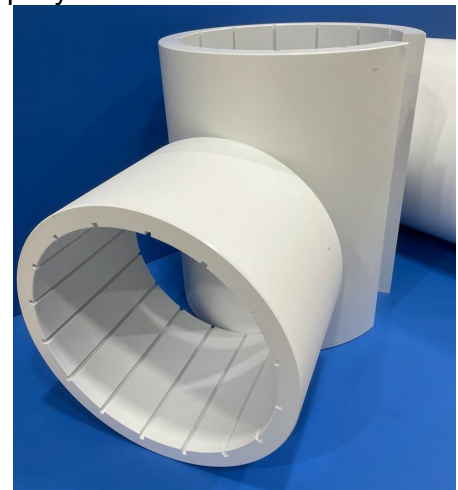
Fig.1 - Shape and dimensions of tensile test specimen

Рис.1 - Форма и размеры образца для испытания на растяжение

Кроме этого, натурное испытание на износ прошли дейдвудные втулки из материала ZEDEX-100K. Образцы для испытаний представлены на рисунке 2. Чертеж кормовой дейдвудной втулки представлен на рисунке 3, носовой дейдвудной втулки - на рисунке 4.



a



б

Fig.2 - Experimental specimens: to determine physical and mechanical characteristics (a), tube bushings (b)

Рис.2 - Образцы: для определения физико-механических характеристик (a), дейдвудные втулки (б)

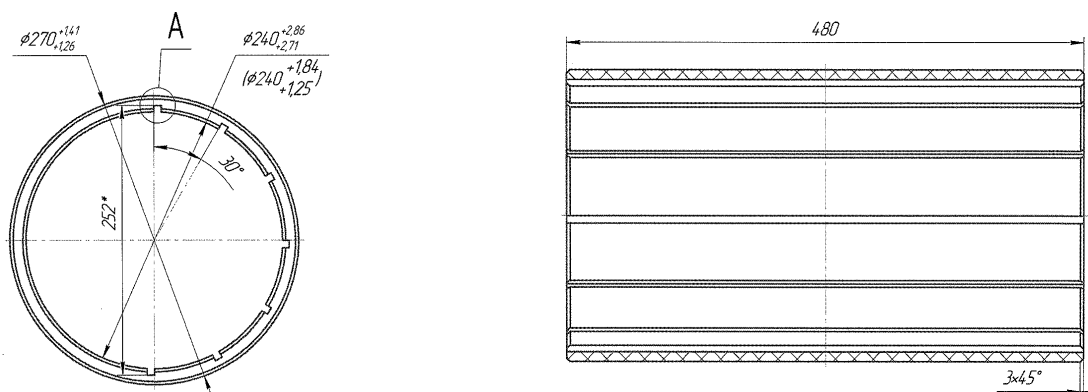


Fig.3 - Drawing of stern tube bushing
Рис.3 - Чертеж кормовой дейдвудной втулки

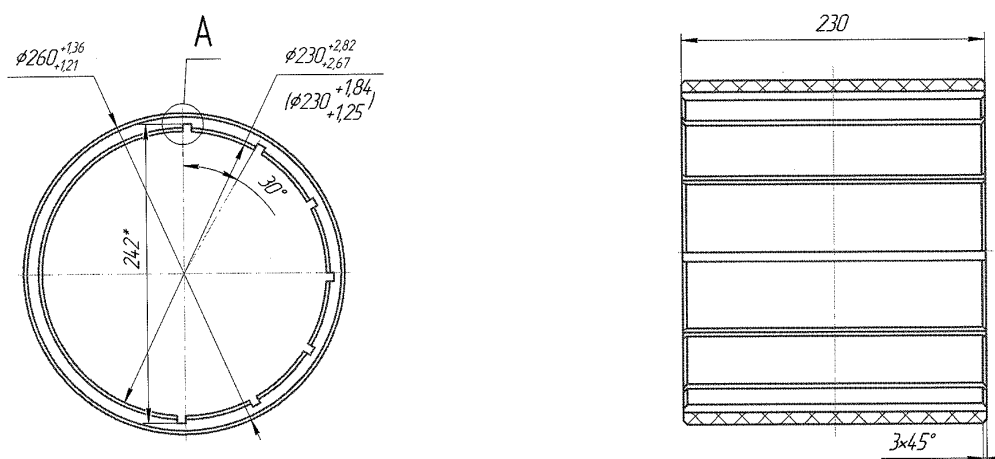


Fig.4 - Drawing of bow tube bushing
Рис.4 - Схема носовой дейдвудной втулки

2.2 Определение физико-механических характеристик материала

Экспериментальные исследования образца проводились при температуре $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(50 \pm 5)\%$.

Средняя плотность материала определялась методом обмера и взвешивания.

Для определения водопоглощения образцы, высушенные при температуре $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ помещали на 24 часа в контейнер, заполненный дистиллированной водой, при температуре $(23.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$. После образцы извлекались и взвешивались. Масса воды, поглощенная каждым образцом, определялась по разности между массой образца до и после испытания и выражалась в процентах по отношению к начальной массе.

Твердость образцов определялась при помощи дюрометра Шора типа D с индентором в виде стержня из закаленной стали диаметром (1.25 ± 0.15) мм. Образец для испытания помещался на твердой горизонтальной ровной поверхности, опорная поверхность дюрометра прижималась к образцу. Через 1 с после прижатия опорной поверхности к образцу проводилось мгновенное измерение - записывалось максимальное значение, которое показал индикатор дюрометра. Для каждого образца выполняли 5 измерений твердости в разных местах поверхности образца, на расстоянии не менее 6 мм от точки предыдущего измерения, и определяли среднее значение.

Прочностные характеристики определяли с использованием универсальной испытательной машины H100KS (Tinius Olsen, США).

Для определения прочности при растяжении образец растягивали вдоль его главной продольной оси со скоростью 5 мм/мин до разрушения. Для определения прочности при сжатии образец подвергали сжатию вдоль его главной оси со скоростью 5 мм/мин для стандартных образцов и 2 мм/мин для образцов, выдержанных в морской воде в течение 5 месяцев или дизельном топливе в течение 30 суток. Испытание проводили до тех пор, пока уменьшение длины не достигнет 3.5% от начальной длины образца.

Предел прочности при растяжении определялся как отношение максимальной нагрузки, предшествующей разрушению образца к площади его поперечного сечения, предел прочности при сжатии - как отношение нагрузки при 3.5% деформации к площади его поперечного сечения.

Для определения предела прочности при изгибе образец, свободно лежащий на опорах, подвергался изгибу со скоростью 2 мм/мин в середине между опорами до тех пор, пока деформация изгиба не достигнет 3.5% (1,5h). Предел прочности при изгибе вычисляли по формуле (1):

$$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (1)$$

где P это нагрузка при 3.5% деформации изгиба, l это расстояние между опорами, b это ширина образца, h это толщина образца.

Для определения модуля упругости при растяжении использовалась автоматическая система записи, которая предоставила полную кривую «напряжение/относительная деформация». Определялись значения напряжения при растяжении при значении относительного удлинения $\varepsilon_2 = 0.003$ и $\varepsilon_1 = 0.001$. Модуль упругости при растяжении определялся по формуле (2):

$$E_p = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (2)$$

где: σ_2 это напряжение, измеренное при значении ε_2 ; σ_1 это напряжение, измеренное при значении ε_1 .

Для определения модуля упругости при изгибе образцы подвергались изгибу в середине между опорами до тех пор, пока деформация изгиба не достигнет 3.5%. Определялись значения напряжения при растяжении при значении относительной деформации крайних волокон 0.3% и 0.1%. Модуль упругости при изгибе определялся по формуле (3):

$$E_{изз} = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_v^3}{4bh^3(f_2 - f_1)}, \quad (3)$$

где: F_2 и F_1 это нагрузка при величине относительной деформации крайних волокон 0.3% и 0.1%, соответственно, l_v это расстояние между опорами, b это ширина образца, h это толщина образца, f_2 и f_1 это прогиб образца, соответствующий относительной деформации крайних волокон 0.3% и 0.1%, соответственно.

2.3 Натурные испытания изделий

Натурным испытаниям на износ подверглись дейдвудные втулки из материала ZEDEX-100K, которые были установлены на буксире «Вагис» ИМО 9376476, эксплуатируемого под управлением Находкинского филиала АО «Роснефтефлот» (см. рисунок 5).



Fig.5. Tug "Vagis" (illustration taken from <https://www.marinetraffic.com/>)

Рис.5. Буксир «Вагис» (иллюстрация заимствована с <https://www.marinetraffic.com/>)

При аварийном ремонте судна в мае 2021 года взамен поврежденной дейдвудной втулки ЛБ типа TORDON были установлены втулки из материала ZEDEX-100K производства ООО «ТД Пластмасс Групп» (Москва, Россия).

После установки носовой и кормовой втулок ЛБ на штатные места были измерены зазоры. Повторное измерение зазоров было проведено при проведении планового докового ремонта судна на класс РС в ноябре 2022 года. После чего определялся максимальный износ подшипников из материала ZEDEX-100K. Экстраполяцией полученных результатов определялось время общей наработки, при котором наступит предельно допустимый износ - 4.5 мм.

3 Results and Discussion

3.1 Средняя плотность

Результаты испытаний на определение средней плотности представлены в таблице 1.

Table 1. Average density
Таблица 1. Средняя плотность

№ п/п	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Масса, г	Плотность, кг/м ³
1	10.83	10.08	10.06	1.4513	1322
2	10.51	10.07	10.05	1.4177	1333
3	10.58	10.06	10.05	1.4285	1335
4	10.82	10.05	10.03	1.4515	1331
5	10.80	10.05	10.02	1.4404	1324
6	10.79	10.05	10.05	1.4489	1329
7	10.83	10.05	10.04	1.4438	1321
8	10.65	10.05	10.00	1.4205	1327
9	10.80	10.05	10.08	1.4490	1324
10	10.75	10.06	10.05	1.4376	1323
Среднее значение					1327

По результатам испытаний значение средней плотности композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов (ZEDEX-100K) составило 1327 кг/м³. На рисунке 6 представлено сравнение материала ZEDEX-100K со средней плотностью материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон (PEEK) [3], полиамид-6, армированный стекловолокном (PA6/GF) [13], полиоксиметилен (POM) [7], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [8].

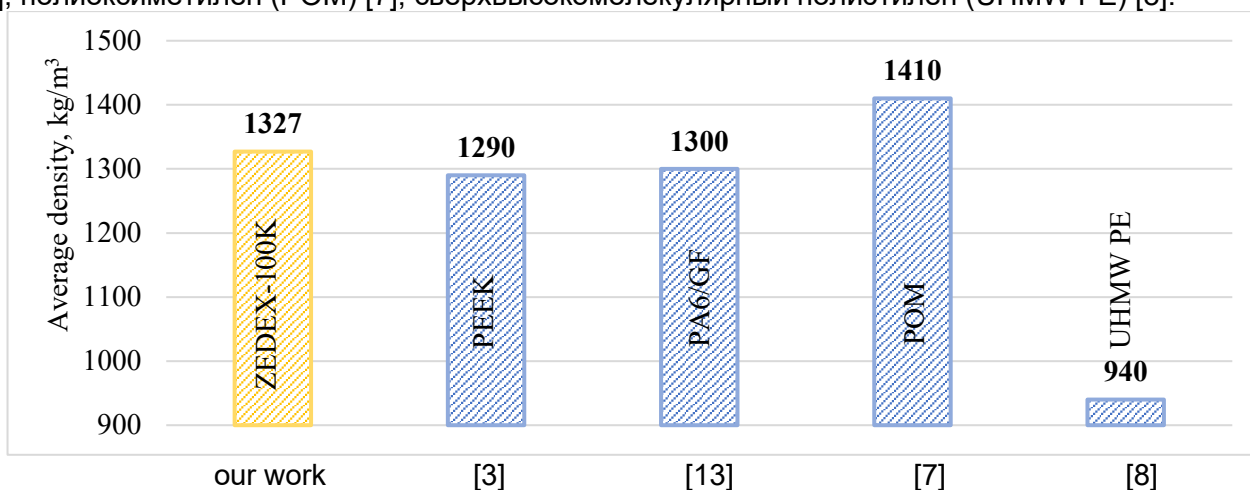


Fig.6 - Density comparison of engineering plastics

Рис.6 - Сравнение плотности инженерных пластиков

Из рисунка 6 видно, что значения средней плотности материала ZEDEX-100K и большинства инженерных пластиков схожи. Значительное отличие в значении средней плотности (выше на 41%) имеет материал ZEDEX-100K в сравнении со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом.

3.2 Водопоглощение по массе

2. Результаты испытаний на определение водопоглощения по массе представлены в таблице 2.

Table 2. Water absorption by mass
Таблица 2. Водопоглощение по массе

№ образца	Масса до выдержки в морской воде, г	Масса после выдержки в морской воде, г	Водопоглощение, %
1	13.58812	13.59671	0.06
2	13.77308	13.78817	0.11
3	13.76384	13.77222	0.06
4	13.77805	13.78675	0.06
5	13.78009	13.78806	0.06
Среднее значение			0.07

По результатам испытаний значение водопоглощения композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов (ZEDEX-100K) составило 0.07 %. На рисунке 7 представлено сравнение водопоглощения материала ZEDEX-100K с водопоглощением материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон, армированный углеволокном (PEEK/CF) [12], полиамид-6, армированный углеволокном (PA6/CF) [2], полиоксиметилен (POM) [7], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [18].

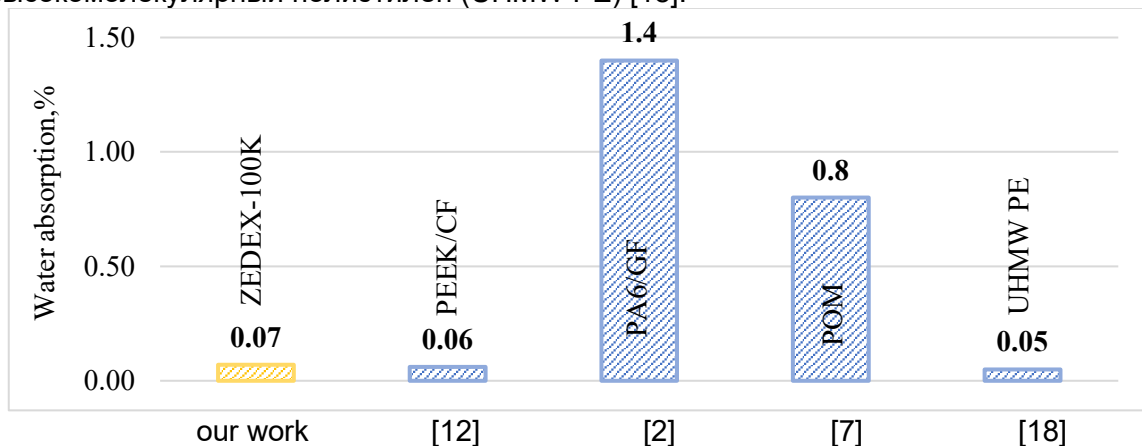


Fig.7 - Comparison of water absorption of engineering plastics
Рис.7 - Сравнение водопоглощения инженерных пластиков

Из рисунка 7 видно, что водопоглощение материала ZEDEX-100K ниже на 95% и 91%, чем у материала на основе полиамида-6 и полиоксиметилена, соответственно, и схоже с материалом на основе полиэфирэфиркетона и сверхвысокомолекулярным полиэтиленом.

3.3 Твердость по Шору

Результаты испытаний на определение твердости по Шору представлены в таблице 3.

Table 3. Shore hardness
Таблица 3. Твердость по Шору

№ образца	Ед. по Шору D
1	80
2	78
3	81
4	80
5	81
Среднее	80

По результатам испытаний значение твердости по Шору шкалы D композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов (ZEDEX-100K) составило 80 ед. На рисунке 8 представлено сравнение твердости по Шору шкалы D материала ZEDEX-100K с твердостью

материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон (PEEK) [15], полиамид-6, армированный стекловолокном (PA6/GF) [14], полиоксиметилен (POM) [19], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [20].

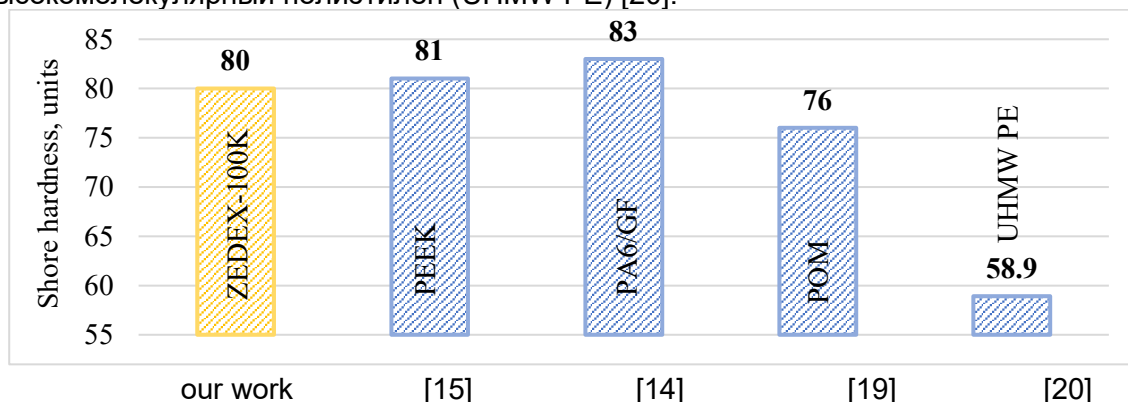


Fig.8 - Comparison of hardness of engineering plastics
Рис.8 - Сравнение твердости инженерных пластиков

Из рисунка 8 видно, что твердость материала ZEDEX-100K ниже на 1.2% и 3.6%, чем у полиэфирэфиркетона и материала на основе полиамида-6, соответственно, и выше на 5.2% и 35.8%, чем у полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно.

3.4 Предел прочности и модуль упругости при растяжении

Результаты испытаний на определение прочности и модуля упругости при растяжении представлены в таблице 4.

Table 4. Strength and tensile modulus of elasticity
Таблица 4. Прочность и модуль упругости при растяжении

Предел прочности при растяжении				Модуль упругости при растяжении		
№ образца	Толщина x ширина, мм	Макс. нагрузка, Н	Прочность, МПа	№ образца	Толщина x ширина, мм	Модуль упругости, МПа
1	4.10 x 9.91	2493	61	1	4.16 x 9.92	2575
2	4.09 x 9.85	2480	61	2	4.22 x 9.98	2731
3	4.09 x 9.88	2490	61	3	4.13 x 9.84	3000
4	4.08 x 9.85	2503	62	4	4.12 x 9.87	3812
5	4.11 x 9.83	2520	62	5	4.14 x 9.88	2353
Среднее значение			62	Среднее значение		2894

По результатам испытаний значение прочности и модуля упругости при растяжении композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов (ZEDEX-100K) составило 62 МПа и 2894 МПа, соответственно. На рисунке 9 представлено сравнение прочности и модуля упругости при растяжении материала ZEDEX-100K с прочностью и модулем упругости при растяжении материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон (PEEK) [21], полиамид-6, армированный стекловолокном (PA6/GF) [13], полиоксиметилен (POM) [16], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [22].

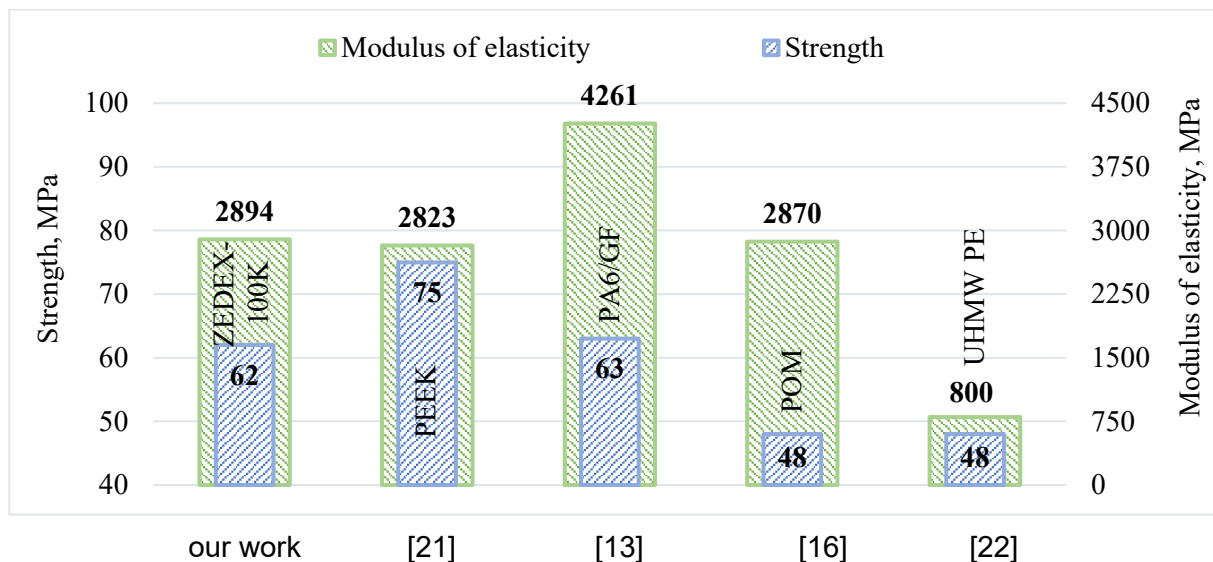


Fig.9 - Comparison of strength and tensile modulus of engineering plastics

Рис.9 - Сравнение прочности и модуля упругости при растяжении инженерных пластиков

Из рисунка 9 видно, что прочность при растяжении материала ZEDEX-100K оказалась схожа с прочностью при растяжении материала на основе полиамида-6, выше на 30%, чем прочность полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, но на 17% ниже прочности полиэфирэфиркетона. Модуль упругости при растяжении материала ZEDEX-100K оказался схож с модулем упругости полиэфирэфиркетона и полиоксиметилена, а также в 3.6 раз выше, чем у сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Значение модуля упругости материала ZEDEX-100K уступает только материалу на основе полиамида-6 на 32%.

3.5 Предел прочности и модуль упругости при изгибе

Результаты испытаний на определение прочности при изгибе представлены в таблице 5.

Table 5. Strength and modulus of elasticity in bending
Таблица 5. Прочность и модуль упругости при изгибе

Предел прочности при изгибе				Модуль упругости при изгибе		
№ образца	Толщина x ширина, мм	Макс. нагрузка, Н	Прочность, МПа	№ образца	Толщина x ширина, мм	Модуль упругости, МПа
1	4.19 x 10.58	2493	84	1	4.18 x 10.58	2600
2	4.21 x 10.56	2480	84	2	4.19 x 10.57	2550
3	4.18 x 10.58	2490	82	3	4.25 x 10.56	2585
4	4.20 x 10.55	2503	83	4	4.19 x 10.60	2583
5	4.19 x 10.58	2520	83	5	4.17 x 10.58	2567
Среднее значение			83	Среднее значение		2577

По результатам испытаний значение прочности и модуля упругости при изгибе композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов (ZEDEX-100K) составило 62 МПа и 2577 МПа, соответственно. На рисунке 10 представлено сравнение прочности и модуля упругости при изгибе материала ZEDEX-100K с прочностью и модулем упругости при растяжении материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон (PEEK) [23], полиамид-6, армированный стекловолокном (PA6/GF) [13], полиоксиметилен (POM) [16], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [4].

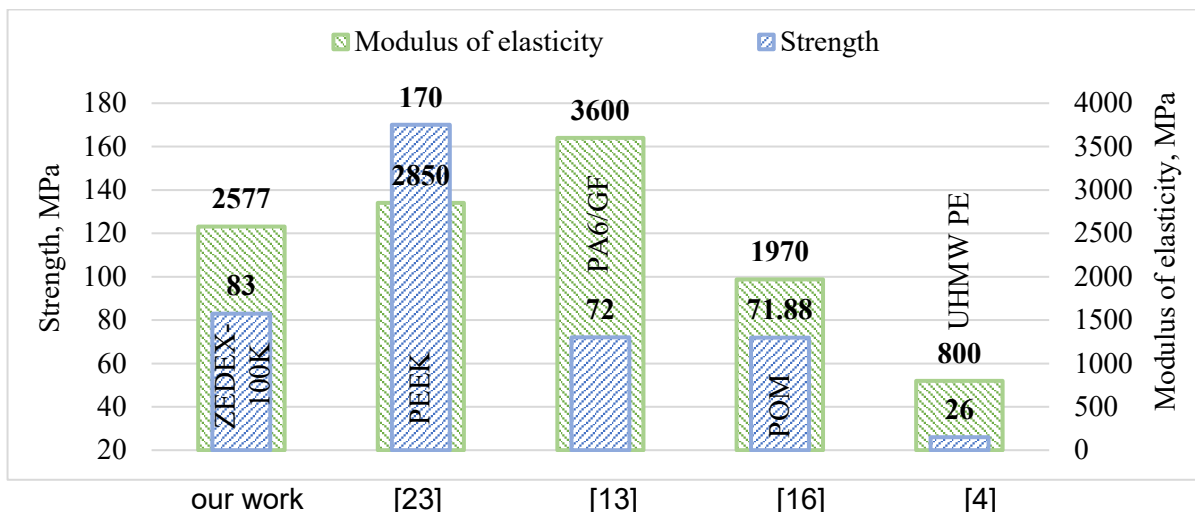


Fig. 10 - Comparison of strength and flexural modulus of engineering plastics
Рис.10 - Сравнение прочности и модуля упругости при изгибе инженерных пластиков

Из рисунка 10 видно, что прочность при изгибе материала ZEDEX-100K оказалась выше на 15.3%, 15.5% и 219% чем прочность материала на основе полиамида-6, полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно, но в 2 раза ниже прочности полиэфирэфиркетона. Модуль упругости при изгибе материала ZEDEX-100K выше на 30.8% и 222% чем модуль упругости полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно, но на 9.6% и 28.4% ниже модуля упругости полиэфирэфиркетона и материала на основе полиамида-6, соответственно.

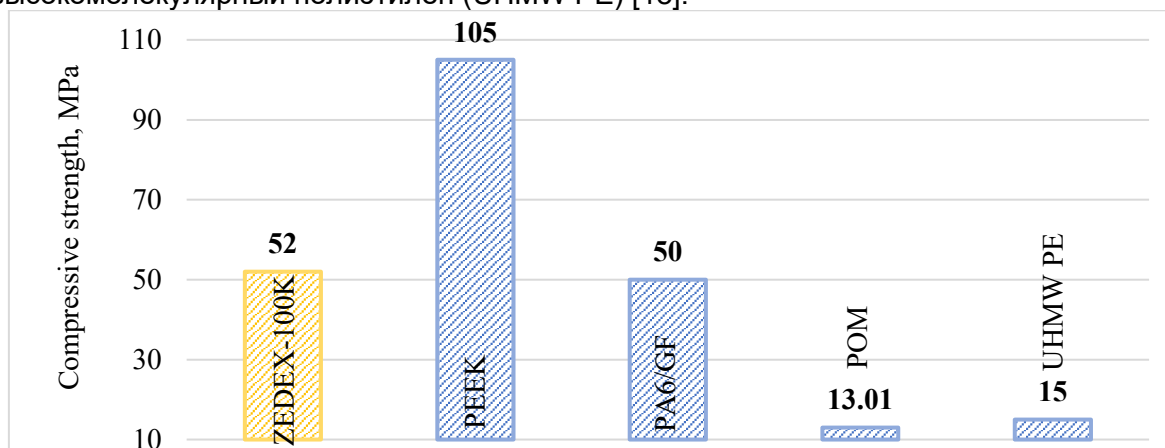
3.6 Предел прочности при сжатии

Результаты испытаний на определение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% представлены в таблице 6.

Table 6. Compressive strength
Таблица 6. Прочность при сжатии

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Нагрузка 3.5% деф-ции, Н	Прочность при сжатии, МПа
1	9.79	9.61	4797	51
2	9.82	9.59	4966	53
3	9.68	9.56	4748	51
4	9.82	9.59	4822	51
5	9.73	9.56	4858	52
Среднее значение				52

По результатам испытаний значение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% составило 52 МПа. На рисунке 11 представлено сравнение прочности при сжатии композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с прочностью при растяжении материалов, которые он может заменить: полиэфирэфиркетон (PEEK) [21], полиамид-6, армированный углеволокном (PA6/CF) [24], полиоксиметилен (POM) [25], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMW PE) [18].



our work [21] [24] [25] [18]

Fig. 11 - Comparison of compressive strength of engineering plastics

Рис.11 - Сравнение прочности при сжатии инженерных пластиков

Из рисунка 11 видно, что прочность при сжатии материала ZEDEX-100K оказалась выше всех сравниваемых инженерных пластиков, кроме полиэфирэфиркетона, прочность которого в 2 раза выше прочности материала ZEDEX-100K.

Результаты испытаний на определение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток представлены в таблице 7.

Table 7. Compressive strength after exposure to diesel fuel for 30 days

Таблица 7. Прочность при сжатии после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Нагрузка 3.5% деформации, Н	Прочность при сжатии, МПа
1	4.23	10.19	1820	45
2	4.22	10.25	1918	46
3	4.13	10.27	1746	41
4	4.14	10.52	1590	38
5	4.13	10.27	1812	43
Среднее значение				43

По результатам испытаний значение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток составило 43 МПа.

Результаты испытаний на определение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% после выдержки в морской воде в течение 5 месяцев представлены в таблице 8.

Table 8. Compressive strength after exposure to sea water for 5 months

Таблица 8. Прочность при сжатии после выдержки в морской воде в течение 5 месяцев

№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Нагрузка 3.5% деформации, Н	Прочность при сжатии, МПа
1	4.13	10.18	1345	32
2	4.09	10.16	1247	30
3	4.09	10.25	1283	31
4	4.09	10.25	1258	30
5	4.11	10.18	1339	32
Среднее значение				31

По результатам испытаний значение прочности при сжатии при заданной относительной деформации 3.5% после выдержки в морской воде в течение 5 месяцев составило 31 МПа.

Сравнение прочностных характеристик композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов представлены на рисунке 12.

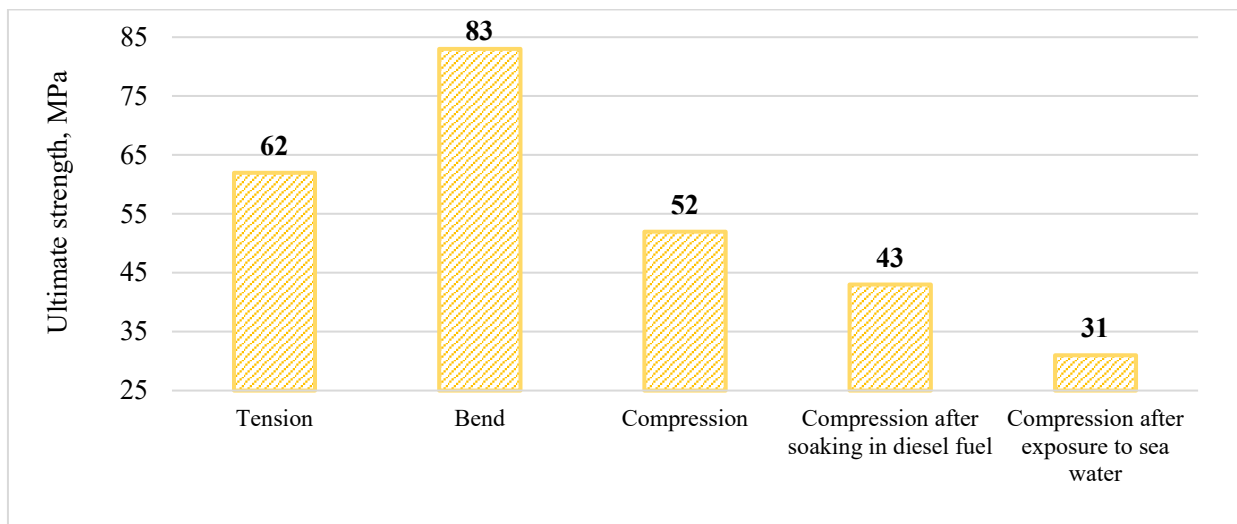


Fig. 12 - Comparison of strength characteristics
Рис.12 - Сравнение прочностных характеристик

Из рисунка видно, что максимальной прочностью материал обладает при изгибе. Предел прочности при изгибе на 34% и на 60% выше, чем предел прочности при растяжении и предел прочности при сжатии, соответственно. Прочность при сжатии снизилась на 17% и на 40% после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток и выдержки в воде в течение 5 месяцев, соответственно.

3.7 Результаты натурных испытаний изделий из композиционного материала на основе полиэтилентерефталата

Результаты измерений зазоров носовой и кормовой дейдвудных втулок, установленных взамен дейдвудных втулок Лб типа TORDON, после 18 месяцев эксплуатации на буксире «Вагис» ИМО 9376476 представлены в таблице 9.

Table 9. Results of measurements of stern tube bushing clearances on the Vagis tugboat
Таблица 9. Результаты измерений зазоров дейдвудных втулок на буксире «Вагис»

Наименование изделия	Зазоры после установки, мм		Зазоры после эксплуатации, мм		Максимальный износ, мм
	min	max	min	max	
Носовая втулка	1.45	1.62	1.52	1.8	0.18
Кормовая втулка	1.23	1.58	1.38	1.57	0.15

Общая наработка, с момента установки втулок, составила 1 300 часов за 18 месяцев, при этом максимальный износ подшипников из материала ZEDEX-100K составил 0.15 мм в кормовой и 0.18 мм в носовой части.

Экстраполяция износа на наработку 30 000 ч даст износ: 3.46 мм в кормовой и 4.15 мм в носовой части. Предельно допустимый износ 4.5 мм наступит при 39 000 ч общей наработки в кормовой и 32500 ч в носовой части.

4 Conclusions

Проведены экспериментальные исследования физико-механических характеристик композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов и натурные испытания дейдвудных втулок, изготовленных из этого материала. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлены физико-механические характеристики композиционного материала на основе полиэтилентерефталата с комплексом наполнителей из минеральных добавок на основе редкоземельных металлов: средняя плотность - 1327 кг/м³, водопоглощение по массе - 0.07%, твердость по Шору шкалы D - 80 ед., предел прочности и модуль упругости при растяжении - 62 МПа и 2894 МПа, соответственно, предел прочности и модуль упругости при изгибе - 83 МПа и 2577 МПа, соответственно, предел прочности при сжатии - 52 МПа, предел



прочности при сжатии после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток - 43 МПа и предел прочности при сжатии после выдержки в морской воде в течение 5 месяцев - 31 МПа.

2. Предел прочности при изгибе на 34% и на 60% выше, чем предел прочности при растяжении и предел прочности при сжатии, соответственно. Прочность при сжатии снизилась на 17% и на 40% после выдержки в дизельном топливе в течение 30 суток и выдержки в морской воде в течение 5 месяцев, соответственно.

3. Установлено превосходство исследуемого материала по определенным характеристикам перед другими видами инженерных пластиков: водопоглощение ниже на 95% и 91%, чем у материала на основе полиамида-6 и полиоксиметилена, соответственно, твердость по Шору выше на 5.2% и 35.8%, чем у полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно, прочность при растяжении выше на 30%, чем прочность полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модуль упругости при растяжении в 3.6 раз выше, чем у сверхвысокомолекулярного полиэтилена, предел прочности при изгибе выше на 15.3%, 15.5% и 219% чем прочность материала на основе полиамида-6, полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно, модуль упругости при изгибе выше на 30.8% и 222% чем модуль упругости полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно, предел прочности при сжатии больше в 4 и 3.5 раза, чем прочность полиоксиметилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена, соответственно.

4. Предельно допустимый износ 4.5 мм носовой и кормовой дейдвудных втулок, установленных на буксире «Вагис», наступит при 39 000 ч общей наработки в кормовой и 32500 ч в носовой части судна.

5 Acknowledgements

Авторы выражают признательность ООО «ТехноТимМарин» за предоставленные для испытаний образцы из материала ZEDEX-100K.

6 Fundings

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-03-2022-010 от 14 января 2022 и № 075--01568-23-04 от 28 марта 2023 (Дополнительные соглашения № 075-03-2022-010/10 от 09 Ноября 2022 и 075-03-2023-004/4 от 22 Мая 2023), FSEG-2022-0010

References

- 1 De Leon, A.C.C., Da Silva, Í.G.M., Pangilinan, K.D., Chen, Q., Caldon, E.B. and Advincula, R.C. (2021) High Performance Polymers for Oil and Gas Applications. *Reactive and Functional Polymers*, Elsevier, **162**, 104878. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2021.104878>.
- 2 Do, V.T., Nguyen-Tran, H.D. and Chun, D.M. (2016) Effect of Polypropylene on the Mechanical Properties and Water Absorption of Carbon-Fiber-Reinforced-Polyamide-6/Polypropylene Composite. *Composite Structures*, Elsevier, **150**, 240–245. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.05.011>.
- 3 Chandra Shekar, A., Hadj Djilani, A., Zitoune, R., Toubal, L. and Hof, L.A. (2023) Effect of Input Variables on the Mechanical Properties of Additively Manufactured PEEK Thermoplastics. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.09.101>.
- 4 Li, Y., He, H., Ma, Y., Geng, Y. and Tan, J. (2019) Rheological and Mechanical Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene/High Density Polyethylene/Polyethylene Glycol Blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Elsevier, **2**, 51–60. <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2018.08.004>.
- 5 Simunec, D.P., Jacob, J., Kandjani, A.E.Z., Trinchi, A. and Sola, A. (2023) Facilitating the Additive Manufacture of High-Performance Polymers through Polymer Blending: A Review. *European Polymer Journal*, Pergamon, **201**, 112553. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2023.112553>.



- 6 Hergenrother, P.M. (2003) The Use, Design, Synthesis, and Properties of High Performance/High Temperature Polymers: An Overview. *High Performance Polymers*, Sage PublicationsSage CA: Thousand Oaks, CA, **15**, 3–45. <https://doi.org/10.1177/095400830301500101>.
- 7 Trifunović, M., Madić, M., Janković, P., Rodić, D. and Gostimirović, M. (2021) Investigation of Cutting and Specific Cutting Energy in Turning of POM-C Using a PCD Tool: Analysis and Some Optimization Aspects. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **303**, 127043. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127043>.
- 8 Shtertser, A., Zlobin, B., Kiselev, V., Shemelin, S., Shikalov, V., Karpov, E. and Ivanyuk, K. (2023) Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Produced by Cyclic Impact Compaction and Reinforced with Graphene Nanoplatelets and Single-Walled Carbon Nanotubes. *Journal of Composites Science 2023, Vol. 7, Page 314*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **7**, 314. <https://doi.org/10.3390/JCS7080314>.
- 9 Madhan, K., Padmanaban, R. and Venkatesh, G. (2023) Formulation and Numerical Investigation of PTFE-Based Composites for Piston Rings of Oil Free Air Compressors. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 87–98. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3895-5_7.
- 10 Wakchaure, K.B. and Abhang, L.B. (2020) Experimental Investigation of Tribological Properties of Compressor Piston Ring with PEEK. *International Journal of Engineering Development and Research*, **8(2)**, 207–216. <https://ijedr.org/papers/IJEDR2002038.pdf>.
- 11 Cho, J.-R., Pöllinger, A., Maurer, J., Koch, T., Krenn, S., Plank, B., Schwarz, S., Stöger-Pollach, M., Siakkou, E., Smrczkova, K. and Schöbel, M. (2024) Characterization of PPS Piston and Packing Ring Materials for High-Pressure Hydrogen Applications. *Polymers 2024, Vol. 16, Page 412*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **16**, 412. <https://doi.org/10.3390/POLYM16030412>.
- 12 Ma, C.M. and Yur, S. -W. (1991) Environmental Effects on the Water Absorption and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced PPS and PEEK Composites. Part II. *Polymer Engineering & Science*, John Wiley & Sons, Ltd, **31**, 34–39. <https://doi.org/10.1002/PEN.760310107>.
- 13 Rajesh Ruban, S., Jannet, S., Raja, R., Rajaram, E. and Joshua, J. (2023) Evaluating the Tribological Properties of As-Built Polyamide 6 + 30 % Glass Fiber Polymer Printed by Fused Deposition Modelling via Varying the Infill Density. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.344>.
- 14 Zaghloul, M.M.Y., Steel, K., Veidt, M. and Heitzmann, M.T. (2024) Assessment of the Tribological Performance of Glass Fibre Reinforced Polyamide 6 under Harsh Abrasive Environments. *Tribology International*, Elsevier, **191**, 109059. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2023.109059>.
- 15 Feng, C., Guo, Y., Yu, Z., Chen, K., Wang, D., Li, X., Luo, Y., Wang, Q. and Zhang, D. (2023) Tribological Properties of PEEK Composites Reinforced by MoS₂ Modified Carbon Fiber and Nano SiO₂. *Tribology International*, Elsevier, **181**, 108315. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2023.108315>.
- 16 Kneissl, L.M., Gonçalves, G., Joffe, R., Kalin, M. and Emami, N. (2023) Mechanical Properties and Tribological Performance of Polyoxymethylene/Short Cellulose Fiber Composites. *Polymer Testing*, Elsevier, **128**, 108234. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2023.108234>.
- 17 Chan, K. and Zinchenko, A. (2023) Design and Synthesis of Functional Materials by Chemical Recycling of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic: Opportunities and Challenges. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, **433**, 139828. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139828>.
- 18 Galibeev, S.S., KHairullin, R.Z. and Arkhireev, V.P. (2008) Ultra High Molecular Weight Polyethylene. Trends and Prospects [Sverkhvysokomolekuliarnyi Polietilen Tendentsii i Perspektivy]. *Bulletin of the Technological University [Bulletin of Kazan Technological University]*. <https://cyberleninka.ru/article/n/sverhvysokomolekulyarnyy-polietilen-tendentsii-i-perspektivy.pdf>.
- 19 Mohsenzadeh, R., Soudmand, B.H. and Shelesh-Nezhad, K. (2022) A Combined Experimental-Numerical Approach for Life Analysis and Modeling of Polymer-Based Ternary Nanocomposite Gears. *Tribology International*, Elsevier, **173**, 107654. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2022.107654>.
- 20 Ali, A. Bin, Abdul Samad, M. and Merah, N. (2017) UHMWPE Hybrid Nanocomposites for Improved Tribological Performance Under Dry and Water-Lubricated Sliding Conditions. *Tribology Letters*, Springer Science and Business Media, LLC, **65**. <https://doi.org/10.1007/S11249-017-0884-Y>.



- 21 Sikder, P., Challa, B.T. and Gummadi, S.K. (2022) A Comprehensive Analysis on the Processing-Structure-Property Relationships of FDM-Based 3-D Printed Polyetheretherketone (PEEK) Structures. *Materialia*, Elsevier, **22**, 101427. <https://doi.org/10.1016/J.MTLA.2022.101427>.
- 22 Hussain, M., Naqvi, R.A., Abbas, N., Khan, S.M., Nawaz, S., Hussain, A., Zahra, N. and Khalid, M.W. (2020) Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **12**. <https://doi.org/10.3390/POLYM12020323>.
- 23 Schwitalla, A.D., Spintig, T., Kallage, I. and Müller, W.D. (2015) Flexural Behavior of PEEK Materials for Dental Application. *Dental Materials*, Elsevier, **31**, 1377–1384. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2015.08.151>.
- 24 Wang, K., Xie, G., Xiang, J., Li, T., Peng, Y., Wang, J. and Zhang, H. (2022) Materials Selection of 3D Printed Polyamide-Based Composites at Different Strain Rates: A Case Study of Automobile Front Bumpers. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, **84**, 1449–1462. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2022.11.024>.
- 25 Meena, R., Mali, H.S., Meena, A., Sharma, P.N., Kumar, P. and Choudhary, K. (2023) Influence of Alumina Powder (Al₂O₃) on Mechanical and Tribological Properties of Injection Molded Polyoxymethylene Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.05.174>.