

Д.Д. Дворянцев, А.В. Анисимов, А.С. Саргсян, И.В. Лишевич, А.С. Савелов,
Е.А. Шарко

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: mail@crism.ru

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ГИДРОТУРБИН

Аннотация

Работа посвящена исследованию физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного полимерного композиционного материала (АПКМ) на основе низкомолекулярной углеродной ткани и модифицированной термореактивной матрицы.

В рамках лабораторных триботехнических испытаний исследованы зависимости коэффициента трения и величина линейного изнашивания от контактного давления образцов модифицированного углепластика с контртелами из стали 20Х13 в условиях трения со смазкой пресной водой.

Представлены результаты стендовых испытаний опытных образцов подшипников скольжения модифицированного углепластика, проведенных в центре исследований и испытаний завода ЛМЗ, АО «Силовые машины» на стенде испытания втулок направляющего аппарата «СИБНА», имитирующего условия работы механизма поворота лопаток гидротурбин.

Ключевые слова: Антифрикционный полимерный композиционный материал, антифрикционный углепластик, трение, износ, модифицированное эпоксидное связующее.

Введение

Антифрикционные углепластики уже долгие годы применяются в узлах трения машин и механизмов и пришли на замену металлам – баббиту и бронзе, неармированным полимерам, таким как капролон, маслянит и графитопластам. Их преимущества заключаются в многокомпонентности системы, сочетающей в себе управляемый комплекс прочности и антифрикционных свойств. Матрица одновременно служит твердой смазкой и распределяет напряжения по всей площади композита, а армирующий материал задает основную прочность материала и также регулирует смазочную способность [1-4]

Проблема, на решение которой направлена работа – уже достигающие своего предела энергоэффективности углепластики УГЭТ и ФУТ. Несмотря на их низкий коэффициент трения и величину линейного изнашивания – они не работоспособны в режиме сухого трения, а также имеют повышенный износ при расцентровке вала контртела (рисунок 1) и реверсивном движении. Такой эффект ведет к уменьшению эффективной площади контакта трущихся тел (рисунок 2), увеличению удельной нагрузки, биению и вибрации, что в свою очередь приводит к повышенному износу подшипника, а в некоторых случаях к разрушению и отрыву композиционного материала, особенно от кромок втулок, где возникают большие напряжения. [1-5]

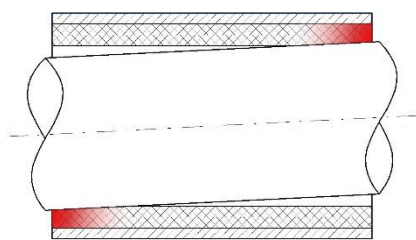


Рисунок 1 – Напряжения, возникающие в материале при перекосе вала контртела

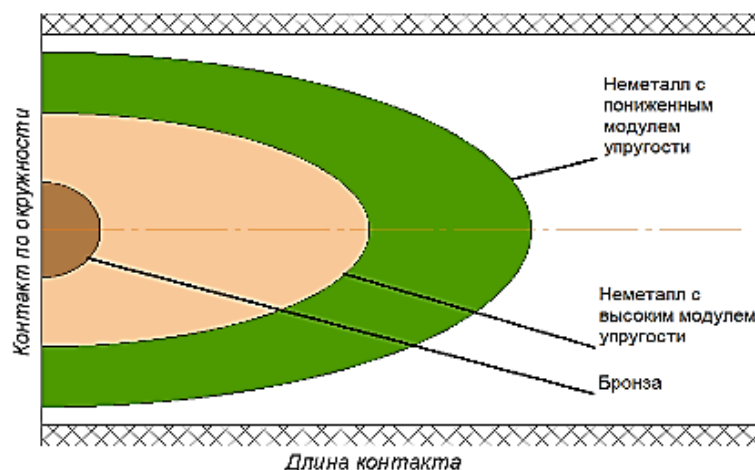


Рисунок 2 – Эффективная площадь контакта контртела

Примером таких узлов являются направляющие аппараты гидротурбин, верхняя часть которых не находится в воде и работает без смазки. Углепластик УГЭТ при таких условиях эксплуатации не работоспособен и быстро начинает разрушаться на кромках втулок скольжения (рисунок 3).

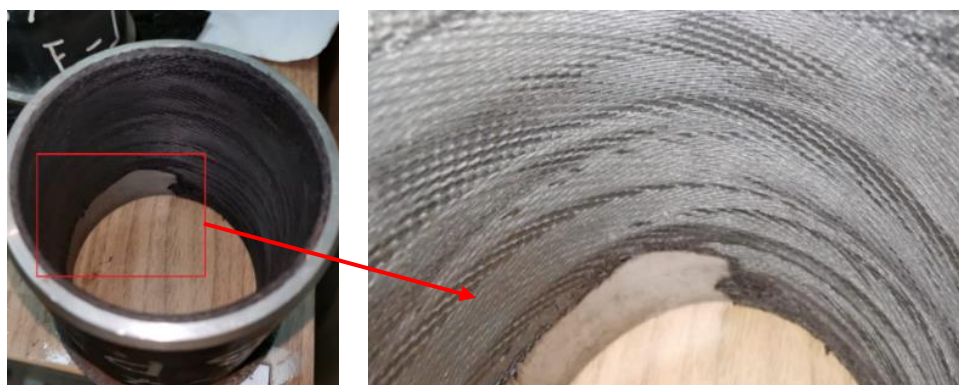


Рисунок 3 – Разрушение углепластика УГЭТ на кромках втулок

Целью представленного исследования является повышение эксплуатационных свойств подшипников скольжения из углепластика путем химической модификации полифункциональной эпоксидной матрицы, применяемой при изготовлении АПКМ марки УГЭТ. Материал на основе модифицированной матрицы должен обладать высокими энергоэффективными свойствами: повышенной величиной деформации и меньшим модулем упругости с сохранением показателей статической прочности и теплостойкости, что позволит снизить кромочные напряжения, уменьшить величину коэффициента трения и интенсивность линейного изнашивания, а также увеличить пятно контакта с контртелом. Кроме того, за счет модификации матрицы материал должен обладать эффективным пластичным механизмом трения для работы в режиме сухого трения с металлическими контртелами.

В работе будут представлены результаты:

1) Исследований физико-механических и триботехнических свойств антифрикционных углепластиков на основе модифицированной термореактивной матрицы. При определении триботехнических свойств применяются контртела на основе стали 20Х13.

2) Стендовые испытания подшипников скольжения.

Материалы и методы исследования

Для выбора термореактивной матрицы, обладающей оптимальным балансом физико-механических и триботехнических свойств, в исследовании был рассмотрен ряд отвержденных эпоксидных композиций на основе эпоксидной хлорсодержащей смолы, пластификаторов, а также модифицированного полиамидо-полиаминного отвердителя. Композиция на основе связующего ЭТ-2 в свою очередь является образцом сравнения и применяется при производстве АПКМ марки УГЭТ [2, 5-9]

Для проведения лабораторных физико-механических и триботехнических испытаний была изготовлена партия препрега методом пропитки из раствора на линии вертикальной пропитки УПСТ-1000М. Содержание растворителя в пропиточном связующем варьировалось в области 35 – 55 % масс.

Далее методом горячего прессования на гидравлическом прессе РНМ-250 были изготовлены лабораторные плиты с размерами 250×200×10 мм и 250×200×5 мм, а также плиты из антифрикционного углепластика УГЭТ для сравнения свойств. Режимы получения модифицированного АПКМ:

- 1) двухступенчатый режим с нагревом от 85 °С до 120 °С;
- 2) трехступенчатый режим с нагревом от 85 °С до 180 °С.

Необходимость второго режима обусловлена дополнительным термическим отжигом для сравнения физико-механических и триботехнических свойств. [1, 10, 11].

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;
- Ударная вязкость по Шарпи (удар плашмя) ГОСТ 4647.

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) [12, 13].

Для подтверждения работоспособности исследуемого антифрикционного углепластика были проведены стендовые испытания подшипников скольжения в Центре исследования и испытаний завода ЛМЗ, АО «Силовые машины» на стенде испытания втулок направляющего аппарата «СИБНА» (рисунок 4), имитирующего условия работы механизма поворота лопаток гидротурбин.

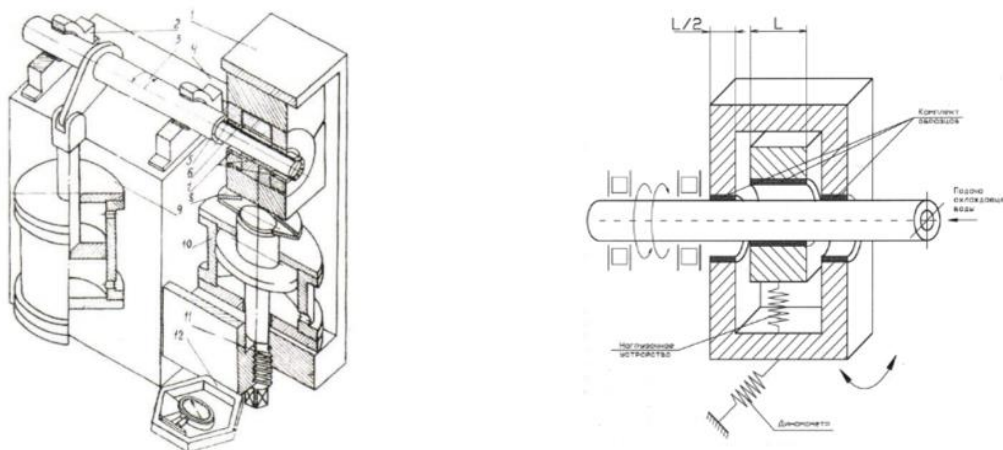


Рисунок 4 – Схема испытательного стенда втулок направляющего аппарата

Целью испытаний является определение основных характеристик: коэффициента трения - f , величины линейного изнашивания - ε_L , массы продуктов износа - m_o , весовой интенсивности изнашивания - k_w , истираемости - γ в условиях работы втулок механизма поворота лопаток направляющего аппарата гидротурбин. Путь трения составляет 5500 м. Для испытаний были изготовлены опытные образцы втулок (рисунок 5), переработанные по режиму 1. Удельное давление при испытаниях составляет 25 и 50 МПа. Вид движения – реверсивное в режиме перекладок. Трение осуществляется без смазки со скоростью 0,004 м/с.

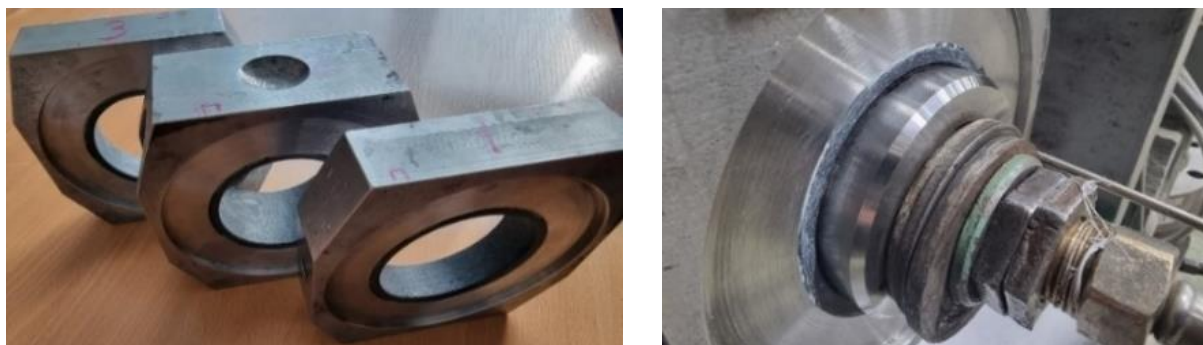


Рисунок 5 – Комплект образцов испытываемых втулок скольжения

Обсуждение результатов

Исследование физико-механических свойств лабораторных образцов модифицированных углепластиков

Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты физико-механических испытаний лабораторных образцов

Углепластик	УГЭТ	УГЭТ-4 (режим № 1)	УГЭТ-4 (режим № 2)
Физико-механические свойства			
Плотность, кг/м ³	1397	1369	1368
Предел прочности при сжатии, МПа	320	408	368
Модуль упругости при сжатии, ГПа	4,27	3,60	3,52
Макс. Деформация при сжатии, %	6,51	9,04	8,51
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	396	466	431
Модуль упругости при изгибе, ГПа	18,48	19,44	18,18
Макс. Деформация при изгибе, %	2,77	3,89	2,89
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	37	39,2	33
Макс сила при межслойном сдвиге, кН	5,29	5,63	4,81
Макс. Деформация при межслойном сдвиге, %	3,04	4,13	3,45
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	58	129	141

Во всех видах разрушающих испытаний образец АПКМ (далее – углепластик марки УГЭТ-4), переработанный по режиму № 1, имеет превосходящие свойства в сравнении с аналогом (режим № 2) и углепластиком УГЭТ (рисунок 6).

При сжатии образцов, наряду с повышением предела прочности, максимальная деформация УГЭТ-4 (режим № 1) составляет 9,04 % в сравнении с 6,51 % у УГЭТ. Модуль упругости при этом снижается с 4,27 ГПа до 3,60 ГПа. Также образцы модифицированного углепластика имеют высокий показатель изгибающего напряжения при разрушении – 466 МПа, наряду с 396 МПа с эталоном, но максимальная деформация при этом остается неизменной. Модуль упругости, наоборот, показывает увеличение с 18,48 ГПа до 19,44 ГПа. Прочность при

межслойном сдвиге модифицированного углепластика, переработанного по режиму № 1, практически не отличается от УГЭТ, а при режиме № 2, наоборот, снижается, что говорит о большей хрупкости матрицы после термического отжига.

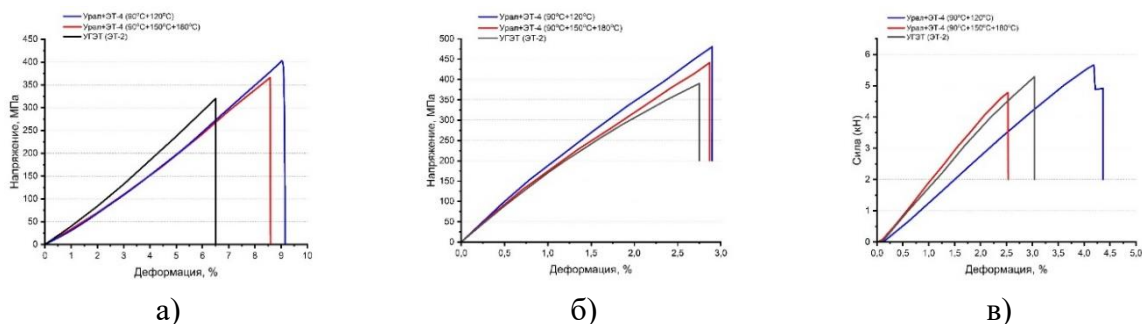


Рисунок 6 – графики механических испытаний: а) деформация – напряжение при сжатии; б) деформация – напряжение при изгибе; в) деформация – сила при межслойном сдвиге

В связи с наличием эластичных фрагментов в сшитой структуре матрицы в ПКМ происходит поглощение энергии разрушения, что приводит к быстрому и полному протеканию релаксационных процессов [7-9]. Таким образом ударная вязкость по Шарпи (удар плашмя) образцов модифицированного углепластика УГЭТ-4, переработанного по двум режимам, в 2 раза выше, чем у УГЭТ.

Исследование физико-механических свойств лабораторных образцов модифицированных углепластиков

Из представленных результатов исследования трибосвойств углепластиков в паре с контртелом из стали 20Х13 можно наблюдать, что коэффициент трения (рисунок 7, а) во всем диапазоне нагрузок с образцами УГЭТ-4, переработанными по режиму № 1, имеет меньшее значение, чем у УГЭТ, и составляет $f_c = 0,09$ при установившемся режиме работы. Образцы, переработанные по режиму № 2, занимают промежуточное значение. В области контактных давлений от 5 до 20 МПа наблюдается приработка образцов, после чего материал выходит на рабочий режим скольжения.

Интенсивность изнашивания образцов модифицированных углепластиков (рисунок 7, б) также ниже во всем диапазоне нагрузок в сравнении с УГЭТ. Наименьшей величиной линейного изнашивания I_h обладает образец, переработанный по режиму № 2, ввиду своей большей жесткости из-за высокотемпературного отжига

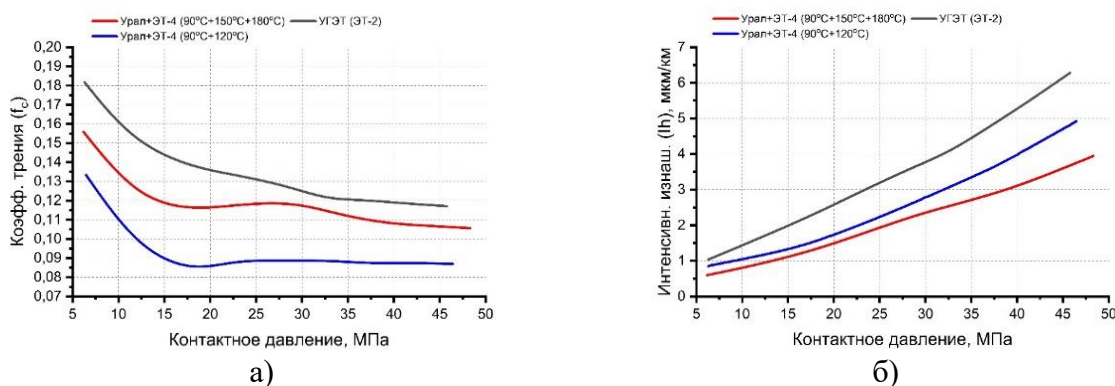


Рисунок 7 – Графики зависимости триботехнических испытаний со сталью 20Х13: а) Интенсивность изнашивания I_h от контактного давления P ; б) коэффициента трения f_c от давления P .

Стендовые испытания подшипников скольжения

Диаграмма зависимости коэффициента трения от пути трения УГЭТ и УГЭТ-4 изображена на рисунок 8.

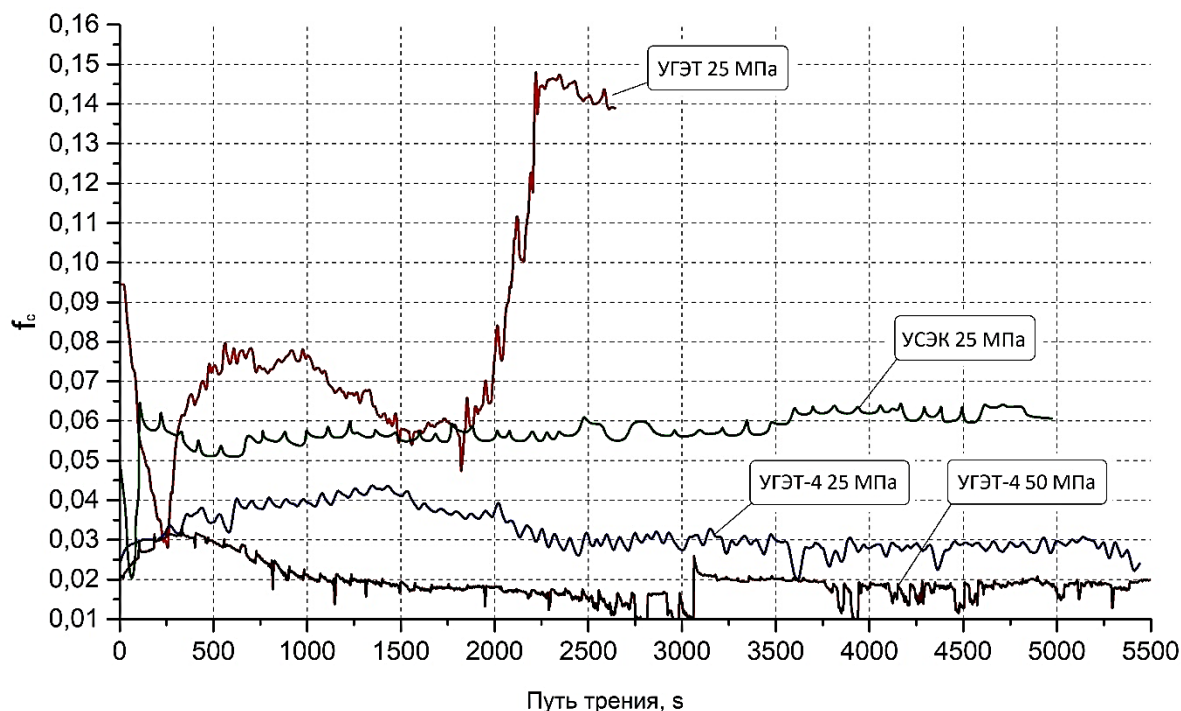


Рисунок 8 – Диаграмма зависимости коэффициента трения от пути трения для УГЭТ и модифицированного УГЭТ-4

В течение испытаний при удельном давлении 25 МПа на диаграмме наблюдается четко выраженный период приработки испытуемых втулок УГЭТ и УГЭТ-4, действующий до 500 м пути трения, после чего материалы вышли на рабочие режимы, сохраняя коэффициент трения $f = 0,03$ для УГЭТ-4 и 0,075 для УГЭТ. Температура вала при этом не повышалась больше 30 °С. Скачкообразное представление данных является следствием периодичности работы стенда. Видно, что после испытаний за путь трения 2000 м у модифицированного АПКМ марки УГЭТ-4 коэффициент снижается до $f = 0,03$. При этом повышенный линейный износ втулок не наблюдался. При испытаниях АПКМ марки УГЭТ обратная картина – коэффициент трения начал резко возрастать за путь трения 1750 м до $f = 0,145$. При этом наблюдался неравномерный износ, скачкообразное изменение кривой, после чего (на 2750 м пути трения) испытание было прекращено.

При давлении 50 МПа УГЭТ-4 прирабатывается за путь трения 500 м и далее коэффициент трения снижается до $f = 0,2$, после чего остается неизменным до конца испытаний.

Оценка износа после стендовых испытаний

После проведения стендовых испытаний при удельных давлениях 25 и 50 МПа была проведена оценка рабочей поверхности втулок из ПКМ УГЭТ-4 и зон трения контртел.

Как можно видеть на рисунке 9 на поверхности контртела отсутствуют глубокие царапины и трещины. Лишь на краях контакта с опорными втулками (№ 1 и № 3) присутствуют незначительные задиры, образующиеся вследствие качения вала в обоймах в процессе испытаний. На всех 3 втулках наблюдается глянцевая приработанная поверхность.

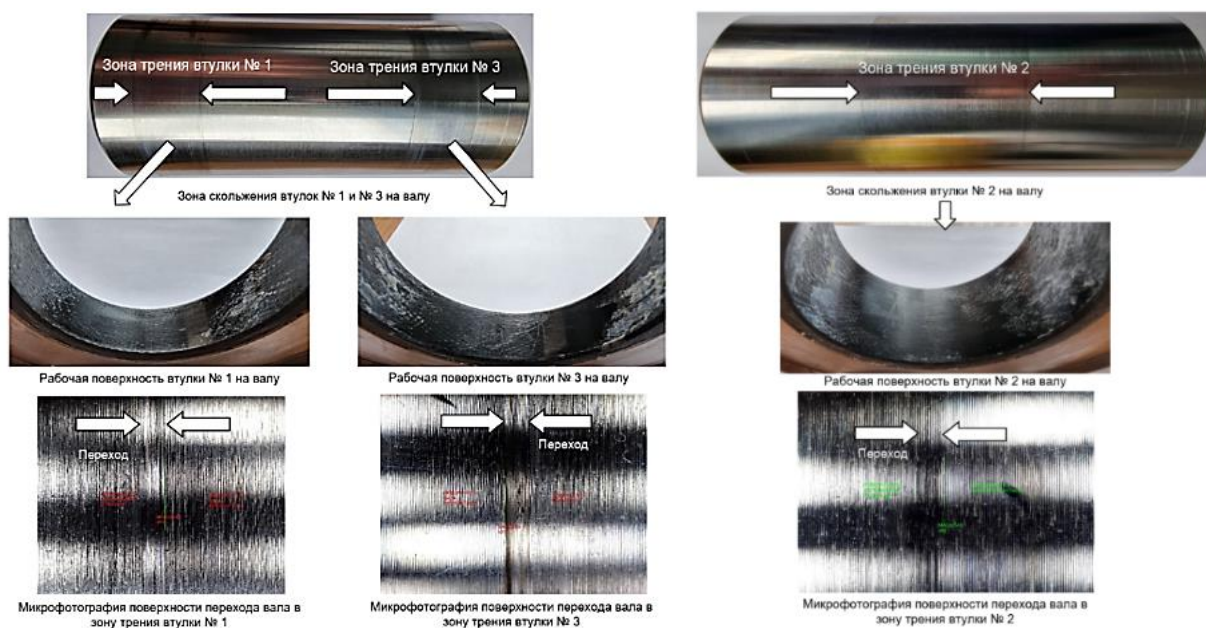


Рисунок 9 – Фотографии поверхностей трения испытуемых втулок и зон контакта с контртелом

Заключение

В ходе работы установлено, что химическая модификация эпоксидного олигомера в части добавления пластификатора и замены отвердителя на низкомолекулярный агент позволяет повысить деформацию и уменьшить модуль упругости антифрикционного углепластика, что подтверждается следующими результатами:

1. Предельная деформация при сжатии образцов, переработанных по режиму от 90°C до 120 °C увеличилась с 6,51% до 9,04%. Модуль упругости при этом снизился с 4,27 до 3,60 ГПа в сравнении с углепластиком УГЭТ. Ударная вязкость модифицированного АПКМ увеличилась в 2 раза – 129 кДж, в сравнении с 49 кДж у УГЭТ.

2. В результате триботехнических испытаний при контактном давлении 30 МПа установлено, что коэффициент трения и величина линейного износа образцов, переработанных по режиму №1, имеют как более низкую интенсивность изнашивания ($I_h = 2,9$ мкм/км), так и коэффициент трения ($f_c = 0,09$) в сравнении с УГЭТ ($I_h = 3,5$ мкм/км, $f_c = 0,12$)

3. В ходе стендовых испытаний при контактных давлениях 25 МПа установлено, что коэффициент трения АПКМ марки УГЭТ-4 за путь трения 5500 м имеет среднее значение коэффициента трения $f_c = 0,03$. Коэффициент трения испытываемого в аналогичных условиях АПКМ марки УГЭТ при этом вырос до значения $f_c = 0,145$ за путь трения 2750 м. При контактном давлении 50 МПа коэффициент трения после приработки составляет $f = 0,2$.

Поверхности испытанных втулок УГЭТ-4 имеют глянцевую приработанную поверхность без трещин и выбоин. Поверхность контртела также не имеет повреждений, что говорит о работоспособности модифицированного АПКМ.

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. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Морозов Д. Л., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной термореактивной матрицы // Тезисы к докладу 20 конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (КМУС-2023) НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей». - 2023. С.1
 3. Николаев Г. И., Бахарева В. Е., Власов В. А., Лобынцева И. В., Анисимов А. В., Петрова Л. В., Сими́на В. Н. Применение антифрикционных углепластиков в подшипниках скольжения // Вопросы материаловедения. - 2006. - Т. 79, №5. С. 705-716.
 4. Крыжановский В. К. Производство изделий из полимерных материалов. / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. - СПб.: Профессия, 2004. - 464 с.
 5. Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения // Российский химический журнал. - 2009. - Т. 53, №4. - С. 4-18.
 6. Мустафа Л.М., Исмаилов М.Б., Ермаханова А.М., Санин А.Ф. Исследование влияния пластификаторов и термопластов на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор) // Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources). - 2019. – №4 (311). - С. 48-56. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.37>
 7. Кузнецов А. В., Петров В. В. Метод химической модификации эпоксидных композиций // Электронный журнал «Инженерный вестник Дона». - 2019. - № 6, С. 1-9.
 8. Мостовой А.С. Рецептура модификация эпоксидных смол с применением новых высокоэффективных пластификаторов. Modern high technologies. №7, 2015, - С 66-70.
 9. Мараховский К.М., Осипчик В.С. Модификация эпоксидного связующего с повышенными характеристиками для получения композиционных материалов. Успехи в химии и химической технологии. Том XXX. - 2016. - №10. - С. 56-58.
 10. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К. Е. перепелкин. - СПб.: Научные основы технологии, 2009. - С. 92.
 11. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. - СПб.: Профессия, 2020. - 574 с.
 12. Точильников Д.Г. Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров. // Вопросы материаловедения.-2002-№ 3(31). - С. 39-48.
 13. Гинзбург Б. М., Точильников Д. Г., Бахарева В. Е., Анисимов А. В., Киреенко О. Ф. Полимерные материалы для подшипников скольжения, смазываемых водой (Обзор) // Журнал прикладной химии. - 2006. - Т. 79, №5. - С. 705-716.
 14. Точильников Д.Г., Гинзбург Б.М. Технология триботехнических экспресс-испытаний антифрикционных полимеров // Вопр. Материаловедение., 2002, № 3 (31), с. 39-48.
 15. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения - 2011 - №1(65) - с.75-88.
- D. D. Dvoryantsev, A. V. Anisimov, , A. S. Sargsyan, I.V. Lishevich, A.S. Savelov, E.A. Sharko
- Research Center "Kurchatov Institute" - Central Research Institute of KM "Prometey," St. Petersburg, Russia, E-mail: mail@crism.ru

HIGH-STRENGTH ANTIFRICTION POLYMER COMPOSITE MATERIAL BASED ON MODIFIED THERMOSETTING MATRIX FOR HYDRAULIC TURBINE FRICTION ASSEMBLIES

Abstract

The work is devoted to the study of physical-mechanical and tribotechnical properties of antifriction polymer composite material (APCM) based on low-module carbon fabric and modified thermosetting matrix.

In the framework of laboratory tribotechnical tests, the dependence of the coefficient of friction and the value of linear wear on the contact pressure of samples of modified carbon fiber with counterbodies of 20Kh13 steel under conditions of friction with fresh water lubrication were studied.

The results of bench tests of test samples of modified carbon fiber plain bearings carried out at the research and testing center of the LMZ plant, Power Machines JSC at the test bench of the bushes of the «CIVNA» guide vanes simulating the operating conditions of the turbine blade rotation mechanism are presented.

Keywords: Antifriction polymer composite material, antifriction carbon fiber plastic, friction, wear, modified epoxy binder.