



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 678.01:539.62

А.С. БРУНДУКОВ

младший научный сотрудник отдела «Физика и механика композиционных систем»¹
E-mail: alexeybrundukov@gmail.com

Я.А. КОВАЛЕВА

младший научный сотрудник отдела «Физика и механика композиционных систем»¹
E-mail: yara.kov@tut.by

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.10.2023.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПОРШНЕВОМ КОМПРЕССОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Предложен новый метод оценки износостойкости полимерных материалов по схеме трения «палец — диск». Он включает в себя изменение геометрии зоны трения полимерных образцов — сфера «пальца» заменена на усеченный конус. Разработанный метод апробирован на образцах из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ, фторопласт-4), в частности, полученного после лазерной абляции с добавлением углеродных волокон. Актуальность заключается в упрощении изготовления образцов, а также возможности оперативного изменения геометрических параметров их рабочей части, что расширяет область применения метода относительно новейших полимерных материалов и композитов на их основе. Практическая значимость результатов подтверждается их использованием на предприятиях ОАО «Гродно Азот» и ОАО «Гродненский механический завод», которые серийно выпускают ПКМ триботехнического назначения.

Ключевые слова: экспресс-метод, износ, интенсивность изнашивания, износостойкость, полиэфирэфиркетон, политетрафторэтилен, лазерная абляция, усеченный конус, палец — диск, компрессорное оборудование, поршневые кольца

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-65-70>

Введение. Увеличение ресурса эксплуатации технологического оборудования — главная задача как для разработчиков этого оборудования, так и для потребителей. Компрессорное оборудование является сложным техническим устройством, к которому предъявляют повышенные требования и которое работает в жестких условиях, что требует использования специальных материалов. Применение полимерных композиционных материалов в компрессорах обусловлено экстремальными условиями эксплуатации отдельных функциональ-

ных элементов [1–4]. Так, компримированный нагретый до 130–160 °С газ с большой скоростью (100–200 м/с) проходит через специальные отверстия/пазы в пластине прямооточного клапана, при этом сама пластина разгоняется до скорости 20 м/с на малом расстоянии. Срок службы таких пластин составляет 5000–8000 ч, что соответствует 0,3–0,5 млрд ударам. Таким образом, каждое срабатывание клапана сопровождается ударом пластин о металлические части, что оказывает повышенные динамические нагрузки в зоне уда-

ров. Поэтому для их изготовления применяют ударопрочные износостойкие ПКМ на основе таких полимеров, как полиамид (ПА) [3, 4] и ПЭЭК [5–6, 8]. В цилиндропоршневой группе (ЦПГ) безмасляных компрессоров поршневые кольца преимущественно изготавливают из ПКМ на основе фторопласта [4, 7]. Их срок службы может достигать 8–12 тыс. ч, однако в последних разработках современных компрессоров высокого давления этот материал работает на пределе характеристик. Сальниковые уплотнения штоков компрессора должны обеспечивать герметизацию движущегося со скоростью 10–13 м/с штока при давлении горячего газа до 25,0 МПа. Элементы ЦПГ в процессе компримирования химически активных сред подвергаются воздействию повышенных температур и давления, что приводит к интенсивному износу рабочих частей. В связи с этим для изготовления таких ответственных деталей, как уплотнительные и направляющие поршневые кольца, пластины клапанов и сальниковые уплотнения, применяются химически стойкие ПКМ, обладающие высокими показателями износостойкости. К таким материалам относят современные композиты на основе ПТФЭ [1, 9–10], ПА и ПЭЭК [11–13].

В процессе работы компрессоров полимерные детали изнашиваются, что приводит к выходу из строя оборудования, снижению производительности и экономическим потерям. Определение временных пределов эксплуатации полимерных материалов необходимо для планирования работ по замене деталей из них. Для этого необходимо установить корреляцию между ресурсом работы определенной детали при условиях ее эксплуатации и методом контроля качества исходных заготовок. Критерием пригодности материала будет конкретный показатель, что на практике было реализовано на предприятиях ОАО «Гродненский механический завод» и ОАО «Гродно Азот» для ПКМ на основе ПТФЭ [7].

При внедрении новых ПКМ в производство стандартные методы определения износа могут оказаться неприменимыми или низкопроизводительными ввиду изначальной ориентации под менее износостойкие полимеры. В этом случае сравнение новых ПКМ с широко применяемыми композитами является сложной задачей, для решения которой требуется либо изменение старого, либо разработка нового, подходящего разным по износостойкости ПКМ метода определения эксплуатационных характеристик. В связи с этим актуальным является применение универсальных методов экспресс-испытаний для контроля качества получаемых заготовок и предварительной оценки работоспособности деталей из них.

Существуют различные схемы проведения испытаний материалов по определению износостойкости [14]. К наиболее распространенным отно-

сятся схемы «палец — диск», «вал — частичный вкладыш», «вал — подшипник». С точки зрения производительности, наиболее подходящей является схема «палец — диск», так как по ней можно испытывать большее число образцов одновременно. Также данная схема имеет несколько собственных разновидностей, в которых изменяется геометрия рабочей поверхности образцов (плоская поверхность, сфера, усеченный конус). Например, «палец — диск» применяется для определения износостойкости серийно выпускаемых фторопластов семейства «Флувис» (ТУ РБ 03535279.071-99) на ОАО «Гродненский механический завод» и ОАО «Гродно Азот» [15]. Таким образом, для исследования износостойкости новых ПКМ была выбрана схема «палец — диск» [16].

Однако для адаптации метода под новые композиты была изменена фундаментальная расчетная часть и геометрия рабочей части образцов. Для корреляции полученных результатов была определена износостойкость широко применяемого в поршневом компрессорном оборудовании антифрикционного материала «Суперфлувис» (ТУ РБ 400084698.178-2006).

Цель исследований — разработка метода экспресс-испытаний по определению износостойкости полиэфирэфиркетона и ПКМ на основе фторопласта-4.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на испытательной машине ХТИ-72 (Россия) по схеме «палец — диск» [15, 16] и «усеченный конус — диск» (рисунок 1) при нагрузке 300 Н, линейной скорости скольжения 1,5 м/с, температуре в зоне трения от 20 до 50 °С (контролировалась термопарой), путь притирки составлял 1 км, полный путь трения — 8 км. Испытания проходили одновременно на трех об-

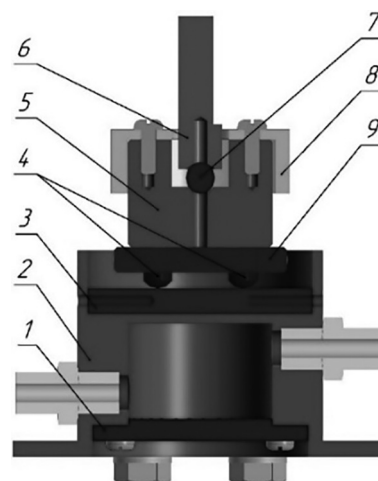


Рисунок 1 — Схема узла трения: 1 — крышка основания; 2 — основание; 3 — контргело; 4 — образец; 5 — переходник; 6 — вращатель; 7 — шарик; 8 — крышка вращателя; 9 — держатель образцов
Figure 1 — Friction unit diagram: 1 — base cover; 2 — base; 3 — counterbody; 4 — sample; 5 — adapter; 6 — rotator; 7 — ball; 8 — rotator cover; 9 — sample holder

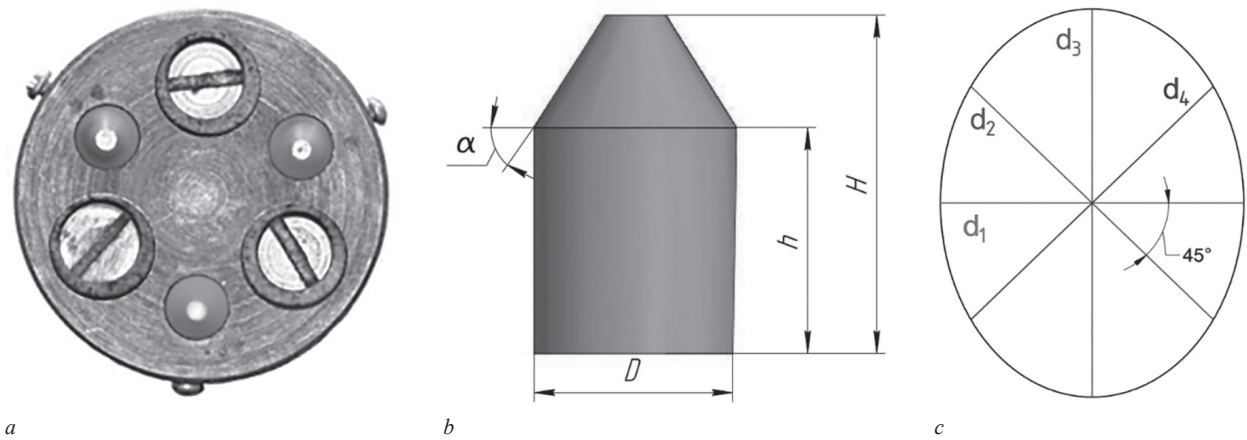


Рисунок 2 — Схема образцов в виде усеченного конуса: *a* — держатель образцов; *b* — испытуемый образец (α — угол у основания конуса, h — высота цилиндрической части, H — высота образца, D — диаметр образца); *c* — схема определения диагоналей пятна износа
Figure 2 — Scheme of samples in the form of a truncated cone: *a* — sample holder; *b* — test sample (α — angle at the base of the cone, h — height of the cylindrical part, H — height of the sample, D — diameter of the sample); *c* — diagram of determination of wear spot diagonals

разцах из одного материала с геометрией рабочей поверхности в виде усеченного конуса (рисунок 2) по плоской поверхности диска (контртела), выполненного из стали 20X13 с шероховатостью Ra 0,1–0,3 мкм. Для контроля частоты вращения переходника с коническими образцами применяли оптический дистанционный тахометр марки ДО-03-04 (ООО «Инкотес», Россия). Прибор располагали на расстоянии 5–10 мм от шпинделя с приклеенной отражательной лентой. Погрешность регистрации частоты вращения составила 0,006 %. Определение геометрических параметров образцов проводилось при помощи гладкого микрометра МК-225 («ООО НПП ЧИЗ», Россия) по ГОСТ 6507-90.

Для обеспечения равномерности изнашивания одновременно трех образцов предъявляются жесткие требования к их высоте и точности обработки поверхности. Так, максимальная разница высот не должна превышать $\pm 0,05$ мм, что является затруднительным в случае изготовления образцов со сферической рабочей частью. Это связано с тем, что для формирования сферы применяются специальные и дорогостоящие режущие инструменты (фасонные резцы) с нестандартной геометрией режущей кромки, при износе которой теряется точность получаемой поверхности. Оперативная замена и повторная заточка такого инструмента крайне затруднительна.

Переход к форме усеченного конуса является решением данной проблемы, поскольку для формирования этой геометрии достаточно стандартного режущего инструмента, при применении которого соблюдается высокая точность механической обработки.

Для устранения последствий биения образцов в зоне трения и установления единой плоскости трения для трех образцов проводили их начальную приработку, которая составляла 1 км при установленной нагрузке. Расчет характеристик проводится по стандартному для композитов на

основе ПТФЭ методу из рекомендаций ТУ ВУ 400084698.178-2006 при учете замены сферической рабочей части образцов на усеченный конус. Диаметры образцов измеряли при помощи большого инструментального микроскопа БИМ-1Ц (НПЗ им. В.И. Ленина, Россия, ГОСТ 8074-82) с погрешностью ± 3 мкм.

Методика экспресс-оценки состоит в измерении до испытания, после приработки и после прохождения основного пути диаметров усеченного конуса (диаметр зоны износа) каждого образца в четырех направлениях под углом 45° друг к другу (см. рисунок 2) и рассчитывается средний диаметр пятна износа каждого i -го образца по формуле:

$$d_i^k = \frac{\sum_{j=1}^4 d_{ij}}{4}, \quad (1)$$

где j — номер направления измерения i -го образца; i — номер образца; k — номер измерения (до испытания — 1, после приработки — 2, после основного пути — 3).

Объем износа V (мм^3) усеченного конуса вычисляют по формуле исходя из геометрических особенностей каждого образца:

$$V_i = \frac{1}{24} \pi \cdot \text{tg} \alpha \cdot \left((d_{ij}^k)^3 - (d_{ij}^{k-1})^3 \right). \quad (2)$$

Износ J ($\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$) рассчитывают по формуле:

$$J = \frac{\sum_{i=1}^3 (V_{i2} - V_{i1})}{N_3 \cdot S}, \quad (3)$$

где N_3 — нормальная нагрузка на три образца, Н.

Безразмерная интенсивность изнашивания I_i , представляющая собой отношение толщины изношенного слоя к пути трения для каждого пальца, определяется по формуле:

$$I_i = \frac{h_i}{S}, \quad (4)$$

Таблица — Триботехнические характеристики исследованных материалов
Table — Tribotechnical characteristics of the materials investigated

Материал	ПЭЭК		ПТФЭ+10%УВ		«Суперфлувис»	
	1	2	1	2	1	2
Износ J , 10^{-7} мм ³ /(Н·м)	6,74 ± 0,02	6,95 ± 0,01	9,13 ± 0,04	9,71 ± 0,04	6,16 ± 0,02	6,36 ± 0,04
Интенсивность изнашивания I , 10^{-8}	7,21 ± 0,04	7,44 ± 0,02	5,79 ± 0,03	6,16 ± 0,01	2,96 ± 0,04	3,05 ± 0,03
Износостойкость ε , 10^6	1,39 ± 0,01	1,44 ± 0,02	0,97 ± 0,01	1,03 ± 0,02	1,62 ± 0,06	1,57 ± 0,01

Примечание: 1 — стандартный метод; 2 — экспресс-метод.

где h — толщина износившегося слоя, мм; S — путь трения, м.

Толщина изношенного слоя h_i исходя из геометрии образцов вычисляется по формуле:

$$h_i = \frac{1}{2} (d_i^k - d_i^{k-1}) \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона образующей конуса.

Конечное значение интенсивности изнашивания I получается усреднением трех полученных значений I_i :

$$I = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_i. \quad (6)$$

Износостойкость материала ε есть величина, обратная значению износа (отношение наработки S к приращению линейного износа):

$$\varepsilon = \frac{1}{J}. \quad (7)$$

Образцы из ненаполненного ПЭЭК и угленаполненных композитов на основе ПТФЭ были получены методом холодного прессования с последующей термообработкой при температурах 350–400 °С. Образцы на основе ПТФЭ после лазерной абляции были наполнены 10 масс.% углеродных волокон УВИ-ПХО (ТУ ВУ 400031289.128-2015) — модифицированные углеродные волокна на основе вискозы, покрытые слоем фторполимера, которые формируются в плазме электрического разряда в среде фторорганических соединений [16]. Смешивание компонентов производилось при скорости 18 000 об/мин в лабораторном блендере Waring 8011S (Eltemiks-Agro, США). Образцы из «Суперфлувиса» были получены на ОАО «Гродненский механический завод» по стандартной технологии и соответствовали ТУ ВУ 400084698.178-2006.

Результаты и их обсуждение. В таблице представлены результаты исследования и сравнение двух методов. Диапазон получаемых данных находится в пределах погрешности измерений, что говорит о правомерности использований упрощенной схемы подготовки образцов для проведения испытаний.

Наиболее износостойким при трении сферических и конических образцов по стали среди исследуемых материалов является «Суперфлувис». Его интенсивность изнашивания I составила

$2,96 \pm 0,04 \cdot 10^{-8}$ и $3,05 \pm 0,03 \cdot 10^{-8}$ по стандартному и экспресс-методу соответственно, что в 2 раза меньше в сравнении с ПЭЭК и угленаполненным композитом ПТФЭ после лазерной абляции. Следует акцентировать внимание на том, что для всех материалов характерна одинаковая степень износостойкости, полученная двумя разными методами. При сравнении двух методов максимальная разница в значениях износа составила: 3 % — для ПЭЭК, 6 % — для ПТФЭ+10%УВ, 5 % — для «Суперфлувиса». При трении образцов ПЭЭК температура в зоне трения достигала 45 ± 5 °С, что при одинаковых условиях проведения экспериментов на 20 ± 5 °С выше по отношению к ПКМ на основе ПТФЭ.

Выводы. При сравнении стандартного и экспресс-метода установлено, что при переходе геометрии рабочей части от сферической к усеченному конусу диапазон получаемых данных находится в пределах погрешности измерений. Наиболее износостойким материалом, согласно обоим методам, является композиционный материал «Суперфлувис», что подтверждается его практической применимостью для изготовления поршневых колец компрессорного оборудования.

В работе приведено сравнение разных по своей природе материалов, при этом они обладают одинаковой степенью износостойкости с разницей значений в диапазоне от 3 % (ненаполненный ПЭЭК) до 6 % (ПТФЭ+10 масс.% УВ) при сравнении стандартного и экспресс-метода.

Сохранение достоверности получаемых результатов при переходе от стандартного к экспресс-методу, подтверждает правомерность его использования для определения износостойкости ПКМ, применяемых в поршневом компрессорном оборудовании.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «8.4. Многофункциональные и композиционные материалы» задания № 4.2.2 НИР 3 при частичной финансовой поддержке Национальной академии наук Беларуси, соглашение о гранте № 2023-26-039.

Список литературы

1. Воропаев, В.В. Структурно-морфологические закономерности получения высокопрочных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / В.В. Воропаев // Механика композиционных материалов и конструкций:

- тез. докл. IV Всерос. симпозиума, Москва, 4–6 дек. 2012 г. / ИПРИМ РАН. — М., 2012. — С. 25–26.
2. Франчак, С. Улучшение характеристик и повышение надежности поршневых компрессоров, используемых в системах производства технических газов / С. Франчак, К. Островски, Г.К. Лавренченко // Технические газы. — 2003. — № 4. — С. 2–8. — DOI: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2003.0100>.
 3. Моделирование самодельствующих многоэлементных клапанов с уменьшением числа пластин при анализе работы ступеней поршневых компрессоров / А.С. Маковеева [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. — 2018. — № 1. — С. 21–26.
 4. Сеидахмедов, Н.С. Исследования основных эксплуатационных характеристик работы клапанов поршневых компрессоров / Н.С. Сеидахмедов // Sciences of Europe. — 2021. — No. 79, vol. 1. — С. 52–55. — DOI: <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-79-1-52-55>.
 5. Конгапшев, А.А. Структура, синтез, свойства, применение полиэфирэфиркетонов / А.А. Конгапшев, Р.Ч. Бажева, А.М. Хараев // Современные проблемы естествознания: материалы IV региональн. науч.-практич. конф. студ. и молодых ученых, Грозный, 30 апр. 2020 г. / Чеченский гос. педагогич. ун-т. — Махачкала, 2020. — С. 33–41.
 6. Берлин, А.А. Полимерные матрицы для высокопрочных армированных композитов (обзор) / А.А. Берлин, Л.К. Пахомова // Высокомолекулярные соединения. — 1990. — Т. (А) 32, № 7. — С. 1347–1382.
 7. Воропаев, В.В. Структурно-технологические факторы получения высокопрочных фторкомпозитов / В.В. Воропаев // Композиционные материалы в промышленности: материалы XXXII ежегодной Междунар. конф., Ялта, 4–8 июня 2012 г. — Киев, 2012. — С. 57–65.
 8. Хараев, А.М. Полиэфиркетоны: синтез, структура, свойства, применение (обзор) / А.М. Хараев, Р.Ч. Бажева // Пластические массы. — 2013. — № 8. — С. 13–19.
 9. Гракович, П.Н. Применение фторопластового композита Флувис в поршневых компрессорах / П.Н. Гракович, В.А. Шелестова, В.В. Серафимович // Материалы. Технологии. Инструмент. — 2005. — № 3 — С. 33.
 10. Гракович, П.Н. Эффективный антифрикционный материал «Суперфлувис» для использования в компрессоростроении / П.Н. Гракович // Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 68–72. — DOI: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2006.0244>.
 11. Свиридов, Е.Б. Книга о полимерах: свойства и применение, история и сегодняшний день материалов на основе высокомолекулярных соединений / Е.Б. Свиридов, В.К. Дубовый. — 2-е изд., испр. и доп. — Архангельск: САФУ, 2016. — 392 с.
 12. Серкова, Е.А. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор) / Е.А. Серкова, В.В. Хмельницкий, О.Б. Застрогина // Тр. ВИАМ. — 2021. — № 5(99). — С. 56–63. — DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63>.
 13. Сироткин, О.С. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования / О.С. Сироткин, М.А. Андрионина, Э.Я. Бейдер // Авиационная промышленность. — 2012. — № 4. — С. 43–47.
 14. Григорьев, А.Я. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А.Я. Григорьев // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 6. — С. 664–669.
 15. Композиционный материал на основе имидосодержащего политетрафторэтилена для триботехнических покрытий / Э.Т. Крутько [и др.] // Технология органических веществ: материалы 85-й науч.-технич. конф. профес.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. / БГТУ. — Минск, 2021. — С. 143–145.
 16. Технология триботехнических композитов на основе политетрафторэтилена / В.А. Струк [и др.] // Инженерный вестн. — 2009. — № 1. — С. 110–116.
 17. Углеродный наполнитель для фторполимеров УВИ-ПХО / П.Н. Гракович [и др.] // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2017): тез. докл. междунар. науч.-технич. конф., Гомель, 27–30 июня 2017 г. / ИММС НАН Беларуси. — Гомель, 2017. — С. 175–176.

BRUNDUKOV Aleksey S.

Junior Researcher of the Department “Physics and Mechanics of Composite Systems”¹

E-mail: alexeybrundukov@gmail.com

KAVALIOVA Yaroslava A.

Junior Researcher of the Department “Physics and Mechanics of Composite Systems”¹

E-mail: yara.kov@tut.by

¹V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 30 October 2023.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF WEAR RESISTANCE OF POLYMER MATERIALS USED IN PISTON COMPRESSOR EQUIPMENT

A new method is proposed for assessing the wear resistance of polymer materials according to the “finger — disk” friction scheme. It involves changing the geometry of the friction zone of polymer samples — the “finger” sphere is replaced by a truncated cone. The developed method is tested on samples of polyetheretherketone (PEEK) and polymer composite materials (PCM) based on polytetrafluoroethylene (PTFE, fluoroplast-4), in particular, obtained after laser ablation with the addition of carbon fibers. The relevance lies in simplifying the manufacture of samples, as well as the possibility of quickly changing the geometric parameters of their working part, which expands the scope of the method with respect to the latest polymer materials and composites based on them. The practical significance of the results is confirmed by their use at such enterprises as JSC “Grodno Azot” and JSC “Grodno Mechanical Plant”, which serially produce tribotechnical PCM.

Keywords: *express method, wear, wear intensity, wear resistance, polyetheretherketone, polytetrafluoroethylene, laser ablation, truncated cone, finger—disk, compressor equipment, piston rings*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-65-70>

References

- Voropaev V.V. Strukturno-morfologicheskie zakonomernosti polucheniya vysokoprochnykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetraforetilena [Structural and morphological patterns of obtaining high-strength composite materials based on polytetrafluoroethylene]. *Tezisy dokladov 4 Vserossiyskogo simpoziuma "Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktivnykh"* [Abstracts of papers of the 4th All-Russian symposium "Mechanics of composite materials and structures"]. Moscow, 2012, pp. 25–26 (in Russ.).
- Franchak S., Ostrowski K., Lavrenchenko G.K. Uluchshenie kharakteristik i povyshenie nadezhnosti porshnevnykh kompressorov, ispolzuemykh v sistemakh proizvodstva tekhnicheskikh gazov [Improvement of the characteristics and increase of reliability of piston compressors which used in systems of manufacture of industrial gases]. *Industrial gases*, 2003, no. 4, pp. 2–8. DOI: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2003.0100> (in Russ.).
- Makoveeva A.S., Prilutskiy A.I., Prilutskiy A.A., Ganzha V.Yu. Modelirovanie samodeystvuyushchikh mnogoelementnykh klapvanov s umensheniem chisla plastin pri analize raboty stupeny porshnevnykh kompressorov [Modeling of self-acting multi-element valves with a decrease in the number of plates when analyzing the operation of piston compressor stages]. *Kompressoraya tekhnika i pnevmatika*, 2018, no. 1, pp. 21–26 (in Russ.).
- Seyidahmedov N.S. Issledovaniya osnovnykh ekspluatatsionnykh kharakteristik raboty klapvanov porshnevnykh kompressorov [Research of basic performance characteristics of valves of piston compressors]. *Sciences of Europe*, 2021, no. 79, vol. 1, pp. 52–55. DOI: <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-79-1-52-55> (in Russ.).
- Kongapshev A.A., Bazheva R.Ch., Kharaev A.M. Struktura, sintez, svoystva, primeneniye poliefirketonov [Structure, synthesis, properties, application of polyetheretherketones]. *Materialy 4 regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh "Sovremennyye problemy estestvoznaniya"* [Proc. 4th regional scientific and practical conference of students and young scientists "Modern problems of natural science"]. Grozny, 2020, pp. 33–41 (in Russ.).
- Berlin A.A., Pakhomova L.K. Polimernye matritsy dlya vysokoprochnykh armirovannykh kompozitov (obzor) [Polymer matrices for high-strength reinforced composites (review)]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, 1990, vol. (A) 32, no. 7, pp. 1374–1382 (in Russ.).
- Voropaev V.V. Strukturno-tekhnologicheskie faktory polucheniya vysokoprochnykh forkompozitov [Structural and technological factors for the production of high-strength fluorocomposites]. *Materialy 32 ezhegodnoy Mezhdunarodnoy konferentsii "Kompozitsionnye materialy v promyshlennosti"* [Proc. 32nd annual International conference "Composite materials in industry"]. Yalta, 2012, pp. 57–65 (in Russ.).
- Kharaev A.M., Bazheva R.Ch. Poliefirketony: sintez, struktura, svoystva, primeneniye (obzor) [Polyetheretherketones: synthesis, structure, properties, application (review)]. *Plasticheskie massy*, 2013, no. 8, pp. 13–19 (in Russ.).
- Grakovich P.N., Shelestova V.A., Serafimovich V.V. Primeneniye ftoroplastovogo kompozita Fluvis v porshnevnykh kompressorakh [Application of fluoroplastic composite Fluvis in reciprocating compressors]. *Materialy. Tekhnologii. Instrument*, 2005, no. 3, p. 33 (in Russ.).
- Grakovich P.N. Effektivnyy antifriktsionnyy material "Superfluvis" dlya ispolzovaniya v kompressorostroenii [Effective antifrictional material "Superfluvis" for using at compressor engineering]. *Industrial gases*, 2006, no. 3, pp. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2006.0244> (in Russ.).
- Sviridov E.B., Dubovyy V.K. *Kniga o polimerakh: svoystva i primeneniye, istoriya i segodnyashniy den materialov na osnove vysokomolekulyarnykh soedineniy* [The book about polymers: properties and applications, history and present day of materials based on high molecular weight compounds]. Arkhangel'sk, Severnyy (Arkticheskii) federalnyy universitet Publ., 2016. 392 p. (in Russ.).
- Serkova E.A., Khmelitskiy V.V., Zastrogina O.B. Polimernyye materialy dlya antifriktsionnykh pokrytiy (obzor) [Polymer materials for antifriction coatings (review)]. *Proceedings of VIAM*, 2021, no. 5(99), pp. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63> (in Russ.).
- Sirotkin O.S., Andriunina M.A., Beider E.Ya. Novyye konstruktivnyye i funktsionalnyye PKM na osnove termoplastov i tekhnologii ikh formovaniya [New structural and functional polymeric composite materials based on thermoplastics and their molding technology]. *Aviation industry*, 2012, no. 4, pp. 43–47 (in Russ.).
- Grigorev A.Ya. Vozvratno-postupatelnyy millitribometr MTU-2K7 [Reciprocating millitribometer MTU-2K7]. *Friction and wear*, 2014, vol. 35, no. 6, pp. 664–669 (in Russ.).
- Krutko E.T., et al. Kompozitsionnyy material na osnove imidosoderzhashchego politetraforetilena dlya tribotekhnicheskikh pokrytiy [Composite material based on imide-containing polytetrafluoroethylene for tribotechnical coatings]. *Materialy 85 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professionalno-prepodavatelskogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem) "Tekhnologiya organicheskikh veshchestv"* [Proc. 85th Scientific and technical conference of professional teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation) "Technology of organic substances"]. Minsk, 2021, pp. 143–145 (in Russ.).
- Struk V.A., et al. Tekhnologiya tribotekhnicheskikh kompozitov na osnove politetraforetilena [Technology of tribotechnical composites based on polytetrafluoroethylene]. *Inzhenernyy vestnik*, 2009, no. 1, pp. 110–116 (in Russ.).
- Grakovich P.N., et al. Uglerodnyy napolnitel dlya ftoropolimerov UVI-PKhO [Carbon filler for UVI-PKhO fluoropolymers]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Polimernyye kompozity i tribologiya (POLIKOMTRIB-2017)"* [Abstracts of papers of the international scientific and technical conference "Polymer composites and tribology (POLYCOMTRIB-2017)"]. Gomel, 2017, pp. 175–176 (in Russ.).