

И. В., Харламов Е. И., Адагашев Р. И., Центр разработки нефтедобывающего оборудования (ЦРНО) (SC) - N 2005133726/22, 2005.

13. Штерцер, А. А. Воздействие гидроабразивной струи на материал: гидроабразивный износ / А. А. Штерцер, Б. Е. Гринберг // Прикладная механика и техническая физика. - 2013. - Т. 54, № 3(319). - С. 191-201.

14. Yao, J., F. Zhou, Y. Zhao, H. Yina, Q. Guo and N. Li. "Experimental Investigation of Erosion of Stainless Steel by Liquid-solid Flow Jet Impingement". *Procedia Engineering* 102 (2015): 1083 - 1091. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.

15. Talin, J. E., Y. A. Ballout and R. O. Scattergood. "Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys" *Wear* 1-2(196) 1996: 285-294.

V.A. Petrov<sup>1</sup>, U.N.Tsvetkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GUMRF named after Admiral S.O. Makarov,  
Saint Petersburg, Russia, 9522114620w@gmail.com

## **EXPERIMENTAL RIG TO TEST MATERIALS UNDER WEAR WITH SUBMERGED HYDROABRASIVE JET**

### **Annotation**

The goal of the article is designing the experimental installation to test the materials under hydroabrasive wear, that takes place on the surface of the nozzles of the dredgers jet pumps. The analysis of the hydroabrasive attack on the jet surface was carried out, and the scheme of the experimental rig was developed to conduct the tests on the wear under submerged hydroabrasive jet attack. The adjustment of the rig was made and the first experiments were carried out. The obtained results showed satisfactory repeatability.

*Keywords:* Jet pump, jet, hydroabrasive wear, abrasive particles, angle of attack.

УДК 678.067

doi: 10.18720/SPBPU/2/id24-223

Е.А. Шарко, И.В. Блышко, Д.Д. Дворянцев, М.Ю. Соболев, А.С. Саргсян,  
И.В. Лишевич, А.В. Анисимов  
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: mail@crism.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.**

### **Аннотация**

Работа посвящена исследованию физико-механических свойств и триботехнических характеристик новых гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Исследовано влияние состава гибридных тканей на физико-механические свойства и триботехнические характеристики новых ПКМ. Показано, что новые гибридные антифрикционные материалы не уступают по характеристикам антифрикционным углепластикам и превосходит их по некоторым показателям.

*Ключевые слова:* ПКМ, гибридные антифрикционные ПКМ, углепластики, коэффициент трения, прочность.

## Введение

В настоящее время актуальной задачей является создание новых антифрикционных материалов для высоконагруженных узлов трения судового машиностроения. Широко применяемые в настоящее время в судостроении антифрикционные углепластики имеют ряд ограничений на область применения в связи с наличием в составе углеродных волокон. В силу того, что углеродные волокна обладают положительным электрическим потенциалом, а большинство металлов отрицательным, то в процессе контактного взаимодействия в морской воде углепластик выполняет роль катода, а металлическое контртело является анодом. Таким образом, контактное воздействие углепластика и некоторых металлических контртел может приводить к коррозии последних [1,2]. Эта проблема может быть решена за счет применения ПКМ, которые не содержат углеродных наполнителей и являются диэлектриками.

Использование в ПКМ традиционных армирующих материалов не обеспечивает необходимый уровень механических и триботехнических характеристик, предъявляемых к антифрикционным материалам высоконагруженных узлов трения, смазываемых водой. В связи с этим, в качестве армирующих материалов были использованы ткани, состоящие из нитей различной природы. Исследуемый гибридный антифрикционный ПКМ состоит из органических волокон, отвечающих в большей степени за функциональные свойства материала, такие как коэффициент трения, гидрофобность и т.п., а также из неорганических волокон, которые обеспечивают механическую прочность и износостойкость материала.

Под поставленные задачи были спроектированы и изготовлены гибридные армирующие ткани на базе стеклянных, полиэтиленовых, полиамидных, арамидных, полиоксидазольных нитей марки «Арселон» и полиэфирных нитей. На рисунке 1 представлены фотографии некоторых образцов разработанных гибридных тканей.



Рисунок 1 - Внешний вид образцов гибридных тканей: а) ткань из стеклянных нитей и нитей СВМ, б) ткань из стеклянных нитей и полиоксидазольных нитей марки «Арселон», в) ткань из стеклянных нитей и нитей СВМПЭ, г) ткань из нитей СВМ и полиамидных нитей

При создании высокопрочного антифрикционного материала, способного работать при высоких контактных давлениях, необходимо учитывать специфику

армирующих материалов.

В первой части настоящей работы рассмотрены разработанные ПКМ, их состав, особенности исходных компонентов, процесс получения.

Во второй части приведены результаты лабораторных исследований физико-механических свойств и триботехнических характеристик гибридных полимерных композиционных материалов с целью подтверждения их работоспособности в тяжело нагруженных узлах трения.

### Методы и материалы

Для проведения работ были выбраны гибридные армирующие ткани двух типов - со стеклянными нитями из высокомодульных высокопрочных стеклянных волокон (ВМПС) и Арамидной нитью (СВМ) в основе ткани. В утке ткани использовались нити из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), а также полиоксадиазольных нитей марки «Арселон», полиамидные и полиэфирные нити. Свойства и марки данных нитей приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Свойства Органических и неорганических нитей, входящих в состав армирующих тканей.

Название и марка нити	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н/текс
Стекловолоконная нить, ВМПС8 28x4 2100-78	112	58,8 Н
Арамидная нить (СВМ) «Руслан»	58	1,8 Н/текс
СВМПЭ марка ПЭ-1	48	2,8 Н/текс
Нить полиамидная	47	0,76 Н/текс
Крученая нить «Арселон»	58	0,32 Н/текс

Для того, чтобы оценить влияние состава новых армирующих тканей на свойства ПКМ, все образцы изготавливались на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭТ-2, применяемой в углепластике марки УГЭТ. С целью не допустить перехода СВМПЭ в вязкотекучее состояние [4,7] был выбран продолжительный режим отверждения с минимально допустимой температурой отверждения полимерной матрицы 120° С. Режимы отверждения были идентичны для всех образцов ПКМ.

Физико-механические свойства образцов ПКМ определялись на испытательной машине Shimadzu AG-50kNX в соответствии со следующими нормативными документами:

- Разрушающее напряжение при сжатии по ГОСТ 23803-79;
- Изгибающее напряжение при разрушении по ГОСТ 4648-2014;
- Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге ГОСТ 23804-79.

Триботехнические испытания проводились на серийной машине трения модели ИИ 5018 производства завода «Точприбор» по методике экспрессных комплексных испытаний, разработанной в ИПМ РАН (лаборатория д. ф.-м. н. проф. Б. М. Гинзбурга) [5].

Для исследования микроструктуры образцов гибридных ПКМ и оценки износа после триботехнических испытаний использовался измерительно-вычислительный комплекс на базе стереоскопического микроскопа МБС-10.

Измерение удельного объемного электрического сопротивления высокопрочных антифрикционных электроизоляционных ПКМ проводилось в соответствии с ГОСТ Р 50499-93 (трех-электродная схема измерений) на

тераомметре Agilent 4339В при постоянном напряжении 500 В, время установления 10 минут.

### Результаты и обсуждение

*Результаты исследования физико-механических свойств гибридных ПКМ.*

Для исследования физико-механических свойств образцов гибридных ПКМ были проведены испытания по определению разрушающего напряжения при сжатии, межслойном сдвиге и изгибающего напряжения при разрушении. Результаты лабораторных испытаний образцов гибридных ПКМ представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты физико-механических испытаний ПКМ на основе гибридных тканей.

№	Состав армирующего материала	Предел прочности при сжатии, МПа	Напряжение при межслойном сдвиге, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
1	Углеродная ткань марки УРАЛ Т-15-Р-А	270	30	350
2	Стекланные нити и нити СВМ	346	61	605
3	Нити СВМ и нити из СВМПЭ	122	20	72
4	Стекланные нити и нити из СВМПЭ	260	29	500
5	Нити СВМ и полиамидная нить	122	4	72
6	Стекланные нити и нити «Арселон»	327	47	612
7	Нити СВМ и нити «Арселон»	113	10	154

По результатам испытаний закономерно видно преимущество прочностных характеристик образцов ПКМ, в состав которых входит стеклянная нить, которая обладает лучшей адгезией к полимерной матрице и делает стеклянную нить приоритетным армирующим материалом.

На рисунке 2 показан характер разрушения образцов ПКМ №4 армированных стеклянной нитью и нитью из СВМПЭ при определении разрушающего напряжения при сжатии. Изображения получены на приборе МБС-10.

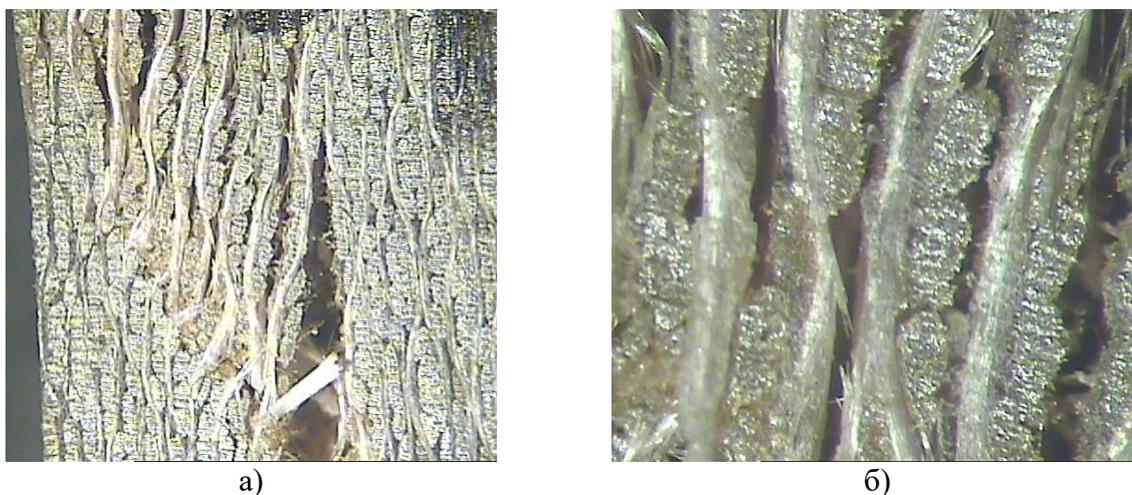


Рисунок 2 - Образец ПКМ, армированный стеклянной нитью и нитью из СВМПЭ, после испытаний при определении разрушающего напряжения при сжатии: а) увеличение x2  
б) увеличение x7

### Результаты триботехнических исследований

В процессе триботехнических испытаний определяются следующие характеристики: линейная интенсивность изнашивания и коэффициент трения ПКМ.

Триботехнические испытания образцов проводились в ванне со смазкой из проточной пресной воды. Контртело выполнено в виде ролика диаметром 50 мм из стали 20Х13 в состоянии поставки. Скорость вращения контртела составляет 400 об./мин, что соответствует линейной скорости скольжения 1м/с. Максимальная нагрузка на образец ПКМ во время испытания составила - 1800Н.

Образец ПКМ №2, привел к образованию задирав и канавки износа на поверхности контртела, которая видна на рисунке 3. По итогам первого этапа триботехнических исследований можно отметить, что образец ПКМ № 4, показал наилучшие результаты, коэффициент трения составил 0,07, а канавка износа достигла размера 4,3мм. Образец ПКМ, армированный стеклянными и полиамидными нитями получить наибольший износ – 7,6 мм. Фотографии канавок износа образцов ПКМ показаны на рисунке 4.

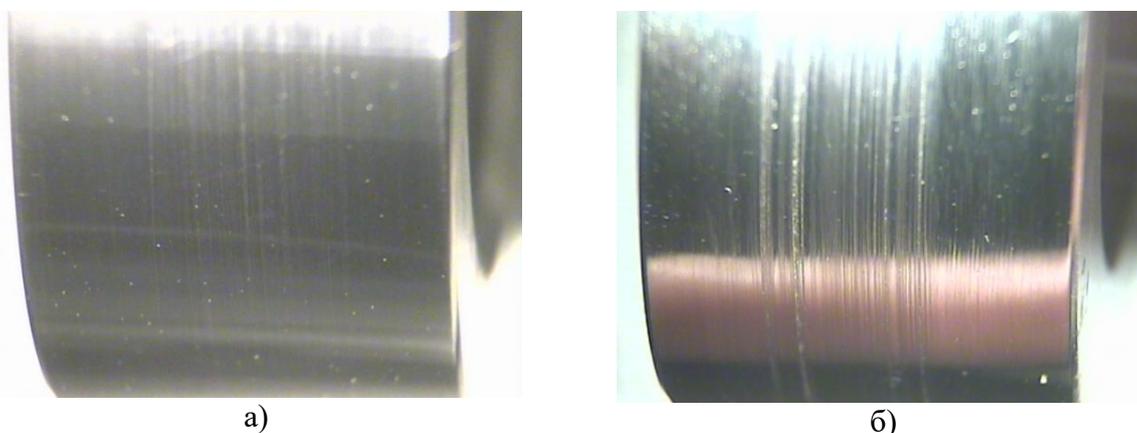


Рисунок 3 – Фотография поверхности контртела: а) Ролик из стали 20Х13 после испытаний образца ПКМ №4 Стекло/СВМПЭ; б) Ролик из стали 20Х13 после испытаний образца ПКМ №2 Стекло/СВМ

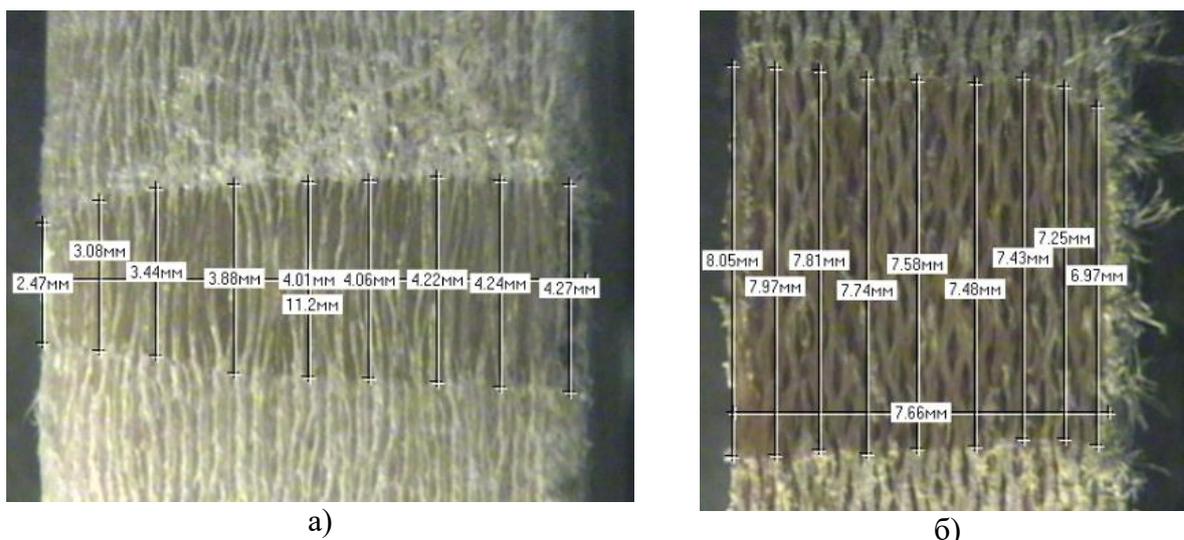


Рисунок 4 – Фотографии образцов ПКМ после испытаний: а) Канавка износа после испытаний на образце №4; Стекло/СВМПЭ в среднем 4,3 мм; б) Канавка износа после испытаний на образце №5; Стекло/Полиамид в среднем 7,6 мм.

Результаты испытаний наилучших соотношений для каждого гибридного

ПКМ показаны на графиках (Рис.5 и Рис.6).

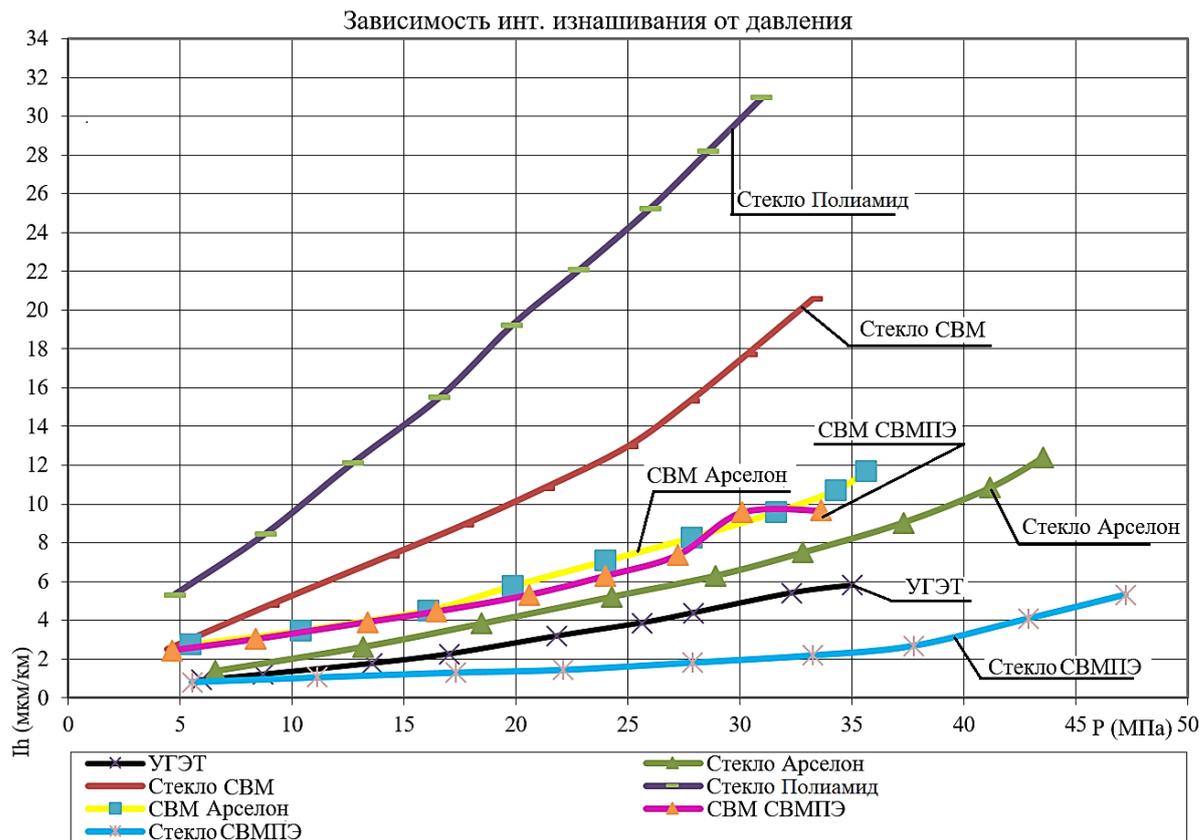


Рисунок 5 - График зависимости интенсивности изнашивания от давления

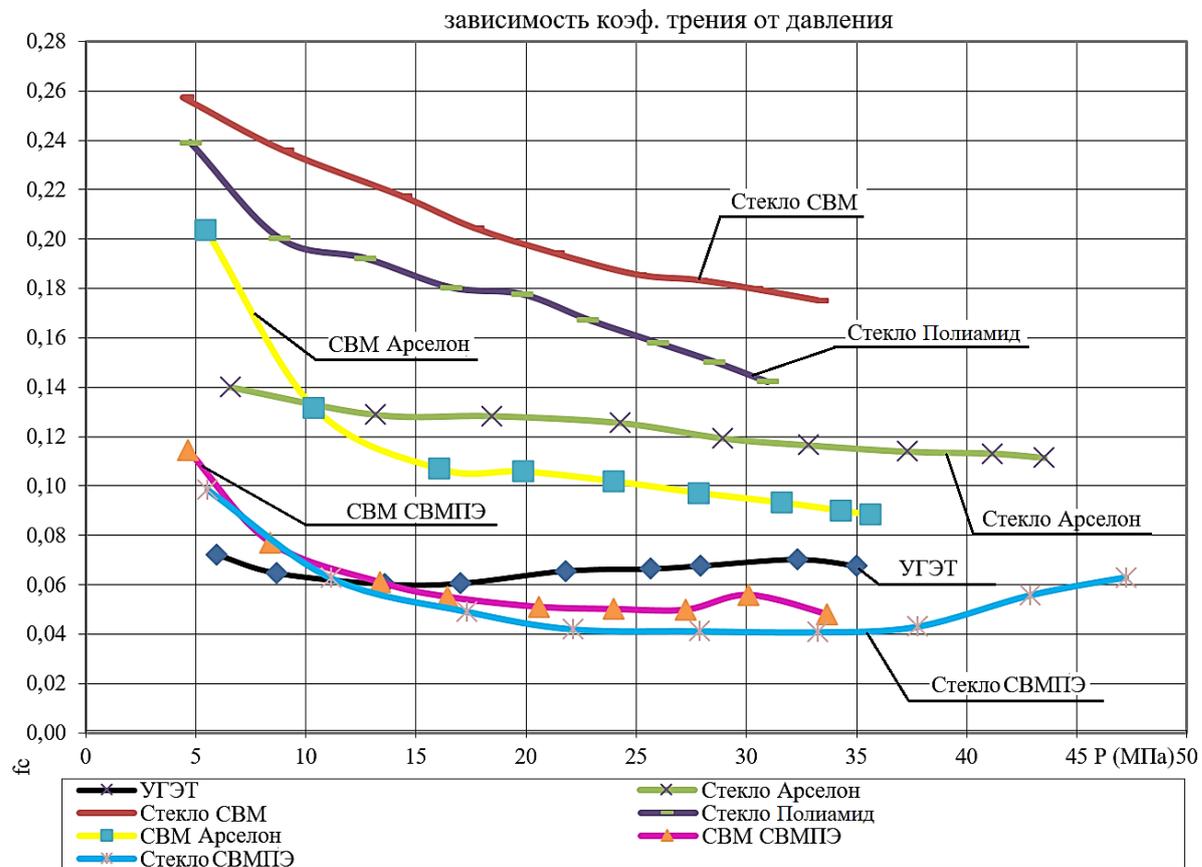


Рисунок 6 - График зависимости коэффициента трения от давления.

### Результаты исследования электроизоляционных свойств

В ходе испытания Тераомметр Agilent 4339В фиксировал измерения электрического сопротивления образцов постоянному току. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты испытаний по определению удельного объемного электрического сопротивления

№ образца	Состав образца	Толщина образца, мм	Удельное объемное электрическое сопротивление, х Ом·м
1	ПКМ на основе углеродной ткани	4,0	$1,5 \cdot 10^2$
2	ПКМ на основе СВМ и полиамид	3,1	$0,14 \cdot 10^{13}$
3	ПКМ на основе СВМ и «Арселон»	3,0	$0,50 \cdot 10^{13}$
4	ПКМ на основе СВМ и СВМПЭ	3,5	$0,40 \cdot 10^{13}$
5	ПКМ на основе стеклянной нити и СВМПЭ	5,5	$7,00 \cdot 10^{13}$

Из результатов испытаний можно сделать вывод, что гибридные материалы являются диэлектриками, в отличие от углепластика.

#### Заключение:

1. Разработаны новые антифрикционные высокопрочные электроизоляционный полимерные композиционные материалы.

2. Из двух десятков разработанных материалов с разным составом и соотношением армирующих волокон в гибридной ткани были выбраны наиболее перспективные материалы, для дальнейшей разработки;

3. Новые гибридные антифрикционные ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон не уступают углепластикам по триботехническим характеристикам;

4. Гибридные ПКМ на основе стеклянных волокон с добавлением СВМ, Полиоксадиазольных и СВМПЭ волокон обладают высокими прочностными свойствами и не изменяют линейных размеров в результате водопоглощения;

5. Диэлектрический антифрикционный материал расширяет область применения подшипников скольжения и исключает причину возникновения контактной коррозии в области трибоконтакта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахарева В. Е. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Справочник / Под ред. И. В. Горынина. – СПб.: НПО “Профессионал”, 2014. – С. 79-133.

2. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие / В. Г. Бондалетов; Томский политехн. ун-т; Л. И. Бондалетова. — Томск : Изд-во ТПУ, 2013. — 111 с.

3. Власов С. В. Основы технологии переработки пластмасс: учеб. Для вузов. 2-е изд., испр. И доп. / С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев, и др. – М.: Химия, 2004. – 600 с.

4. Крыжановский В. К. Производство изделий из полимерных материалов. / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.

5. Точильников Д.Г. Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров. // Вопросы материаловедения. -2002-№ 3(31). – С. 39-48.

6. Машков Ю.К., Трибология конструкционных материалов: Учеб.пособие. – Омск:

ОмГТУ, 1996. – 304 с.

7. Современные наукоемкие технологии. — URL: <https://top-technologies.ru/ru> (дата обращения: 24.09.2022). – Текст: электронный

8. Ткаченко Э.В. Разработка армированных композитов на основе полиамида 6 и фенилона с-1: Диссертация к.т.н. / Э. В. Ткаченко. – Севастополь, 2018. – С.28.

9. Мороков А. А. Технология прядения, ткачества и нетканых материалов: учеб. пособие / А. А. Мороков, Г.П. Смирнов, Н.С. Цыбизова – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2013. – 163 с.

10. Материалы для судостроения и морской техники: Справ. / Под ред. И.В. Горынина. СПб: НПО «Профессионал» 2009. Т. 2. С.381-433.

11. Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) / Труды ВИАМ: промышленные биотехнологии, 2020. – С. 49-54.

12. Крыжановский В. К. Производство изделий из полимерных материалов. / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.

13. Анисимов А.В., Барахтин Б.К., Бахарева В.Е., Петров С.Н., Рыбин В.В. Исследование микроструктуры и механизма изнашивания поверхностей пар трения углепластики - медьсодержащие сплавы // Вопросы материаловедения -2006 - №2(46) – с. 44-51.

14. Лысенков М.П. Способность некоторых неметаллических материалов формировать бинарную поверхность трения //Вопросы материаловедения. – 2006.– № 2(46). – С. 136-139.

15. Точильников Д.Г., Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров //Вопросы материаловедения. – 2002. – № 3 (31). – С. 39 -48.

16. Материалы для судостроения и морской техники. Справочник. Под ред. И.В.Горынина. – СПб: НПО «Профессионал», 2009. - Т.2 – С.381-433.

17. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения – 2011 - №1(65) – с.75-88.

E.A. Sharko, I.V. Blyshko, D.D. Dvoryantsev, M.Yu. Sobolev, A.S. Sargsyan, I.V. Lishevich, A.V. Anisimov  
National Research Center "Kurchatov Institute" – Central Research Institute of  
CM "Prometheus", Saint Petersburg, Russia, E-mail: mail@crism.ru

### **Abstract**

The work is devoted to the study of the physical and mechanical properties and tribotechnical characteristics of new hybrid antifriction polymer composite materials (PCMs). The influence of the composition of hybrid fabrics on the physical and mechanical properties and tribological characteristics of new PCMs was studied. It has been shown that new hybrid antifriction materials are not inferior in characteristics to antifriction carbon fiber reinforced plastics and surpass them in some respects.

*Keywords:* PCM, hybrid antifriction PCM, carbon fiber reinforced plastics, friction coefficient, strength.