# Влияние расположения слоёв ткани на трибологические свойства углеродного тканевого композита.

Горячева<sup>1</sup> И.Г., Шпенев<sup>1</sup> А.Г., Буковский<sup>1</sup> П.О., Щербакова<sup>1</sup> О.О., Муравьева<sup>1</sup> Т.И., Кривошеев<sup>2</sup> А.Ю., Каледин<sup>3</sup> А.В., Шикунов<sup>3</sup> С.Л., Курлов<sup>3</sup> В.Н.

- 1. ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия.
- 2. ООО «ГМК», Таганрог, Россия.
- 3. ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, Черноголовка, Россия.

Аннотация.В работе проведено исследование серии углерод-углеродных антифрикционных композитных материалов армированных углеродной тканью на основе ПАН и вискозного сырья. Исследуемые композиты подвергались трибологическим тестам в паре с карбид-кремниевой керамикой в условиях сухого трения при различной ориентации слоёв ткани относительно поверхности трения в диапазоне температур 80...100 °С. С помощью методов сканирующей электронной микроскопии и оптической профилометрии проведен анализ поверхности композитов после трибологических испытаний. Выявлены особенности механизмов трения и изнашивания композитов при разных конфигурациях контакта и различных свойствах материалов; определены особенности процессов разрушения при трении отдельных структурных элементов композита (отдельных волокон, нитей, слоёв армирующей ткани). Установлено, что образующаяся на поверхности трения плёнка продуктов износа, оказывает определяющее влияние на трибологические характеристики (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) исследованных материалов. Установлено, что термообработка композитов при повышенной температуре (>2000 °C) не оказываетзначительного влияния на трибологические свойства материала. Определены сочетания тканевой основы композита, её ориентации относительно поверхности трения и режима термообработки материала, обеспечивающие одновременно повышение износостойкости и снижение трения в условиях фрикционного взаимодействия.

### Введение.

В современном мире практически ни одна отрасль народного хозяйства не может обойтись без применения композиционных материалов [1-5]. Интерес к данным материалам обусловлен многообразием их эксплуатационных свойств. Они характеризуются химической инертностью, малой плотностью, хорошими электрофизическими свойствами, возможностью регулирования теплопроводности и электрического сопротивления в широких пределах, высокими значениями модуля упругости и прочности, а также уникальными трибологическими свойствами. Одними из наиболее перспективных являются композиты на основе углеродных волокон (УВ) [6-9]. Комплекс полезных характеристик углеродных волокон определяется природой исходного материала и разнообразием структурных особенностей. Свойства углеродных волокон в значительной степени определяются их структурой, которая, в свою очередь, зависит от условий получения (температуры термообработки, состояния исходного сырья, присутствия легирующих модификаторов, а также наличия дефектов). В зависимости от режима термообработки углеродные волокна подразделяются на карбонизованные и графитированные, а в зависимости от состава полимерного прекурсора различают ПАН и вискозные волокна [10-12]. Углеродные волокна могут выпускаться в виде самых разнообразных текстильных структур: штапелированные, непрерывные нити, тканные или нетканые материалы. Кроме того,

структура и свойства углеродных волокон зависят как от специфической формы материала (волокно), так и от ориентированной структуры исходных материалов, из которых они получены.

Композиты на основе углеродных волокон и углеродной матрицы уже несколько десятилетий используются в качестве фрикционных материалов в узлах, требующих высокой прочности и термостойкости компонентов [13]. Однако высокая термостойкость углерода в сочетании с химической инертностью делает перспективным применение таких материалах также в качестве антифрикционных в паре с контртелами высокой твёрдости [14,15]. Большинство существующих серийных углерод-углеродных трибокомпозитов изготавливаются на основе жгутов волокон и хаотично направленных матов (в основном из экономических соображений). Это ограничивает возможность выбора ориентации волокон относительно поверхности трения. При этом следует отметить, что антифрикционные углепластики часто производятся из углеродных тканей [16]. Применение тканевой основы дает возможность варьировать ориентацию армирующих волокон относительно поверхности трения в широких пределах, что позволяет улучшить как прочность детали, так и трибологические свойства пары трения [17]. Исследованию взаимосвязи структуры и свойств углеродных композитов посвящено значительное количество работ [1,9], тем не менее, до сих пор нет достаточно полного представления о характере влияния тех или иных параметров структуры на их характеристики, что свидетельствует о сложности строения УВ и большом числе факторов, влияющих на прочность материалов на их основе. Данная работа посвящена изучению экспериментальных тканевых композитов антифрикционного назначения, армированных графитированными и карбонизованными УВ, на основе ПАН и вискозы. Конечной задачей исследования являлось изучение влияния расположения волокон относительно поверхности трения на трибологические характеристики композитов.

#### Цель работы.

Данноеисследование посвящено изучению влияниятипа армирующейуглеродной ткани, расположения слоев тканиотносительно поверхности трения, а также температуры отжига углерод-углеродного композитанаего трибологические свойства в паре с керамическим контртелом. Также задачей исследования являлось изучение процессов, происходящих на контактной поверхности при трении.

#### Материалы и методы исследования.

Объектами исследования являлись четыре углерод-углеродных композитасерии «Хардкарб» на тканевой основе, произведённые ООО «ГМК», г. Таганрог, Россия. Данные композиты различались типом армирующейуглеродной ткани - на основе ПАН (400 г/м<sup>2</sup>, саржевое плетение) и вискозы (325-350 г/м<sup>2</sup>, полотняное плетение).Материалыизготавливалисьметодом прессования пропитанного полимером тканевого препрепрега с последующей термической обработкой.Далее заготовки уплотнялись (до плотности 1.3-1.5 г/см<sup>3</sup> в зависимости от техпроцесса) в процессе осаждения пиролитического углерода из газовой фазы. После уплотнения материалы подвергались финальной термообработке при различных температурахотжига: карбонизация приT < 1000°C и графитация приT > 2000°C (таблица 1).

Номер	Название композита	Температура отжига	Материал препрега
образца			
1	Хардкарб-ТП	Карбонизация	ПАН
2	Хардкарб-ТВ	T<1000 °C	Вискоза
3	Хардкарб-ТПГ	Графитация	ПАН
4	Хардкарб-ТВГ	T>2000 °C	Вискоза

Таблица 1. Виды исследуемых композитов и особенности их изготовления.

Экспериментальное изучение трибологических свойств, таких как коэффициент трения и интенсивность изнашивания, проводилось на лабораторном трибометре UMT-2 (Cetr, USA) по схеме контакта кольцо-диск (рис. 1а). Испытания проводились в двух вариациях расположения слоёв углеродной ткани относительно поверхности трения (рис. 1б,в). Первая схема: слои углеродной ткани располагались перпендикулярно поверхности трения (рис. 1б); композитный образец был выполнен в форме кольца, а контртело в виде диска. Вторая схема: слои углеродной ткани располагались параллельно поверхности трения (рис. 1в); углеродный композитбыл выполнен в форме в виде диска, а контртело в форме кольца.



Рис. 1. (а)Схема трибологических испытаний, где 1 – самоустанавливающийся держатель; 2 – оснастка для крепления кольца; 3 – кольцо; 4 – диск; 5 – оснастка для крепления диска;Расположение слоёв углеродной ткани в образцах композита: (б) перпендикулярно, (в) параллельно к поверхности трения.

В качестве контртела использовалась керамика на основе карбида кремния. Материал контртела был получен методом жидкофазного силицирования пористых

углеродных заготовок по методике, разработанной в ИФТТ РАН[6]. Материал отличается высокой твёрдостью (HRC  $\approx 92,5\pm1,5$ ) и практически не изнашиваетсяв процессе испытаний. Испытания проводились при фиксированной нагрузке F = 150 H(что соответствовало контактным давлениям  $P = 0.5 \text{ M}\Pi a$ ) и скорости скольжения V = 1.25 м/cв первой схеме и V = 0.5 м/с во второй схеме испытаний. Разница в скоростях была обусловлена различной теплопроводностью материалов вдоль и поперёк слоёв ткани. Такое сочетание скоростей позволило удерживать температуру в контакте, растущую за счёт фрикционного разогрева, в одинаковом диапазоне значений (80...100 °C). При этом сохранялся режим трения, при котором не происходитосушения плёнки продуктов износа на поверхности контакта (поскольку углеродный композит является гигроскопичным материалом, способным впитывать в себя влагу из воздуха). Содержащая влагу плёнка продуктов износа на поверхности трения композита обеспечивает достаточно низкие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания [19,20]. Для наработки видимого износа, который может фиксировать используемое оборудование, все эксперименты имели длительность по времени около 5 часов. В процессе трения производился бесконтактныйконтроль температуры вблизи зоны контакта при помощи пирометра с погрешностью ±10%.Перед началом проведения экспериментов с целью обеспечения одинаковой микрошероховатости и геометрической формы поверхности образцов осуществлялась их притирка на наждачной бумаге из карбида кремния с зернистостью 14-20 мкм.

На рисунке 2 представлены типичные графики зависимости коэффициента трения и сближения образцов относительно друг друга от времени испытаний. Линейный износ расчитывался исходя из сближения образцов (рис. 2 б), в диапазоне с установившимся режимом, при помощи встроенного в трибометр датчика линейного сближения образцов.



Рисунок 2. Типичный вид записи коэффициента трения (кривая 1) и сближения образцов (кривая 2) на трибометре UMT-2, где а – этап приработки; б – установившийся режим трения.

Изменение морфологии поверхности трения композитов после вышеперечисленных серий трибологических испытаний на масштабном уровне отдельных слоёв ткани изучались методом конфокальной профилометрии на бесконтактном оптическом профилометре S Neox (SensoFar,Испания). Измерение топографии поверхности образцов было выполнено на типично-повторяющихся участках поверхности. В этом исследовании для сбора данных использовался конфокальный объектив 20х.

С целью исследования изменения поверхности композитов в процессе трения волокон было проведено на масштабном уровне отдельных электронномикроскопическое изучение поверхности трения исследуемых материалов. Использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Quanta-650 (FEI,США) с детекторами вторичных и обратноотраженных электронов и аналитическим оборудованием EDAX (АМЕТЕК, США), включающим энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализатор.Использование двух детекторов дает возможность собрать более полную информацию о состоянии поверхности. Так, работа во вторичных электронах позволяет получить информацию о топографии, а в обратноотраженных визуализировать участки с различными \_ фазовыми составляющими поверхности.

#### Результатытрибологических испытаний и их анализ.

На рисунке 3 приведены результаты испытаний образцов тканевых композитов, которые демонстрируют влияние: 1) типа армирующей углеродной ткани;2) температуры отжига композита (см. табл. 1); 2) расположения слоев ткани относительно поверхности трения (см. рис. 16,в) на значения интенсивности изнашивания*I<sub>h</sub>*(рис.3а) и коэффициента трения µ (рис.3б).



*Рис.3– Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) исследуемых композитов 1,2,3,4 (таблица 1) при двух схемах испытаний,* 

Анализ данных показывает, что при испытании образцов по второй схеме (рис. 1в) (композит в форме диска, в котором слои ткани расположены параллельно поверхности трения) снижается интенсивность изнашивания по сравнению с первой схемой, причем для некоторых композитов (1 - ТП и 2 - ТВ) наблюдается двукратное снижение с  $I_h \approx 4$  мкм/км до $I_h \approx 2$  мкм/км. Наименее чувствительным к схеме испытаний оказался образец композита на основе вискозных волокон с высокой температурой отжига (4 - ТВГ). Коэффициенты трения композитов определялись на основе непрерывного замера и усреднения по пути тренияпри установившемся режиме трения (см. кривую 1 на рис. 2 б).Сравнительный анализ показывает, что композиты, испытанные по второй схеме, имеют меньшие значениякоэффициента трения ( $\mu = 0,06...0,08$ ) в сравнении с первой схемой испытания ( $\mu = 0,08...0,12$ ).Наибольший коэффициент трения при обеих схемах испытаний наблюдался для композитаХардкарб-ТП, изготовленного на основе ПАН волокна с температурой карбонизации менее 1000 С (см.таблицу 1).

В целом на основе проведенных испытаний можно сделать вывод, что углеродные композиты на основе вискозных волокон демонстрируют меньшие значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по сравнению с композитами на основе ПАН волокон.Причем данное наблюдение характерно для обеих схем трения и обоихрежимов термообработки композита.

Характер разрушения тканевых композитов при перпендикулярном расположении слоев ткани к поверхности трения (первая схема испытаний) методами оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии.

На рис.4 представлены оптические изображения поверхности отмытых от пленки продуктов износауглеродных композитовХардкарб-ТПГ (3) и Хардкарб-ТВГ (4) (подвергнутых высокотемпературному обжигу при температуре более 2000 °C, см. таблицу 1) с проведенными секущими линиями и их профилями после трибологических испытаний по первой схеме.Поверхность материалов, отожжённых при низкой температуре (менее 1000 °C), имеет схожую морфологию.



Рисунок 4. Трёхмерный профиль поверхности исследуемых образцов (a) 3 - ТПГ и (б) 4 - ТВГ с проведенными секущими линиями.

Поверхность композитов (рис. 4), испытанных по первой схеме (слои ткани перпендикулярны поверхности трения)состоит из перемежающихся полос (являющихся сечениями отдельных нитей ткани), в которых волокна расположены перпендикулярно и

параллельно поверхности трения. При этом средняя высота полос мало различается в зависимости от угла залегания волокон, а в межслоевой области имеются глубокие впадины. Данный факт свидетельствует, что при трении по этой схеме происходит значительное разрушение материала вблизи границы слоев ткани.

Для более детального изучения топографии поверхности на микроуровне были проведены электронно-микроскопические исследования образцов со сформировавшейся на ней пленкой вторичных структур (ВС). На рисунке 5 приведены СЭМ-изображения поверхностей трения композитов после трибологических испытаний по первой схеме.



Рисунок 5. СЭМ – изображения поверхности углеродных композитов после трибологических испытаний по первой схеме: (а-г) с пленкой ВС; (д-з) с удаленной пленкой ВС, где образцы 1 – ТП(а, д); 2 – ТВ(б, е); 3– ТПГ (в, ж); 4 – ТВГ (г, з).

При данной схеме испытаний волокна располагаются как параллельно, так и перпендикулярно поверхности. Анализ рисунков 5 а-г показал, что на поверхности трения образцов происходит формирование углеродной пленки (третьего тела) из продуктов износа композита. Торцы волокон, перпендикулярных к поверхности трения, могут обламываться [22], что вызывает дополнительный износ за счёт разрушения поверхности. Такжевозвышающиеся над поверхностью трения обломки волокон увеличивают шероховатость поверхностипо сравнению с участками, где волокна параллельны поверхности, что, в свою очередь, препятствует образованию равномерной пленки продуктов износа на всей контактной поверхности композита.

Для изучения структуры торцевой области волокон образцы были очищены от пленки. На рис. 5 д-зпоказано, что торцевая поверхность волокон имеет различный характер у волокон разного вида: торец ПАН волокна имеет неоднородный шероховатый вид, а торец вискозного волокна более однородный и гладкий (трибологические характеристики образцов на основе вискозы с гладкой торцевой поверхностью волокон имеют лучшие значениясм. рис. 3).Отсюда можно сделать вывод, что углеродное ПАН волокно характеризуется большей хрупкостью и при трении частично разрушается с отщеплением фрагментовбольшего размера, чем волокно на основе вискозы. Характер разрушения тканевых композитов при параллельном расположении слоев ткани к поверхности трения (вторая схема испытаний) методами оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии.

На рис. 6 приведеныоптические изображения поверхности отмытых от пленки ВС углеродных композитов с проведенными секущими линиями и их профилями после трибологических испытаний по второй схеме. Стоит заметить, что, как и при первой схеме, поверхность материалов, сформированных из волокон, отожжённых при низкой температуре,имеет схожий характер, поэтому их изображения на рисунке не представлены.



Рисунок 6. Оптическое изображение поверхности исследуемых образцов (a) 3 - ТПГ и (б) 4 - ТВГ с проведенными секущими линиями.

Из рисунка 6 видно, что из-за особенности саржевого плетения, характерного для композита на основе ПАН волокна (рис. 6а),его поверхность имеет более развитую морфологию в местах переплетения отдельных нитей, по сравнению с композитом на основе вискозы. При этом практически все волокна расположены под малыми углами к поверхности трения.Материал на основе вискозных волокон (рис. 6б) демонстрирует достаточно равномернуютопографию поверхности.Вследствие особенностей полотняного переплетения ткани (см. рис. 6 б) на поверхноститрения присутствуют участки, как с параллельным залеганием волокон, так и с залеганием волокон под углом к поверхности <del>трения.</del>При этом, как было указано выше, это не вызывает заметного роста износа, так как вискозные волокна в этом случае образуют ровные срезы с малой шероховатостью поверхности.

На рисунке 7 приведены СЭМ-изображения поверхностей трения образцов композитов после трибологических испытаний по второй схеме.



Рисунок 7. СЭМ – изображения поверхности углеродных композитов с пленкой ВС после трибологических испытаний по второй схеме, где 1 – ТП (а); 2 – ТВ (б); 3 – ТПГ (в); 4 – ТВГ (г).

Из рисунка 7 видно, чтов зоне трения также формируется пленка ВС, которая локально покрывает поверхность, однако характер покрытия отличен от первой схемы (см. рис. 5).В частности, после испытаний по второй схемепленка покрывает большую часть поверхности (рис. 7).Большая площадь и плотность плёнки ВС способствует лучшему сглаживанию поверхности (закрывая выступы иливпадины в межслоевой области) и уменьшению коэффициента трения и износа [21]. Данный факт может быть объяснен тем, что при второй схеме испытаний волокна в образцах расположены преимущественно параллельно к поверхности, поэтому трение происходит в основном вдоль волокон и формирование пленки ВС происходит более равномерно. Важно отметить, что, как и при первой схеме испытаний, лучшие трибологические характеристики демонстрируют образцы на основе вискозы с формировавшейся на поверхностиболее плотной и равномерной пленкой ВС.

Следует отметить, что описанные феномены характерны именно для композитов с углеродной матрицей, для которых характерно значительное разрушение на границах нитей и слоёв ткани. Например, для композитов с аналогичными армирующими тканями и полимерной матрицей (в которых отсутствует заметное разрушение на границах структурных элементов при трении) большую износостойкость показывает первая схема трения [17].

#### Заключение.

В работе проведены сравнительные трибологические испытания четырех видов композитов на основе углеродной ткани и углеродной матрицы, полученной методом осаждения пиролитического углерода, в условиях их фрикционного взаимодействия с поверхностью жесткого керамического контртела в диапазоне температур 80...100 °C. Слои ткани в композите были расположены как параллельно, так перпендикулярно поверхности трения.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

• Конфигурация трения с параллельным расположением слоёв ткани (вторая схема испытаний) показывает лучшие трибологические свойства (меньшие значения коэффициента трения иинтенсивности изнашивания) материала.

• Материалы на основе вискозного волокна при обеих схемах испытаний имеют более низкие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания, чем материалы на основе ПАН волокна.

• Термообработка при высокой (>2000 °C) температуре незначительно снижает коэффициент трения, однако может вызывать увеличение износа при некоторых схемах контакта (поэтому её целесообразность для антифрикционных материалов неоднозначна).

• В процессе трения на контактной поверхности <del>трения</del> формируется пленка продуктов износа. Сформированное таким образом третье тело способствует уменьшению коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Однако для достижения выраженного эффектаоно должно быть достаточно плотным и однородным, чтобы покрывать выступы и впадины поверхности композита.

Исследованные материалы показывают низкий коэффициент трения и высокую износостойкость в паре с керамическим контртелом, характеризующимся высокой твёрдостью поверхности. Это делает их перспективными материалами для работы в подшипниках скольжения, работающих без смазки или с ограниченной смазкой. Высокие трибологические характеристики материалов сохраняются в ограниченном диапазоне температур, не допускающем осушения углеродной плёнки на поверхности композита (однако этот диапазон может бытьзначительно расширен в случае трения в жидкой среде [14]). Учитывая значительное разрушение материалов на границе нитей и слоёв ткани при трении, перспективным путём увеличения износостойкости рассматриваемых материалов является увеличение плотности упаковки слоёв ткани и отдельных нитей, а также увеличения таких материалов позволяет варьировать направление залегания слоёв ткани относительно поверхности трения для различных конфигураций контакта (плоская, цилиндрическая, коническая и т.д.), добиваясь оптимальной производительности материала для заданного трибологического сопряжения.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «ГМК», г. Таганрог, за предоставленные образцы композитных материалов. Авторы выражают благодарность ИФФТ РАН им. Ю.А. Осипьяна за предоставленные образцы высокопрочной керамики.

#### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-19-00548).

## Литература.

- Sarower Kabir, Chowdhury Ahmed Shahed, Md. Sazzad Hossain Ador, Imtiaz Ahmed Choudhury, Faiz Ahmad. Review of the developments in composite materials over the last 15 years // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2023
- Leonardo I. Farfan-Cabrera, Monica Tapia-Gaspar, José Pérez-González. Tribology of Polymer Matrix Composites Within the Automotive Industry. // Encyclopedia of Materials: Composites. 2021. Vol. 1, P. 970-982.
- Beibei Wang, Qiangang Fu, Hejun Li, Lehua Qi, Yue Liu/ Mechanisms of simultaneously enhanced mechanical and tribological properties of carbon fabrics/phenolic resin composites reinforced with graphite nanoplatelets // Journal of Alloys and Compounds. 2021, Volume 854, 157176.
- 4. Duyoung Choi, Ji-Yeon Shim, Sungwoong Choi, Sangmin Park, Harok Jeong, Min-Su Kim, Jungpil Kim, Junghoon Yang. Formation of effective carbon composite structure

for improving electrochemical performances of rhombohedral Li3V2(PO4)3 as both cathode and anode materials for lithium ion batteries//Journal of Electroanalytical Chemistry. 2023, Vol. 928, 117076

- Sarthak Shah, Ashok Mache, Shardul Joshi. Structural and modal analysis of gas insulated switchgear structure made up of glass-epoxy and carbon-epoxy composite materials for seismic application. // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 78, P. 501-507.
- Nikolay Averin , Alexandr Asaev, Mikhail Kliuev, Igor Murog , Nikolay Tatarnikov. Investigation of the EDM Process of Transport Machine Parts from Carbon-Carbon Composites. // Transportation Research Procedia. Vol. 68, 2023, P. 264-270
- 7. Гуняев, Г.М. Углерод-углеродные композиционные материалы/ Г.М Гуняев, М.Я. Гофин // Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск 2013. С. 62-90.
- 8. Е.К. Салатов, А.М. Чурсина. Перспективы применения углеволоконных композитных материалов в промышленном и гражданском строительстве. // Вестник МИТУ-МАСИ № 4 / 2018. С. 29-35
- József Karger-Kocsis, Haroon Mahmood, Alessandro Pegoretti. All-carbon multi-scale and hierarchical fibers and related structural composites: A review. // Composites Science and Technology. Vol. 186, 2020, 107932
- 10. Хтет Вин Аунг, Шешин Е.П., Вэй Зин Хлаинг. Основные свойства углеродных волокон на основе полиакрилонитрила (ПАН). // Электроника и микроэлектроника CBЧ. Том: 1 Год: 2019 С: 265-267.
- 11. B.V. Kaludjerović, Lj.M. Kljajević, Z.V. Laušević . The effect of partially carbonized fibers on the mechanical properties of carbon/carbon composites // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212, P. 157-163.
- 12. Zhufeng Hu, Yuchen Tong , Min Wang , Junbo Xu , Chao Yang. Rapid and low-cost carbon/carbon composites by using graphite slurry impregnated prepregs // Journal of the European Ceramic Society. 2023. Vol. 43, P. 4363-4373.
- Cheng, H.; Xue, N.J.; Hou, W.Q. The application and development of carbon/carbon composites in aircraft and high-speed train braking systems // Carbon. 2020. Vol. 184, P. 30–33.
- 14. Lu F, Lu L, Liu J, Pang X, Song C. Tribological Properties and Wear Mechanism of C/C Composite Applied in Finger Seal // Machines. 2023. Vol. 11(2). P. 176. <u>https://doi.org/10.3390/machines11020176</u>
- 15. Hua Su, Chuding Zhang, Shan Sun. Research on the wear model of carbon/carbon composite finger seal // Wear. 2021. Vol. 476. P. 203682.
- Mezrin A.M., Morozov A.V., Sachek B.Y. et al. Tribological characteristics of epoxy carbon-fiber-reinforced plastics modified by solution of polytetrafluorethylene telomers // J. Frict. Wear. 2013. Vol. 34. P. 368–373.
- 17. Морозов А.В., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Оценка триботехнических свойств модифицированных эпоксидных углепластиков в проточной воде // Вопросы материаловедения. 2012. Т. 72. С. 58-65.
- 18. Шикунов С. Л., Курлов В. Н. Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 12. – С. 1871-1878. – DOI 10.21883/JTF.2017.12.45212.2291

- 19. Blanco C., Bermejo J., Marsh H., Menendez R. Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance // Wear. 1997. Vol. 213. P. 1-12
- Gomes J., Silva O., Silva C., Pardini L., Silva R. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon–carbon composites // Wear. 2001. Vol. 249. No. 3-4. P. 240–245
- Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., Bukovskiy, P.O. Influence of the Surface Film (Third Body) on the Friction and Wear Process of Carbon-Fiber Composites Journal of Surface Investigation, 2022, 16(3), pp. 397–401
- 22. A.G. Shpenev, T.I. Muravyeva, I.V. Shkalei, V.V. Kulakov, A.K. Golubkov. The study of the surface fracture during wear of C/C fiber composites by SPM and SEM // Procedia Structural Integrity, 2020, Vol. 28, P. 1702-1708