

УДК 621.891;621.893; 539.422.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА КОНТРТЕЛА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТКАНЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ

Щербакова¹ О.О., Буковский¹ П.О., Муравьева¹ Т.И., Шпенев¹ А.Г.,
Кривошеев² А.Ю., Каледин³ А.В., Шикун³ С.Л., Курлов³ В.Н.

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

Email shcherbakovaoo@mail.ru

Аннотация. В работе изучены процессы, происходящие на контактной поверхности при трении экспериментальных углерод-углеродных композитных материалов армированных углеродной тканью на основе полиакрилонитрильного (ПАН) и вязкого прекурсора. Трибологические испытания композитов проводили на трибометре по схеме контакта кольцо-диск.

В качестве контртел использовали два материала: закаленную сталь и керамику из карбида кремния. Установлено, что интенсивность изнашивания и коэффициент трения, при используемых в работе нагрузочно-скоростных режимах, главным образом зависят от выбора материала контртела. Термообработка (карбонизация или графитация) и материал препрега (ПАН или вискоза) также оказывают влияние, но уже в зависимости от выбранного контртела. Показано, что при испытаниях с керамическим контртелом трибологические характеристики (коэффициент трения и износостойкость) имеют лучшие значения по сравнению с трением в паре со стальным контртелом. Изучение поверхностей контртел и композитов до и после трибологических испытаний проводили методами сканирующей

электронной микроскопии с рентгеноспектральным анализом и оптической профилометрии. Показано, что в процессе трения на поверхности углеродных композитов, из продуктов износа формируется пленка вторичных структур, являющаяся определяющим фактором, влияющим на трибологические характеристики. После испытаний со стальным контртелом на поверхности композитов в составе пленки обнаружено значительное количество железа, что свидетельствует об износе контртела. Данный процесс негативно влияет на трибологические свойства композитов. В тоже время керамическое контртело практически не изнашивается, делая его более предпочтительным материалом для работы в узлах трения в паре с углеродным композитом.

Ключевые слова: Углерод-углеродный тканевый композит, препрег, углеродные волокна, полиакрилонитрил, вискоза, термообработка, коэффициент трения, износостойкость, трибология композитов, структура поверхности, пленка вторичных структур, сканирующая электронная микроскопия, оптическая профилометрия

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время композиционные материалы применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. При этом наиболее перспективными являются композиты, армированные углеродными волокнами (УВ) [1-6]. Разнообразие областей применения материалов на основе УВ обусловлено широким спектром их характеристик. УВ присущи экстремально высокие значения модуля упругости и прочности, химическая и термическая стойкость, низкий коэффициент линейного термического расширения, повышенные (по сравнению с другими волокнами) тепло- и электропроводность, специфические трибологические свойства (они могут быть использованы как во фрикционных [7-11], так и в антифрикционных [12, 13] узлах трения). Важно отметить, что на трибологические характеристики существенное влияние оказывает пленка

вторичных структур (ВС), формирующаяся в процессе трения из продуктов износа углеродного композита и способствующая самосмазыванию контактных поверхностей[14].

Углеродные композиты активно используются при разработке тормозных систем в виду их низкой плотности, отличных теплофизических, механических и трибологических характеристик [15]. Трибологические характеристики таких композитов зависят от типов материалов, параметров торможения (давления, скорости и т.д.), окружающей среды (температуры, влажности и т.д.) и технологии их изготовления (обработки поверхности композитов) [16]. Структурные составляющие композитов, такие как матрица, волокна и их расположение относительно поверхности трения также оказывают важное влияние на трибологические характеристики [17]. Использование методов микроскопии позволяет детально изучить структуру и установить связь между изменениями, происходящими на поверхности материала в процессе трения и его свойствами. В работе [18] методами сканирующей электронной (СЭМ) и оптической микроскопии (ОМ) были изучены поверхности трения углеродных композитов с различными пироуглеродными текстурами. Полученные результаты показали, что образующаяся на поверхности при различных условиях торможения пленка ВС оказывает положительное влияние на трибологические характеристики (коэффициент трения и износостойкость). Авторами [19] с использованием СЭМ, ОМ и трехмерного цифрового видеомикроскопа также было обнаружено образование третьего тела (пленки ВС) на поверхности трения. Было установлено, что при увеличении контактного давления происходит постепенный рост пленки. Данный процесс приводит к формированию сплошной пленки, которая способствует уменьшению коэффициента трения и сглаживанию процесса торможения.

Уменьшение коэффициента трения и износа особенно важно при разработке антифрикционных углеродных композитов. В работе [20] показано перспективное использование углеродных композитов в качестве пальцевого

уплотнителя в полости подшипника в системе вторичного потока авиационного двигателя. Преимущество данного материала (по сравнению с традиционно используемыми [21, 22]) заключается в уменьшении износа между уплотнением и валом благодаря самосмазывающим свойствам углеродных композитов. Трибологические характеристики антифрикционных композитов существенно зависят от материала поверхности, с которым они контактируют. После трибологических испытаний важно исследовать процесс массопереноса материала контртела на поверхность композитов, так как данный факт будет свидетельствовать о его изнашивании. При износе контртела в контактной зоне образуются абразивные частицы, которые способствуют ухудшению трибологических характеристик композитов. Таким образом важно подбирать оптимальный вариант контртела, обладающего минимальным износом.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния материала контробразца в паре кольцо (контртело) – диск (образец из углеродного композита) на формирование в зоне контакта пленки вторичных структур, положительно влияющей на антифрикционные свойства композита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемые материалы

Для исследований были выбраны четыре антифрикционных углерод-углеродных тканевых композита, изготовленных ООО «ГМК», г. Таганрог. Материалы изготавливали методом прессования, пропитанного полимером тканевого препрепрега с последующей термической обработкой (таблица 1). Полученные таким образом заготовки уплотнялись методом осаждения пироуглерода из газовой фазы и проходили финальный обжиг при различной температуре ($<1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – карбонизация и $>2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ – частичная

графитация). Образцы композитов были выполнены в виде дисков диаметром 40 мм и высотой 30 мм.

Таблица 1. Виды исследуемых композитов и особенности их изготовления.

Номер образца	Название композита	Температура отжига	Материал препрега
1	Хардкарб-ТП	Карбонизация $T < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	ПАН
2	Хардкарб-ТВ		Вискоза
3	Хардкарб-ТПГ	Графитация $T > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$	ПАН
4	Хардкарб-ТВГ		Вискоза

В качестве контртела использовались два типа материала: закаленная сталь ШХ15 ($\text{HRC} \approx 61,5 \pm 1,5$) и керамика из карбида кремния ($\text{HRC} \approx 92,5 \pm 1,5$). Образцы керамики были получены методом жидкофазного силицирования пористых углеродных заготовок по методике разработанной в ИФТТ РАН [23]. Углеродные порошки различных фракций смешиваются с мелкодисперсным порошком полимерного связующего пульвербакелит. Полученная смесь подвергается прессованию, термофиксации, а затем пиролизу при температуре 900°C . В результате получается углеродная заготовка, обладающая сквозной пористостью и достаточной механической прочностью для проведения её механической обработки. С помощью механической обработки углеродной заготовке придаётся форма близкая к форме конечного образца, после чего производится жидкофазное силицирование в вакууме при температуре около 1500°C .

Перед началом проведения экспериментов контртела были отполированы на шлифовально-полировальном комплексе “TegraPol-25” до шероховатости $Sa \approx 30\text{ нм}$. Контртела были выполнены в виде колец и имели следующие размеры: высота 15 мм, 20 и 28 мм внутренний и внешний диаметры, соответственно.

Методика трибологических испытаний

Исследование трибологических характеристик (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) углеродных композитов проводили на лабораторном трибометре UMT-2 (Cetr, USA) по схеме полного контакта (коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз} = 1$) кольцо-диск (рисунок 1) при фиксированном контактном давлении $P = 0,5$ МПа ($F = 150$ Н) и постоянной скорости скольжения $V = 0,5$ м/с ($n = 795$ об/мин). В процессе испытания пары трения, вследствие фрикционного разогрева, происходило повышение температуры, достигающее значений $T = 80...100^{\circ}\text{C}$. Измерение температуры неподвижного образца осуществляли бесконтактным способом с использованием пирометра (погрешность $\pm 5\%$).

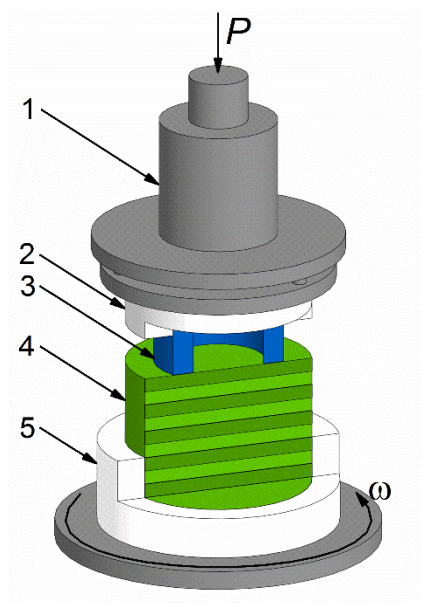


Рисунок 1. Принципиальная схема трибологических испытаний, где 1 – самоустанавливающийся держатель, 2 – оснастка для крепления контртела, 3 – контртело, 4 – углеродный диск, 5 – оснастка для крепления диска.

Трибометр позволяет вести непрерывную запись значений коэффициента трения μ и линейного сближения образцов h с шагом по времени 0,005 секунд. На рисунке 2 представлены типичные графики зависимости коэффициента трения (кривая 1) и сближения (кривая 2) образцов от времени. Износ композитов измерялся до и после эксперимента при помощи встроенного в трибометр датчика линейного сближения образцов. Для достижения достоверных результатов проводили трехкратное повторение эксперимента, затем по методу среднеквадратичного отклонения вычисляли средние значения и доверительный интервал на участках, соответствующих установившемуся режиму трения (рис. 2 б). Испытание образцов осуществляли по заданной оператором программе в автоматическом режиме.

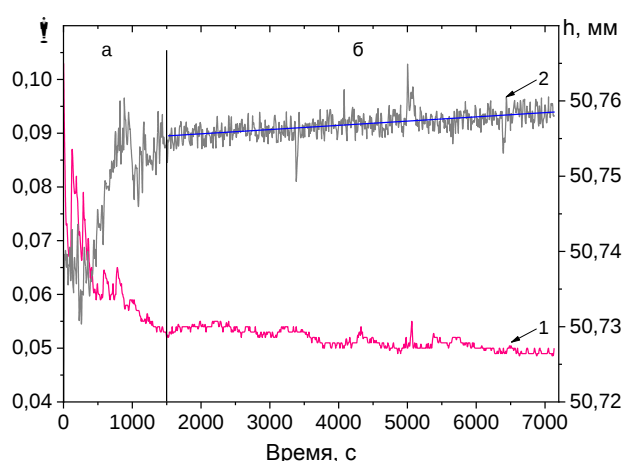


Рисунок 2. Типичный вид записи коэффициента трения (кривая 1) и линейного сближения образцов (кривая 2) на трибометре УМТ-2, где а – этап приработки; б – установившийся режим трения.

Методы оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии

Измерение параметров шероховатости и морфологии поверхности контртел после трибологических испытаний изучалис использованием бесконтактного оптического профилометра S neox (Sensofar, Испания). В этом

исследовании для сбора данных использовали конфокальный объектив с увеличением 150х.

Электронномикроскопическое исследование изменения поверхности композитов в процессе трения было проведено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta-650 (FEI, США) с энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором EDAX (АМЕТЕК, США). В данном исследовании применяли детекторы вторичных и обратноотраженных электронов. 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты трибологических испытаний и их анализ.

Для анализа фрикционно-износных характеристик композитов, полученные экспериментальные данные были представлены в виде диаграммы (рисунок 3) зависимости интенсивности изнашивания I_h и коэффициента трения μ от материалов пары образец-контртело (стальное контртело – рис 3а, керамическое – рис 3б).

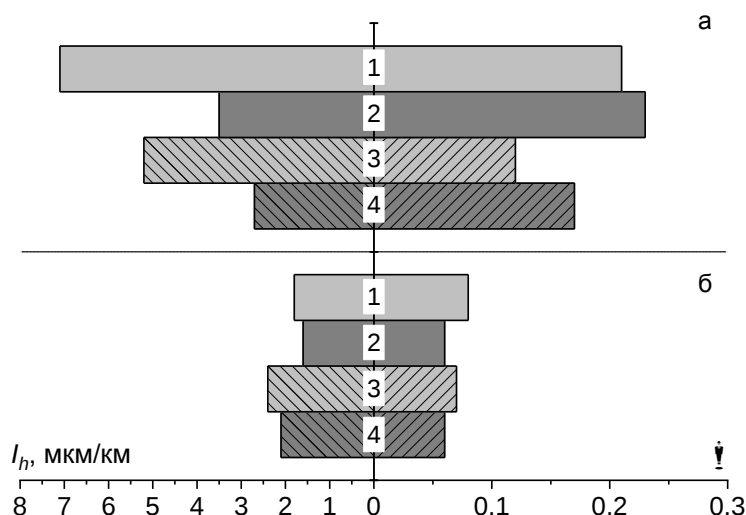


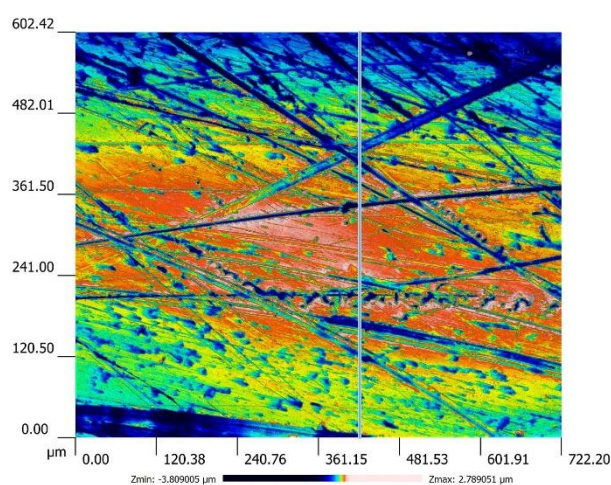
Рисунок 3. Зависимость интенсивности изнашивания (слева) и коэффициента трения (справа) исследуемых композитов 1,2,3,4 (таблица 1) при испытании со стальным (а) и керамическим (б) контртелом

Анализ рисунка 3 показывает существенное различие трибологических характеристик после испытаний со стальным и керамическим контртелами. Важно отметить, что данные характеристики зависят не только от термообработки (карбонизация или графитация), но и от материала препрега (ПАН или вискоза). Основным фактором, влияющим на трибологические характеристики при трении со стальным контртелом является термообработка композитов. Из рисунка 3а видно, что интенсивность изнашивания и коэффициент трения у композитов после графитации имеют меньшие значения ($I_h = 2,7...5,2$ мкм/км, $\mu = 0,12...0,17$) по сравнению с образцами после карбонизации ($I_h = 3,5...7,1$ мкм/км, $\mu = 0,21...0,23$). При испытании с керамическим контртелом более важным аспектом, влияющим на трибохарактеристики, является материал препрега. Из рисунка 3б следует, что интенсивность изнашивания и коэффициент трения у композитов на основе вискозного препрега имеют меньшие значения ($I_h = 1,6...2,1$ мкм/км, $\mu = 0,06$), чем у композитов на основе ПАН препрега ($I_h = 1,8...2,4$ мкм/км, $\mu = 0,07...0,08$).

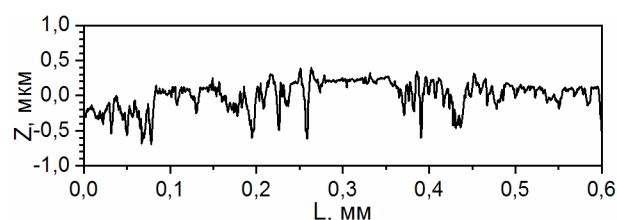
Сравнение результатов, полученных после трибологических испытаний с различными контртелами показало, что интенсивность изнашивания и коэффициент трения при испытании с керамическим контртелом демонстрируют лучшие значения ($I_h = 1,7 \dots 2,1$ мкм/км, $\mu = 0,06 \dots 0,08$) по сравнению со стальным контртелом ($I_h = 2,7 \dots 7,1$ мкм/км, $\mu = 0,12 \dots 0,23$).

Результаты оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии контактных поверхностей после трибологических испытаний со стальным контртелом

На рисунке 4 представлены профилограмма и СЭМ-изображения поверхности стального контртела до и после трибологических испытаний. В таблице 2 приведен химический состав поверхности.



а



б

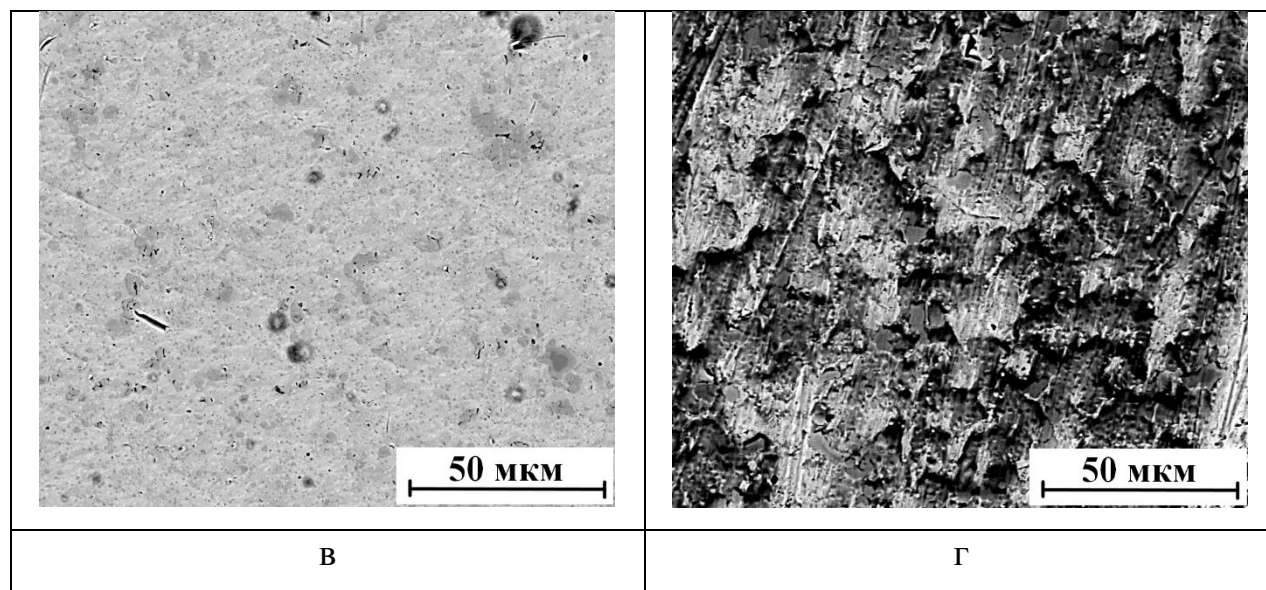


Рисунок 4. (а) – оптическая профилограмма поверхности стального контртела после испытаний с проведенной секущей линией; (б) – профиль секущей; СЭМ-изображение стального контртела до (в) и после (г) трибологических испытаний

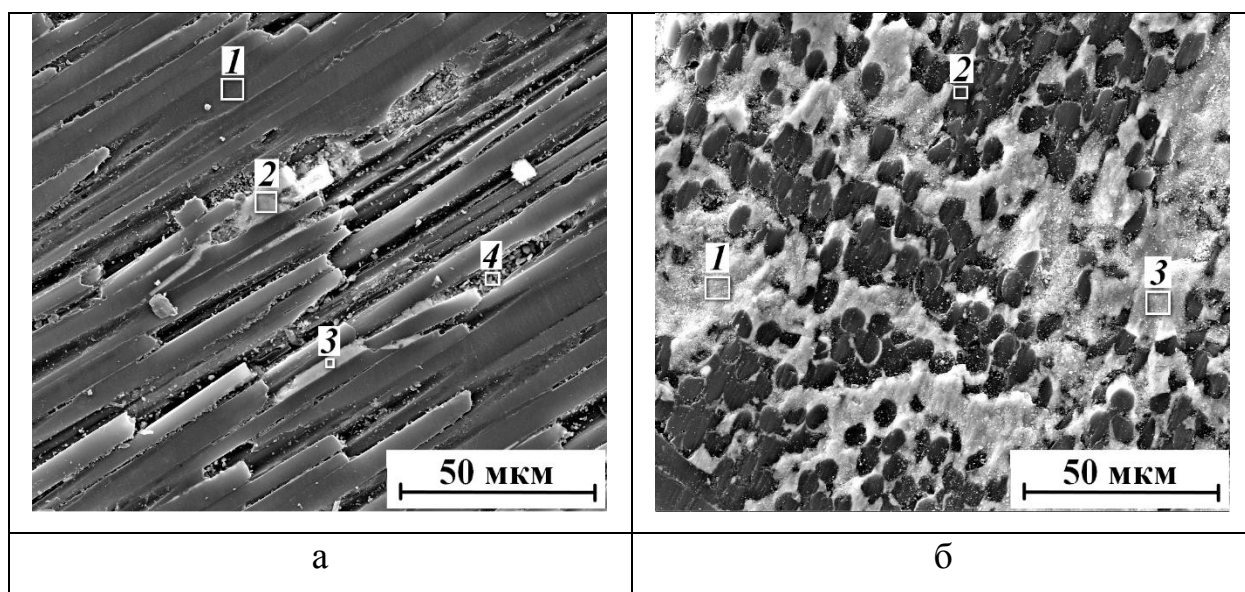
Таблица 2. Химический состав поверхности стального контртела

Исследуемая область	Содержание элементов, % масс				
	С	О	Cr	Mn	Fe
До трения	3,38	1,02	17,29	1,51	76,80
После трения	4,74	9,36	15,55	0,85	69,50

Анализ полученных данных (рисунок 4) показал, что в процессе трения топография и химический состав (таблица 2) поверхности контртела претерпевают существенные изменения. Из рисунка 4а видно, что поверхность стального контртела сильно царапается при трении с углеродным композитом. Появление дефектов на контртеле сказывается на увеличении коэффициента трения и соответственно интенсивности изнашивания (что демонстрирует диаграмма на рисунке 3а). Следует отметить, что высотные параметры

шероховатости поверхности стального контртела после трибологических испытаний составляют $Sa = 0,175$ мкм, $Sz = 4,1$ мкм, т.е. параметры микрорельефа контртела увеличились более чем в 5 раз по сравнению с исходной отполированной поверхностью ($Sa \approx 0,030$ мкм). Результаты электронномикроскопических исследований иллюстрируют сформировавшийся на поверхности контртела развитый рельеф (рисунок 4г). Химический состав поверхности характеризуется повышенным содержанием кислорода, что свидетельствует об активных окислительных процессах, происходящих в контактной зоне.

На рисунке 5 представлены СЭМ-изображения поверхностей трения углеродных композитов после трибологических испытаний со стальным контртелом, а в таблице 3 дан химический состав выделенных на рисунке 5 областей.



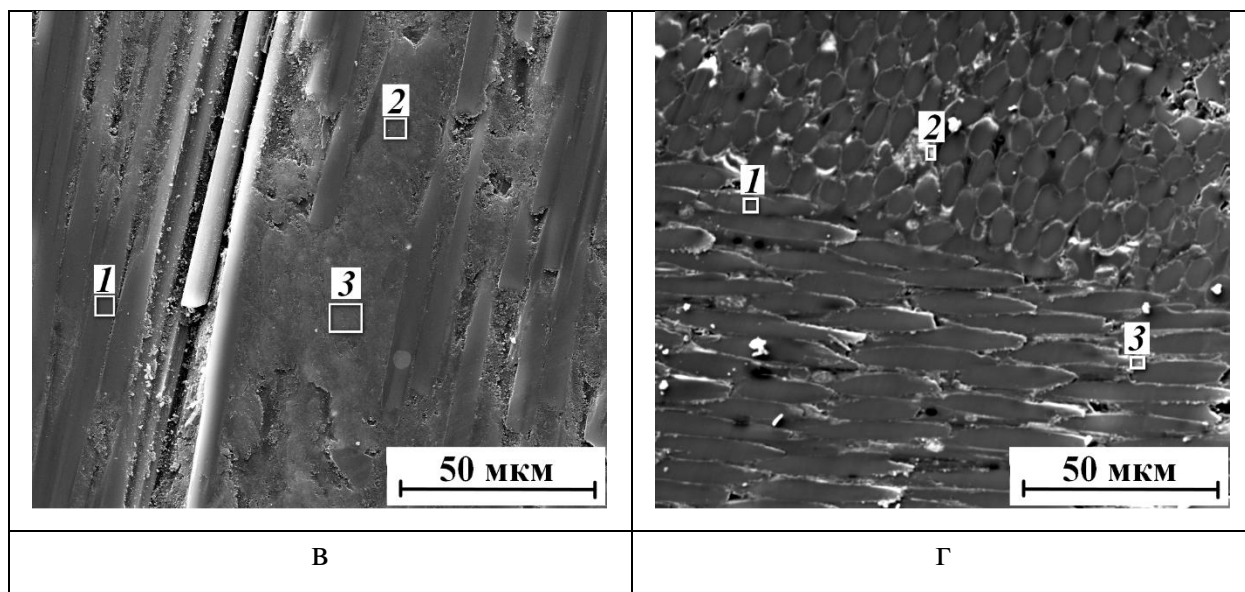


Рисунок 5. СЭМ-изображение поверхности образцов после трибологических испытаний со стальным контртелом (во вторичных электронах), где а-г образцы 1-4 соответственно

После испытаний на поверхности образцов формируется углеродосодержащая пленка ВС, которая сглаживает поверхность (рисунок 5). Однако, наряду с этим процессом, на поверхности изучаемых образцов наблюдается также массоперенос железа со стального контртела (см. таблицу 3, до испытаний образцы полностью состоят из углерода (С – 100%). Так, на поверхности образцов 1 и 2 с карбонизованными волокнами (рисунок 5 а,б) в большом количестве обнаружены области с высоким содержанием железа и кислорода. На поверхности образца 2 (рисунок 5 б) обнаружен максимальный массоперенос, формирующий плотную железосодержащую пленку, что объясняет самый высокий коэффициент трения данного образца (см. диаграмму на рисунке 3 а). На поверхности образцов 3 и 4 с графитированными волокнами (рисунок 5 в,г) железо обнаружено в меньшем количестве (см. таблицу 3), а углеродная пленка ВС более равномерным слоем покрывает поверхность трения данных образцов, тем самым снижая их коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Этот факт можно объяснить тем, что в процессе

графитации уменьшается твердость углеродных фаз и они меньше повреждают стальное контртело.

Таблица 3. Химический состав поверхности образцов после трибологических испытаний со стальным контртелом.

№ образца	Исследуемые участки	Содержание элементов, % масс			
		C	O	Cr	Fe
1	1	80,09	19,87	0,01	0,03
	2	11,90	29,56	6,90	51,64
	3	47,72	30,19	2,44	19,65
	4	34,08	35,19	3,46	27,27
2	1	14,81	32,60	6,94	45,65
	2	90,81	8,87	0,07	0,25
	3	12,13	30,72	7,48	49,67
3	1	75,22	24,75	0,01	0,02
	2	76,58	18,96	0,66	3,81
	3	75,40	20,62	0,66	3,32
4	1	78,71	21,21	0,02	0,06
	2	57,81	24,20	3,07	14,92
	3	75,31	15,50	1,74	7,45

Результаты оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии контактных поверхностей после трибологических испытаний с керамическим контртелом

На рисунке 6 представлены профилограмма и СЭМ-изображения поверхности керамического контртела до и после трибологических испытаний. В таблице 4 приведен химический состав поверхности.

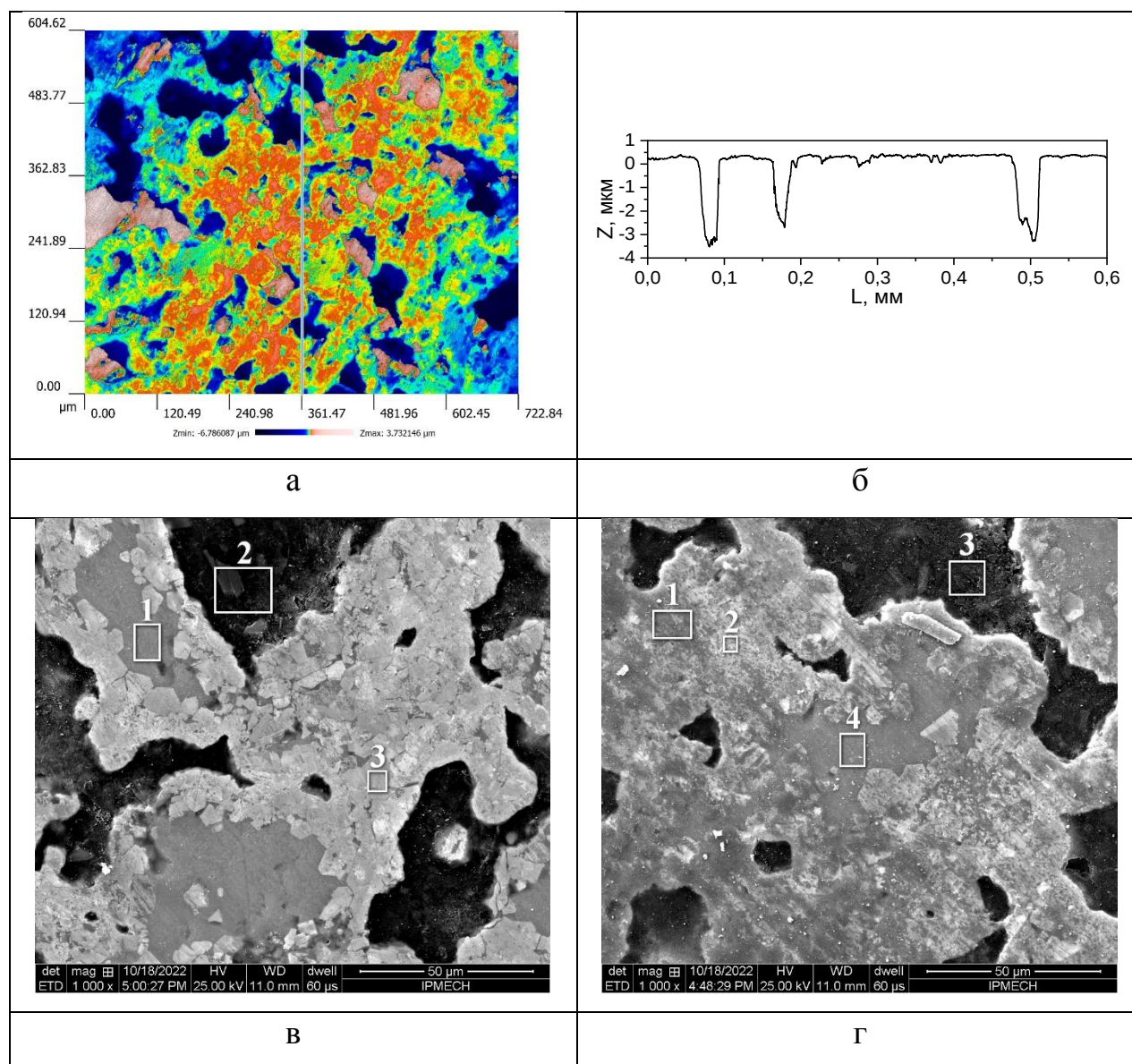


Рисунок 6. (а) – оптическая профилограмма поверхности керамического тела после испытаний с проведенной секущей линией; (б) – профиль секущей; СЭМ-изображение керамического контртела до (в) и после (г) трибологических испытаний

Таблица 4. Химический состав поверхности керамического контртела

Исследуемая область	Исследуемые участки	Содержание элементов, % масс		
		C	O	Si
До трения	1	7,54	0,19	92,27
	2	15,30	0,09	84,61
	3	22,90	0,05	77,05
После трения	1	33,93	0,72	65,36
	2	33,07	0,97	65,96
	3	86,99	9,11	3,91
	4	26,10	1,05	72,85

Из рисунка 6 видно, что на поверхности керамического контртела присутствует большое количество пор. Из результатов рентгеноспектрального анализа следует (см. таблицу 4), что в процессе трения поры заполняются частицами износауглеродных композитов (являющимися абразивом), тем самым минимизируя их присутствие в зоне контакта, что благоприятно сказывается на износостойкости исследуемой пары. СЭМ-изображения поверхности до и после трения (рисунок 6 в,г) иллюстрируют, что на поверхности керамического контртела в процессе трибологических испытаний появляются характерные полосы, направленные вдоль направления трения.

Следует отметить, что высотные параметры шероховатости поверхности керамического контртела после трибологических испытаний составляют $Sa = 0,034$ мкм, $Sz = 5,3$ мкм., т.е. микрорельеф практически не изменился по сравнению с исходной поверхностью ($Sa \approx 0,030$ мкм).

На рисунке 7 представлены СЭМ-изображения поверхностей трения углеродных композитов после испытаний с керамическим контртелом, а в таблице 5 дан химический состав выделенных на рисунке 7 областей.

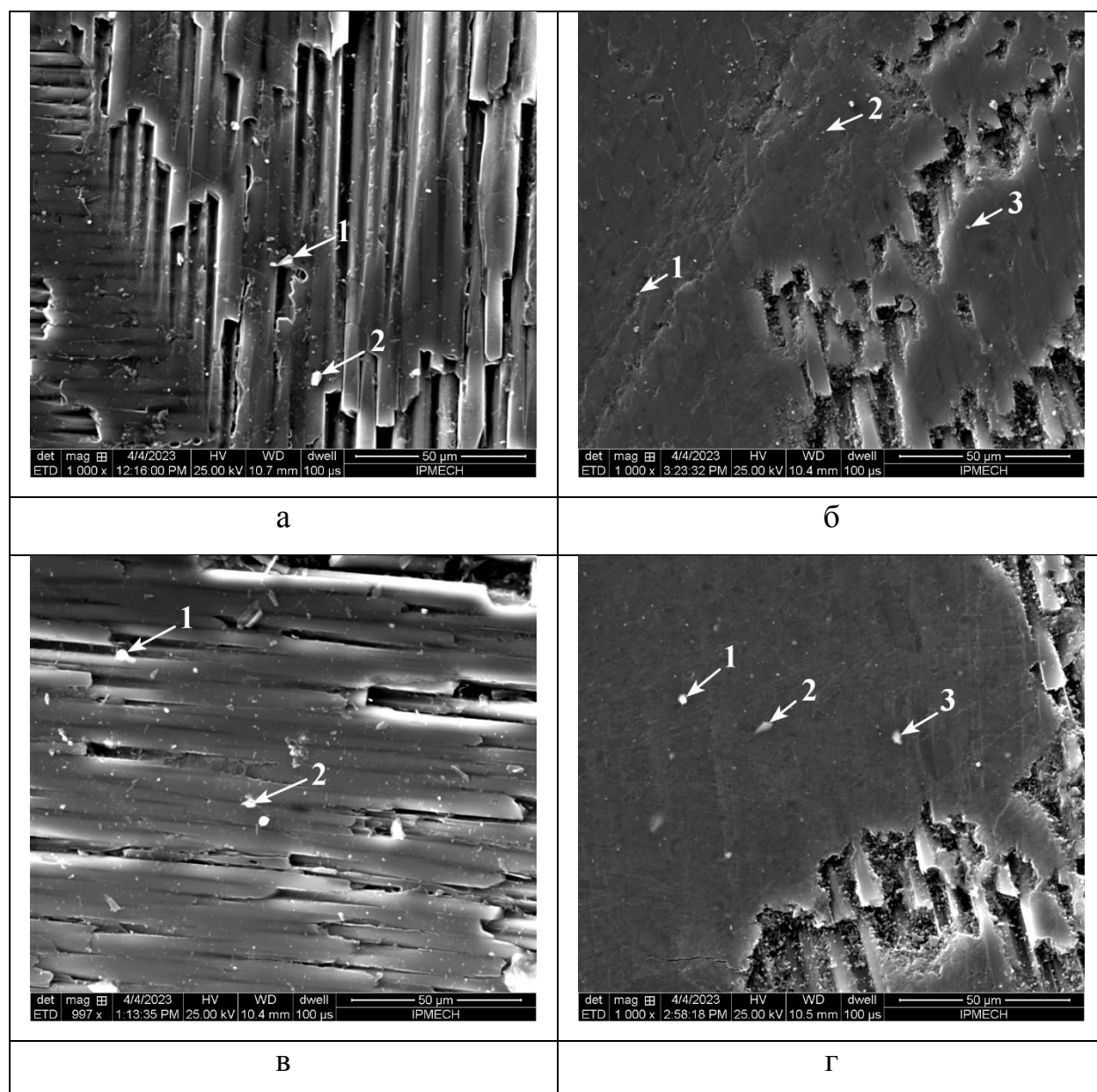


Рисунок 7. СЭМ-изображение поверхности образцов после трибологических испытаний с керамическим контртелом (во вторичных электронах), где а-г образцы 1-4 соответственно

Таблица 5. Химический состав поверхности образцов после трибологических испытаний с керамическим контртелом

№ образца	Исследуемые участки	Содержание элементов, % масс		
		C	O	Si
1	1	61,35	36,70	1,95
	2	58,05	39,33	2,62
2	1	79,64	14,11	6,25
	2	79,19	15,87	4,94
	3	80,97	13,20	5,83
3	1	67,71	30,42	1,87
	2	59,82	38,10	2,08
4	1	74,28	6,87	18,85
	2	72,90	8,26	18,84
	3	76,63	10,05	13,32

После трибологических испытаний с контртелом из керамики на поверхности всех образцов формируется углеродосодержащая пленка ВС. При этом у образцов 2 и 4 на основе вязкого препрега (рисунок 7 б,г) она более равномерным и плотным слоем покрывает поверхность, обеспечивая более низкий, по сравнению с образцами 1 и 3, коэффициент трения (см. диаграмму на рисунке 3 б). Рентгеноспектральный анализ показал, что на поверхности композитов имеются лишь небольшие частички, по химическому составу соответствующие материалу контртела (на рисунке 7 указаны стрелками). Данный факт свидетельствует о том, что массоперенос элементов с керамического контртела отсутствует, т.е. оно практически не изнашивается, что объясняет низкие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Заключение.

На основе проведенных исследований с различными контртелами можно сделать следующие выводы:

- ◆ При трении со стальным контртелом термообработка является основным показателем, влияющим на трибологические характеристики. Интенсивность изнашивания и коэффициент трения у композитов после графитации имеют меньшие значения по сравнению с образцами после карбонизации. Показано, что на поверхности всех композитов в составе пленки вторичных структур содержится железо, перенесенное в результате массопереноса с контртела. Однако, на поверхности образцов с графитированными волокнами оно обнаруживается в меньшем количестве, чем на поверхности образцов с карбонизованными волокнами, при этом углеродная пленка вторичных структур более равномерным слоем покрывает поверхность трения. Этот факт можно объяснить тем, что в процессе графитации уменьшается твердость углеродных фаз и они меньше повреждают стальное контртело.
- ◆ При испытании с керамическим контртелом важным фактором, влияющим на трибологические характеристики, является материал препрега. У композитов на основе вязкого препрега образуется более плотная и равномерная пленка вторичных структур, что обеспечивает более низкие значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по сравнению с композитами на основе ПАН препрега.
- ◆ Трибологические характеристики углеродных композитов при испытании с керамическим контртелом демонстрируют лучшие значения по сравнению со стальным. При трении в паре углеродный композит – сталь происходит заметный износ контртела, в отличие от пары углеродный композит – керамика. При этом во втором случае образуется более плотная плёнка вторичных структур на поверхности композита,

снижающая трения и износ. В используемых в технике трибоспряжениях стальное контртело является более распространённым и технологичным, чем керамическое. Как показывает проведённое исследование, в этом случае возможно улучшить трибологические характеристики композита его термообработкой при повышенной температуре $T > 2000$ °C. Тем не менее, при наличии соответствующей технической возможности следует выбирать в качестве контртела для антифрикционных тканевых углеродных композитов керамику высокой твёрдости ($HRC > 90$), что позволяет исследованным материалам показывать оптимальные трибологические характеристики.

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. Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 19-19-00548-П.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список используемых источников

1. *Averin N., Asaev A., Kliuev M., Murog I., Tatarnikov N. // Transportation Research Procedia. 2023. V. 68.P. 264-270. Doi:10.1016/j.trpro.2023.02.036*
2. *Гуляев Г.М., Гофин М.Я.//Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск. 2013. С. 62-90.*
3. *József Karger-Kocsis, Haroon Mahmood, Alessandro Pegoretti. //Composites Science and Technology. 2020. V. 186. P. 107932. Doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107932.*

4. *Duyoung Choi a, Ji-Yeon Shim, Sungwoong Choi , Sangmin Park , HarokJeong , Min-Su Kim , Jungpil Kim , Junghoon Yang. // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2023.V. 928.P. 117076. Doi: 10.1016/j.jelechem.2022.117076.*
5. *Pei Wang, FengminyuXie, David Wexler, Jian Yin, Hongbo Zhang, Hongtao Zhu. // Tribology International. 2023. V. 185.P. 108483. Doi: 10.1016/j.triboint.2023.108483.*
6. *Tian K., Tay T.E., Tan V.B.C., Haris A., Enquan Chew , Pham V.N.H., Huang J.Z., Raju K., Sugahara T., Fujihara K., Zushi H., Liu J.L. // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023.P. 107590. Doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107590.*
7. *Крамаренко Е.И., Кулаков В.В., Кенигфест А.М. и др.// Трениеиизнос. 2006. Т. 27. № 3. С. 290–298.*
8. *ShuaiWu,Yunqi Liu, YichengGe, Liping Ran, KePeng, Maozhong Yi.// Tribology International. 2016. V. 102.P. 497–506. Doi: 10.1016/j.triboint.2016.06.018.*
9. *GuangyuBian, Houzheng Wu. // Tribology International. 2015. V. 92.P. 1–11. Doi: 10.1016/j.triboint.2015.05.023.*
10. *Bevilacqua M., Babutskyi A., Chrysanthou A. // Carbon. 2015. V. 95.P. 861-869.Doi: 10.1016/j.carbon.2015.08.100.*
11. *MingyangHao, RuiyingLuo, ZhenhuaHou,Wei Yang, Qiao Xiang, Caili Yang. // Wear. 2014. V. 319.P. 145–149.Doi: 10.1016/j.wear.2014.07.023.*
12. *HuaSu ,Chuding Zhang, Shan Sun. // Wear. 2021. V. 476. P. 203682. Doi: 10.1016/j.wear.2021.203682.*
13. *Темис Ю.М., Селиванов А.В. // Авиационные двигатели.2021. Т. 11. № 2. С. 43-60.*
14. *Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., Bukovskiy, P.O.// Composites Journal of Surface Investigation. 2022.V. 16. № 3.P. 397–401. Doi: 10.3390/coatings13050952.*

15. *Schmidt D.L., Davidson K.E., Theibert L.S.*// SAMPE JOURNAL. 1999. V. 35. № 3. P. 27–39.
16. *Awasthi S., Wood J.L.* // Ceramic Engineering and Science Proceedings. 1988. V. 9. P. 553–559. Doi: 10.1002/9780470310496.ch4.
17. *Bukovskiy P.O., Morozov A.V., Kulakov V.V., Golubkov A.K., Rodionov N.B., Kirichenko A.N.* // Journal of Friction and Wear. 2022. V.43.№5. P. 491–501. Doi: 10.3103/S1068366622050026.
18. *Hailiang Deng, Kezhi Li, Hejun Li, Pengyun Wang, Jing Xie, Leilei Zhang.*// Wear. 2010.V. 270.P. 95–103. Doi: 10.1016/j.wear.2010.09.010.
19. *Zhuan Li, Peng Xiao, Ben-gu Zhang, Yang Li, Yu-hai Lu.* // CeramicsInternational. 2015. V. 41. P. 11733–11740. Doi: 10.1016/j.ceramint.2015.05.139.
20. *HuaSu ,Chuding Zhang, Shan Sun.* // Wear. 2021. V. 476. P. 203682. Doi: 10.1016/j.wear.2021.203682.
21. *Margaret P. Proctor, Irebert R. Delgado* //NASA/TM-2004-213049.2004. P.1–11.
22. *Темис Ю.М., Селиванов А.В.* // Авиационныедвигатели. 2021. Т. 11. № 2.С. 43-60.
23. *Шукунов, С. Л., Курлов В.Н.* // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 12. С. 1871-1878.