

**Буря А. И.,**  
Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск, Украина  
**Арламова Н. Т.,**  
Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск, Украина  
**Томина А.-М. В.,**  
Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск, Украина  
**Цуй Хун, Фен Сян-Мин,**  
Северо-западный политехнический университет, г. Сиань, Китай

---

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

Полиэфирэфиркетон (PEEK) являются ароматические полимеры с мономолекулярными цепями, построенных из фенилен колец, карбонильных групп и атомов кислорода. PEEK обладает уникальным комплексом эксплуатационных свойств (деформации жаропрочности, огнестойкость, радиационная стойкость, низкое водопоглощение, диэлектрические и структурные свойства), что стимулировало их разработку и применение, несмотря на всю сложность обработки (температура обработки в диапазоне 320–400 °С) и высокая стоимость. Отличительной особенностью PEEK-его чрезвычайно высокой влажностойкостью, включая устойчивость к горячей воды и пара. Благодаря этим свойствам она занимает по всем известным термопластов, в том числе полиэфирсульфона и полифениленовым сульфида.

PEEK имеет дискретный ввод  $t$  углеродного волокна (CF) для улучшения его performance. Мы разработанные заполненные композиции, содержащие 5–20 масс. % МВ на основе PEEK. Пресс – композиции, содержащие от: PEEK + 5–20 масс. % Углеродного волокна марки «Тогеука» готовили путем смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле в присутствии ферромагнитных частиц. Обработка этой приготовленной смеси в блок статей осуществляли методом сжатия прессования.

Изучена структура материалов в сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения JEOL JSM – 6460 LV цилиндрических образцов  $H = 3 \div 5$ ,  $\varnothing = 15$  мм.

Исследование трибологических свойств (износа, коэффициента трения и температуры в зоне контакта) в режиме сухого трения осуществляется с помощью диска автомобиля трения на пленку и передачи на первоначальной поверхности counte – тела. Для исследования использовали образцы диаметром 10 мм и высотой 12 мм.

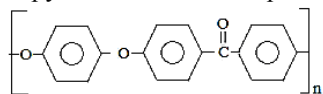
Учитывая, что одной из основных отраслей использования разработанных углепластиков является машиностроение, в частности, детали подвижных суставов – особое внимание было уделено изучению трибологических характеристик, поскольку это дает возможность прогнозировать нагрузочную способность фрикционного блока комплектуется деталями из углепластиков.

Анализ результатов показывает, что укрепление PEEK МВ сопровождается значительным улучшением характеристик триботехнических. В частности, при введении 5–15 масс. % Волокна в полимерной матрице коэффициент трения уменьшается при работе образцов вместе с начальной стальной поверхности и в присутствии на ее фильмах передачи в 1,14–1,67 и 1,8–1,9 раза, соответственно. Что касается износа, она по-прежнему уменьшается в значительной степени, а именно в 7,5–8,9 и 1,1–4,1 раза, соответственно. С одной стороны, это объясняется более высокими прочностными характеристиками, разработанных унитарным предприятием, чем при первоначальном PEEK; с другой – они имеют 1,3–1,7 раза выше теплопроводности, что, согласно теории усталостного износа предотвращает локализации тепла в зоне трения и термомеханической деструкции полимеров.

Что касается количества CF, то можно отметить, что содержание 10–15 масс. % является оптимальным. Увеличение количества волокон в композитных до 20 масс. % Приводит к ухудшению исследуемых характеристик, по-видимому, обусловлено ослаблением композитов на границе полимерного связующего – углеродного волокна.

**Ключевые слова:** полимеры; углепластиков; углерода Fibe; структура, свойства.

Полиэфирэфиркетоны (ПЭЭК) представляют собой ароматические полимеры, мономолекулярные цепи которых построены из фениленовых циклов, карбонильных групп и атомов кислорода.



ПЭЭК имеют уникальный комплекс эксплуатационных свойств (деформационная теплостойкость, термостойкость, огнестойкость, радиационная стойкость, низкое водопоглощение, диэлектрические и конструкционные свойства), что стимулировало их разработку и применение, несмотря на сложности переработки (температурные интервалы переработки 320–400 °С) и высокую стоимость.

ПЭЭК имеет повышенную по сравнению с другими полиариленами стойкость к действию растворителей и агрессивных сред (стойкость к длительному воздействию ацетона, трихлорэтилена, этилацетата, бензина и др.) при 20 и 160 °С под нагрузкой [1].

Отличительная особенность ПЭЭК – его чрезвычайно высокая влагостойкость, в том числе стойкость к воздействию горячей воды и пара. По этим свойствам он превосходит все известные термопласты, в том числе полиэфирсульфон и полифениленсульфид [2; 3]. После 800 ч пребывания в горячей воде при 80 °С полимер не гидролизует: его прочность и относительное удлинение не изменяются. Возможно кратковременное применение изделий из ПЭЭК в атмосфере пара при 300 °С.

Поскольку ПЭЭК обладает высокой стойкостью к растворителям, все способы переработки этого полимера требуют его перевода в расплав при 370–400 °С. Поверхностное натяжение расплава ПЭЭК – 36–39 дин/см; вязкость расплава – 400–500 Па·с (зависимость вязкости расплава от температуры весьма мала при температуре выше 380 °С) и 400 °С в течение часа вязкость 400–500 Па·с [4].

Для улучшения эксплуатационных характеристик в состав ПЭЭК вводят дискретные углеродные волокна (УВ). Нами на основе ПЭЭК были разработаны наполненные композиции, содержащие 5–20 масс. % УВ [5].

Учитывая вышеизложенное, целью данной работы являлось исследование влияния УВ на структуру и физико-механические свойства ПЭЭК, которые являются критерием оценки эксплуатационных свойств полимеров и композитов на их основе.

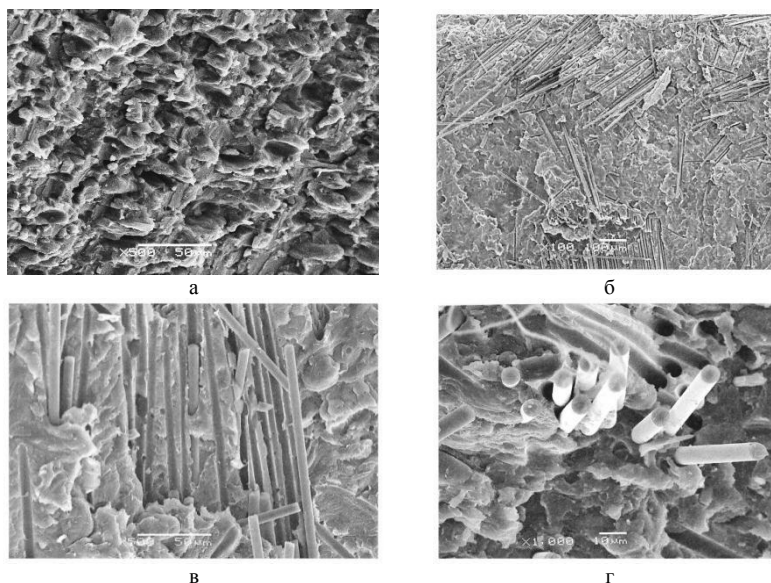
**Объекты и методы исследования.** Вследствие жесткоцепной структуры, узкого температурного интервала перехода УП на основе ПЭЭК в вязкотекучее состояние, граничащее с температурой деструкции, возникают определенные трудности при его переработке методами экструзии и литья под давлением. Учитывая это, для переработки ПЭЭК и УП на его основе в изделия был выбран метод компрессионного прессования.

Пресскомпозиции состава: ПЭЭК + 5–20 масс. % углеродного волокна марки «Горейка» готовили путем смешения компонентов во вращающемся электромагнитном поле в присутствии ферромагнитных частиц [6]. Переработку приготовленной таким образом смеси в блочные изделия осуществляли методом компрессионного прессования при давлении 50 МПа и оптимальной температуре прессования 355 °С, время выдержки без давления 10 минут, время выдержки под давлением 5 минут.

Структуру материалов изучали на растровом электронном микроскопе высокого разрешения СЕРИЯ JEOL JSM-6460 LV на цилиндрических образцах  $h = 3 \div 5$ ,  $\varnothing = 15$  мм.

Исследование трибологических свойств (износа, коэффициента трения и температуры в зоне контакта) в режиме сухого трения осуществляли на дисковой машине трение по пленке переноса и по исходной поверхности контртела. Для исследований использовали образцы диаметром  $\varnothing = 10$  мм и высотой  $h = 12$  мм.

**Анализ структуры полиэфирэфиркетона и углепластиков на его основе.** Электронномикроскопические исследования показали, что морфология излома разрушения армированного углеродным волокном полимера значительно отличается от морфологии исходного (рис. 1а).



**Рис. 1.** Электронные микрофотографии структур исходного полиэфирэфиркетона (а) и углепластиков на его основе, содержащих 10 (б, в) масс. % углеродных волокон. Увеличение:  $\times 500$  (а, в);  $\times 100$  (б);  $\times 1000$  (г)

Изучение с помощью электронного микроскопа равномерности распределения УВ в УП, полученных смешением исходных компонентов во вращающемся электромагнитном поле показало, что под действием неравноосных ферромагнитных частиц дискретные УВ равномерно распределялись в полимерной матрице (рис. 1б) с преимущественной ориентацией волокон перпендикулярно направлению прессования.

Из рис. 1в видно, что поверхность разрушения имеет ячеистый вид, наблюдаемый тогда, когда разрушение материала осуществляется по границам, составляющих матрицу элементов строения полиэдрической формы (зерна, субзерна – внутривершинные ячейки). В рассматриваемом случае элементы строения ПЭЭК и его композиций представляют собой сферолиты. Взаимное расположение отдельных участков цепной макромолекулы внутри сферолитов обычно беспорядочное и почти любой полимер, имеющий такое строение находится в аморфном состоянии. Как известно, процессы структурирования в сферолитных полимерах сводятся к агрегации частиц и к образованию более или менее выраженных надмолекулярных структур [7].

Исследования структуры излома показали, что использование в качестве модификаторов углеродных волокон оказывает существенное влияние на формирование надмолекулярной структуры ПЭЭК. Отчетливо видно, что при введении в полиэфирэфиркетон 15 масс. % УВ (рис. 1г), излом композиции становится трансглобулярным.

Таким образом, установлено, что армирование ПЭЭК углеродными волокнами с высокоразвитой поверхностью можно рассматривать как процесс, способствующий структурной перестройке в самом полимере в присутствии наполнителя, что в свою очередь приводит к изменению свойств.

#### Влияние углеродного волокна на трибологические характеристики ПЭЭК

Учитывая то, что одной из основных отраслей использования разработанных углепластиков является машиностроение, в частности детали подвижных сочленений – особое внимание было уделено изучению трибологических характеристик, так как это дает возможность предсказать грузоподъемность узла трения, укомплектованного деталями из углепластиков. Результаты трибологических характеристик представлены в табл. 1.

Таблица 1

Трибологические свойства ПЭЭК и УП на его основе

Содержание УВ, масс. %	Коэффициент трения				Износ, мг				Температура в зоне контакта с поверхностью контртела, °С
	по исходной поверхности контртела	по пленке переноса			по исходной поверхности контртела	по пленке переноса			
		300	400	500		300	400	500	
0	0,25	0,24	0,19	0,19	1,96	1,17	0,83	0,62	112
5	0,15	0,11	0,10	0,10	0,24	0,63	0,20	0,28	35
10	0,18	0,16	0,15	0,13	0,24	0,22	0,22	0,15	43
15	0,22	0,11	0,10	0,10	0,26	0,33	0,17	0,27	54
20	0,31	0,24	0,23	0,21	0,22	0,40	0,58	0,57	55

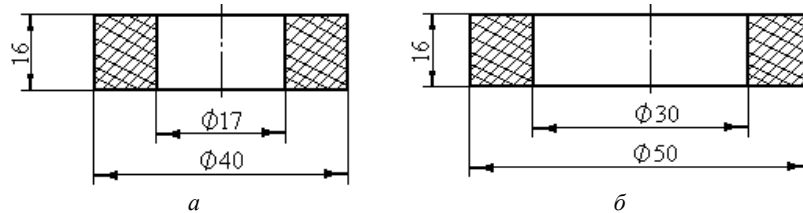
Анализ данных, представленных в табл. 1, свидетельствует о том, что армирование ПЭЭК УВ сопровождается существенным улучшением триботехнических характеристик. В частности, при введении 5–15 масс. % волокна в полимерную матрицу коэффициент трения снижается при работе образцов в паре с исходной стальной поверхностью и при наличии на ней пленки переноса в 1,14–1,67 и 1,8–1,9 раза, соответственно. Что касается износа, то он снижается еще в большей мере, а именно в 7,5–8,9 и 1,1–4,1 раза, соответственно. С одной стороны, это объясняется более высокими прочностными свойствами разработанных УП, чем у исходного ПЭЭК; с другой – они имеют в 1,3–1,7 раза выше теплопроводность, что, согласно усталостной теории износа предотвращает локализацию тепла в зоне трения и термомеханическую деструкцию полимеров.

Исходя из полученных данных, пленка переноса играет чрезвычайно важную роль обеспечивая снижение и стабилизацию как антифрикционных свойств, так и износостойкости. Это можно объяснить следующим образом: в процессе изнашивания образуются мелкодисперсные продукты износа, заполняющие микровпадины на поверхности контртела, при этом трение реализуется уже не по стали, а по продуктам износа. Это подтверждается и изучением поверхности трения разработанных УП. С помощью растрового

электронного микроскопа обнаружено, что при истирании УП образуется гладкая стекловидная поверхность, на которой отчетливо видны хаотически распределенные волокна и полосы пропахивания.

В отношении количества УВ, можно отметить, что оптимальным является содержание 10–15 масс. %. Увеличение количества волокна в композиции до 20 масс. % приводит к ухудшению исследуемых характеристик, что по видимому обусловлено разрушением композитов по границе раздела полимерное связующее – углеродное волокно.

**Применение разработанных углепластиков в узлах трения посевных машин.** Авторами было проведено теоретическое обоснование и проанализирован опыт применения полимеров в конструкциях посевных машин. Показана целесообразность использования деталей из разработанных углепластиков на основе ПЭЭК в узлах трения дискового сошника универсальной зерноуборочной комбайна СЗ-3,6 (рис. 2а) и вентилятора овощной сеялки точного высева СУПО-6-01-6 (рис. 2б) вместо серийных шарикоподшипников. Результаты полевых и заводских испытаний экспериментальных подшипников скольжения показали, что разработанные углепластики на основе ПЭЭК превосходят по долговечности серийные материалы более чем в 2 раза.



**Рис. 2.** Експериментальний подшипник скользящего дискового сошника универсальной зернотуковкой СЗ-3,6 (а), узла вентилятора овощной сеялки точного высева СУПО-6-01-6 (б)

Изучение структуры УП на основе ПЭЭК показало, что применение метода сухого смешения компонентов в электромагнитном поле обеспечивает равномерное распределение наполнителя в связующем с преимущественной ориентацией волокон перпендикулярно направлению прессования.

Исследования структуры излома показали, что использование в качестве модификаторов углеродных волокон оказывает существенное влияние на формирование надмолекулярной структуры ПЭЭК.

Установлено, что оптимальным комплексом триботехнических характеристик обладают углепластики, содержащие 10–15 масс. % углеродного волокна «Торейка». Увеличение количества волокна в композиции до 20 масс. приводит к ухудшению исследуемых характеристик, что по видимому обусловлено разрыхлением композитов по границе раздела полимерное связующее – углеродное волокно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Михайлин Ю. А. – Санкт-Петербург : Профессия, 2006. – 624 с.
2. Chang I. Y. Sample Quarterly/ Chang I. Y. – 1988. – V. 19. – № 4. – P. 34–39.
3. Чубарова Г. В. и др. В сб.: Технология. Серия : Конструкции из КМ, 1988, выпуск 1. – С. 42–50.
4. Проспекты фирмы Victrex «Materials Properties guide». 20 p., «Processing guide», 19 p.
5. Буря А. И. Исследование влияния углеродных волокон на термостойкость ароматического полиэфирэфиркетона. Композитные материалы / Буря А. И., Цуй Хун, Арламова Н. Т. – Т. 8, 2014. – № 1. – С. 27–34.
6. Буря А. И. Исследование влияния параметров переработки на износ полиэфирэфиркетона / Буря А. И., Ерёмин Е. А., Цуй Хун, Начовный И. И., Дудка А. Н. // Комплексне забезпечення якості і технологічних процесів та систем, Днепропетровск, 2014. – С. 113–115.
7. Липатов Ю. С. Рентгенографические методы изучения полимерных систем / Липатов Ю. С., Шилов В. В., Гомза Ю. П., Кругляк Н. Е. – К. : Наукова думка, 1982. – 296 с.

**А. І. Буря, Н. Т. Арламова, А.-М. В. Томина,**

*Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Дніпродзержинськ, Україна*

**Цуй Хун, Фен Сян-Мін,**

*Північно-західний політехнічний університет, м. Стань, Китай*

#### ВПЛИВ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН НА ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІЕФІРЕФІРКЕТОНА

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) є ароматичні полімери з мономолекулярними ланцюгів, побудованих з фенілен кілець, карбонільних груп і атомів кисню. ПЭЭК володіє унікальним комплексом експлуатаційних властивостей (деформації жароміцності, вогнестійкості, стійкості до радіації, низьке водопоглинання, діелектричні і структурні властивості), що стимулювало їх розробку і застосування, незважаючи на всю складність обробки (температура обробки в діапазоні 320–400 °С) і висока вартість. Відмінною особливістю ПЭЭК-його надзвичайно високу вологостійкість, включаючи стійкість до гарячої води і пари. Завдяки цим властивостям вона займає по всім відомих термoplastів, в тому числі поліефірсульфона і поліфеніленовим сульфідів.

ПЭЭК має дискретний ввід  $m$  вуглецевого волокна (CF) для поліпшення його *performance*. We розроблені заповнені композиції, що містять 5–20 мас. % МВ на основі ПЭЭК. Прес – композиції, що містять від: ПЭЭК + 5–20 мас. % Вуглецевого волокна марки «Торейка» готували шляхом змішування компонентів в обертовому електромагнітному полі в присутності феромагнітних частинок. Обробка цієї приготуваної суміші в блок статей здійснювали методом стиснення пресування.

Вивчено структуру матеріалів в скануючому електронному мікроскопі з високою роздільною здатністю JEOL JSM – 6460 LV циліндричних зразків  $H = 3 \div 5$ ,  $\varnothing = 15$  мм.

Дослідження трибологічних властивостей (зносу, коефіцієнта тертя і температури в зоні контакту) в режимі сухого тертя здійснюється за допомогою диска автомобіля тертя на плівку і передачі на первісній поверхні counte – тіла. Для дослідження використовували зразки діаметром 10 мм і висотою 12 мм.

З огляду на, що однією з основних галузей використання розроблених углепластиків є машинобудування, зокрема, деталі рухомих суглобів – особлива увага була приділена вивченню трибологічних характеристик, оскільки це дає можливість прогнозувати здатність навантаження фрикційного блоку комплектується деталями з углепластиків.

Аналіз результатів показує, що зміцнення ПЭЭК МВ супроводжується значним поліпшенням характеристик триботехнічних. Зокрема, при введенні 5–15 мас. % Волокна в полімерній матриці коефіцієнт тертя зменшується при роботі зразків разом з початковою сталевий поверхні і в присутності на її фільмах передачі в 1,14–1,67 і 1,8–1,9 рази, відповідно. Що

стосується зносу, вона як і раніше зменшується в значній мірі, а саме в 7,5–8,9 і 1,1–4,1 рази, відповідно. З одного боку, це пояснюється більш високими характеристиками міцності, розроблених унітарним підприємством, ніж при первинному PEEK; з іншого – вони мають 1,3–1,7 рази вище теплопровідності, що, відповідно до теорії втомного зносу запобігає локалізації тепла в зоні тертя і термомеханічної деструкції полімерів.

Що стосується кількості CF, то можна відзначити, що зміст 10–15 мас. % є оптимальним. Збільшення кількості волокон в композитних до 20 мас. % Приводить до погіршення досліджуваних характеристик, мабуть, обумовлено ослабленням композитів на кордоні полімерного сполучного – вуглецевого волокна.

**Ключові слова:** полімери; углепластиків; вуглецю Fibe; структура, властивості.

**Byria A. I., Arlamova N. T., Tomina A.-M. V.,**  
Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dneprodzerzhinsk, Ukraine  
**Cui Hong, Hairdryer Xiang-Ming,**  
North-Western Polytechnical University, Xi'an, China

## INFLUENCE OF CARBON FIBER ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PEEK

*Polyetheretherketones (PEEK) are aromatic polymers with monomolecular chains built of phenylene rings, the carbonyl groups and oxygen atoms. PEEK has a unique complex of operational properties (deformation heat resistance, flame resistance, radiation resistance, low water absorption, dielectric and structural properties), which stimulated their development and application, despite the complexity of processing (processing temperature ranges 320–400 °C) and high cost. A distinctive feature of PEEK—its extremely high moisture resistance, including resistance to hot water and steam. Due to these properties it ranks over all known thermoplastics, including polyether sulphone and polyphenylene sulphide.*

*PEEK has administered discrete carbon fibre (CF) to improve its performance. We developed filled compositions containing 5–20 mas. % of CF on the base of PEEK. The press – compositions containing of: PEEK + 5–20 mass. % carbon fibre of «Toreyka» brand were prepared by mixing the components in a rotating electromagnetic field in the presence of ferromagnetic particles. Processing of this prepared mixture into block articles was carried out by method of compression press moulding.*

*The structure of materials was studied in the scanning electron microscope of high resolution JEOL JSM – 6460 LV cylindrical specimens  $h = 3 \div 5$ ,  $\varnothing = 15$  mm.*

*Research of tribological properties (wear, friction coefficient and temperature in a contact zone) in the mode of dry friction carried out by disk car friction on a film of transfer and on an initial surface of a counte – body. For researches used samples diameter of 10 mm and height of 12 mm.*

*Considering that one of primary branches of use of the developed carbon plastics is the mechanical engineering, in particular details of mobile joints – the special attention has been paid to studying the tribological characteristics as it gives an opportunity to predict the loading capacity of the frictional unit completed with details from carbon plastics.*

*The analysis of results demonstrates that reinforcing PEEK of CF is followed by significant improvement of tribotechnical characteristics. In particular, at introduction of 5–15 mass.% the fiber in a polymeric matrix the friction coefficient decreases during the work of samples together with an initial steel surface and in the presence on her transfer films in 1,14–1,67 and 1,8–1,9 times, respectively. As for wear, it decreases still to a large extent, namely in 7,5–8,9 and 1,1–4,1 times, respectively. On the one hand, it is explained by higher strength properties developed unitary enterprise, than at initial PEEK; with another – they have 1,3–1,7 times above heat conductivity that, according to the fatigue theory of wear prevents localization of heat in a friction zone and thermomechanical destruction of polymers.*

*Concerning quantity of CF, it is possible to note that the maintenance of 10–15 mass. % is optimum. Increase in amount of fiber in composite up to 20 mass. % leads to deterioration in the studied characteristics that apparently is caused by a loosening of composites on the boundary of polymeric binding – carbon fiber.*

**Key words:** polymers; carbon plastics; carbon fibre; structure, properties.