

МОРФОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕПЛАСТИКОВ

© 2011 И.И. Курбаткин, Г.В. Самохвалов, Т.И. Муравьева, А.М. Мезрин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 10.11.2011

Рассмотрены процессы, протекающие на поверхности углепластиков при их контактном взаимодействии со стальным контртелом. Исследованы структура, состав и трибологические свойства плёнки вторичных структур, образующейся при трении. Установлены зависимости коэффициента трения и износа от давления и скорости скольжения. Результаты сравнительных испытаний позволяют выделить углепластик ФУТ Б83 как имеющий наименьший коэффициент трения, а углепластик УГЭТ – как наиболее износостойкий.

Ключевые слова: углепластик, поверхность контакта, анизотропия, структура, износ, коэффициент трения

Введение

В данной работе рассматриваются структурные изменения, состав и трибологические свойства поверхности при контактном взаимодействии твёрдых тел различных по химическому составу и свойствам. Известно [1], что при контакте материалов через тонкую плёнку вторичных структур (ВС) происходит переход от физической к химической адсорбции, которая проявляется в областях с повышенной температурой и контактным давлением. Вторая особенность трения проявляется в процессе полимеризации при контакте веществ, образующих радикалы. Они образуют полимерную «подушку», представляющую эффективный в отношении смазочного действия слой. Третьей особенностью является то, что при трении происходит микросхватывание, в результате которого один материал переносится на поверхность другого, что и приводит к массопереносу. В последнее время для решения триботехнических задач могут использоваться углепластики [2]. Данные материалы широко применяются в ответственных узлах трения современных машин. Они обладают хорошими антифрикционными и прочностными свойствами. Подобные материалы состоят, как правило, из двух компонентов: полимерного связующего и армирующего элемента в виде тканевой основы, рубленых волокон или матов объёмной конструкции. Кроме этого для повышения триботехнических характеристик могут использоваться наполнители в виде наномодификаторов и модификаторов трения.

Цель работы

Провести исследование анизотропности структуры углепластика и изменений, происходящих на его контактной поверхности при испытаниях на трение, определить особенности её разрушения, и изменения химического состава в отдельных структурных фрагментах, установить зависимости износа и коэффициента трения от давления и скорости.

Материалы и методы исследований

Для исследований использовались углепластики марок ФУТ Б83 и УГЭТ, пропитанные соответственно фенолформальдегидным и эпоксидным связующим. Из них изготавливались образцы для трибологических испытаний и микроскопического анализа с использованием оптического и электронного микроскопа. Эксперименты на трение и износ углепластиков УГЭТ и ФУТ Б83 проводились на трибометре Т-10. Испытания проводились в сухую по схеме трения пальчикового образца $\varnothing 5$ мм с ориентировкой основы ткани расположенной перпендикулярно поверхности стального контртела в виде диска (марка стали Ст. 20Х13, $HR_c = 30 \div 34$), ($K_{эс} = 0.05$) при следующих условиях: диапазон контактных давлений от 0.2 до 1.0 МПа и диапазон скоростей скольжения от 0.1 до 1.0 м/с. Интенсивность износа определялась отношением величины Z мкм (линейный износ) к пути трения. Оценка трибологических зависимостей углепластика УГЭТ, снабженных вставками из фторопласта Ф-4 $\varnothing 7$ мм, равномерно расположенными по дорожке трения проводились по схеме кольцо – диск на машине трения УМТ-2 с $K_{эс} \rightarrow 1$. Количество вставок выбиралось из условия обеспечения требуемой доли (в %) фторопласта, занимаемой в общей площади дорожки трения в пределах $10 \div 40\%$, в сухую по стальному контртелу (Ст. 20Х13 $HR_c = 30 \div 34$). В данном случае линейный износ (h) определялся по профилограммам.

Курбаткин Игорь Иванович, к.т.н., доцент.

E-mail: iikurbatkin@mail.ru

Самохвалов Геннадий Васильевич, руководитель патентной службы.

E-mail: iikurbatkin@mail.ru

Муравьева Тамара Ивановна, старший инженер.

E-mail: muravyeva@list.ru

Мезрин Алексей Михайлович, программист.

E-mail: iikurbatkin@mail.ru

Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследование структурной анизотропии исходных образцов. Необходимость проведения данного исследования вызвана сложностью строения изучаемого материала. Его структура представляет композицию из углеродных волокон, сплетённых в ткань и связующего материала. Такое строение вызывает анизотропию свойств. В связи с этим при изготовлении образцов и их испытании важно учитывать структурные особенности плоскости контакта исследуемого материала. В настоящей работе, приводятся основные результаты структурного анализа, используя терминологию, принятую для обозначения основных текстурных направлений. На

рисунке 1 представлена схема строения углепластика и микроструктура материала в плоскости перпендикулярной нормали направления. Основными направлениями считаются: X(1) – направление по основе ткани; Y(2) – направление по утку; Z(3) – направление нормальное к плоскости ткани или трансверсальное. Соотношение количества волокон в основе и утке равно 70:30.

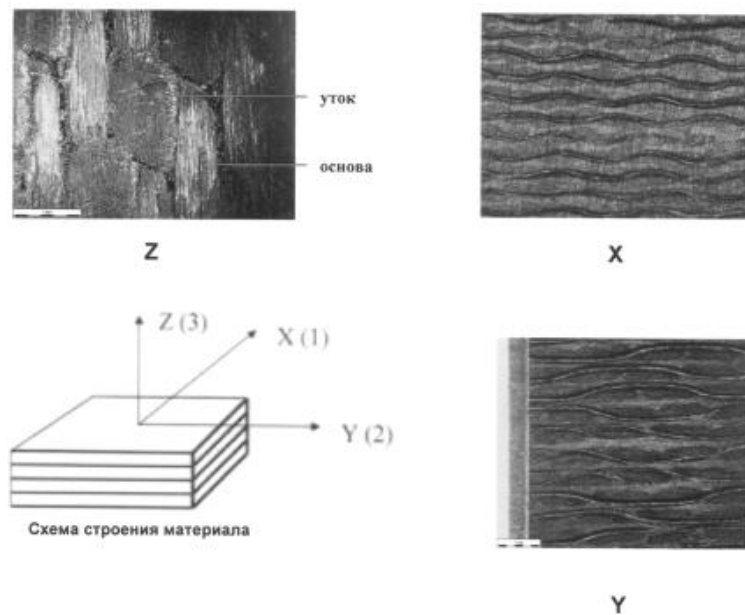


Рис.1. Схема основных направлений армирования углепластиковых материалов. Направления: X (1) – вдоль основы армирующей ткани; Y (2) – вдоль утка армирующей ткани; Z (3) – нормальное (трансверсальное) к плоскости армирующей ткани.

Исследование структурных изменений на контактной поверхности при трении углепластика марки УГЭТ по стали 20Х13.

После испытаний на трение в условиях скольжения по стальному контртелу пальчикового образца, выполненного из исследуемого углепластика контактная поверхность образца показана на рисунке 2а. Как видно она имеет области дефектов, которые, как правило, расположены в приграничных зонах между волокнами с продольной ориентировкой (уток) и волокнами с торцевой ориентировкой к поверхности (основа). Из которого видно, что структурные изменения при трении начинаются с разрушения связующего материала. По мере его удаления с поверхности, волокна обнажаются, и затем начинается процесс отслоения и разрушения самого волокна. На рисунке видно множество мельчайших частиц, которые образуются в результате разрушения волокна и связую-

щего. Несколько другая картина наблюдается тогда, когда волокна имеют торцевую ориентировку, они плотно соединены между собой и способны выдерживать значительные нормальные и касательные напряжения. В процессе трения между ними и связующим образуются микротрещины, которые впоследствии приводят к расслоению, однако их сопротивляемость разрушению гораздо выше, чем у волокна с продольной ориентировкой. В таблице – 1 приведены составы исследованных областей. Из представленных данных видно, что они не очень сильно различаются между собой, но необходимо отметить повышенное содержание железа и хрома в области торцевой ориентировки волокон, что связано с интенсивным переносом этих элементов из контртела. При трении концы волокон начинают выступать, вследствие этого происходит усиление массопереноса основных элементов с контртела. Это подтверждает тот факт, что именно волокна с торцевой ориентировкой воспринимают основную часть нагрузки.

Таблица 1. Содержание элементов в различных участках после трибологических испытаний

Исследуемые участки	Содержание элементов % по массе								
	C	N	O	F	Si	Cl	Ca	Cr	Fe
Участок продольной ориентировки волокон	82,9	4,2	4,5	0,4	0,3	5,2	-	0,3	2,2
Участок торцевой ориентировки волокон	79,1	3,1	5,4	0,4	0,4	5,3	0,2	0,8	5,3
Пограничные области разрушения	18,1	5,2	19,9	1,3	1,9	4,5	0,9	6,3	41,9

Пограничная область между торцевой и продольной ориентировкой, которая характеризуется наличием областей со значительными разрушениями и скоплением частиц износа. Именно в этих областях происходит возникновение граничных эффектов. Необходимо отметить, что материал при этом насыщается химическими элементами. Состав области приведён в таблице 1. Можно отметить появление таких элементов как железа и хрома, которые находятся в составе контртела. Углерод, кислород и азот присутствуют в материале углепластика и связующего. Остальные обнаруженные элементы могли появиться на частицах износа в результате адсорбции из окружающей среды. По данным работы [3] области разрушения являются скоплением частиц износа и играют важную роль в процессе трения. Фрактография поверхности излома углеродного волокна представлена на рис. 2б, на кото-

ром видны мельчайшие частицы, образующиеся при разрушении.

Таким образом, установлено, что при трении углепластика его структурные составляющие с различной ориентировкой относительно плоскости контакта образуют области, в которых механизм контактного взаимодействия проявляется по-разному, что существенным образом должно сказываться на свойствах материала. Важную роль в механизме трения играют области, где происходит

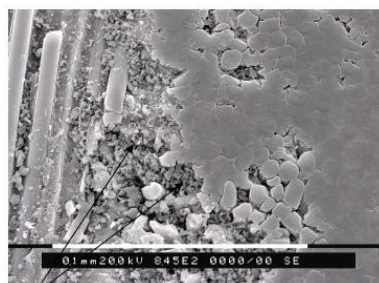
разрушение и дробление частиц износа, которые определяют процесс образования контактного слоя.

Программа испытаний на трибологические свойства углепластика УГЭТ предусматривала структурную схему в которой волокна основы перпендикулярны плоскости контакта. Проводилось определение зависимостей коэффициента трения (f) от давления (P) и скорости скольжения (V) и интенсивности изнашивания (I) от давления (P); f определялась по результатам полного факторного эксперимента типа ПФЭ 2^2 , с вариацией двух факторов (P и V) на двух уровнях. Итогом каждого из экспериментов являлась определение зависимостей f и I .

$$\hat{f} = 0.166 + 0.087P + 0.04V + 0.13PV$$

$$I = 4.0 \cdot 10^{-10} P^{0.37}$$

Таким образом, как показали экспериментальные исследования, трибологические свойства данного материала зависят от структурного строения плоскости контакта. Увеличение нагрузки и скорости вызывает увеличение размеров зон, где происходит разрушение поверхности контакта. Результатом этого является повышенный износ материала.



Область разрушения

а



б

Рис. 2. Область разрушения по границе волокон, расположенных в долевом и поперечном направлении (а); структура излома углеродного волокна (б).

Исследование структурных изменений на контактной поверхности при трении углепластика марки ФУТ модифицированного баббитом марки Б83 по стали 20Х13. В настоящей работе проводилось исследование углепластика модифицированного баббитом. При исследовании структуры и состава установлено, что частицы могут находиться как в виде конгломератов, так и в виде отдельных частиц.

Поверхность исходного образца имеет заметный рельеф. Структура поверхности образца после трибологических испытаний показана на рисунке 3. На поверхности видны борозды трения, структура материала и область расположения модификатора. Частицы имеют сферическую форму. Местоположение их на поверхности не меняется и соответствует исходному состоянию.

Таблица 2. Содержание элементов на контактной поверхности после проведения трибологических испытаний

Исследуемые области	Содержание элементов % по массе							
	C	N	O	Si	Sn	Sb	Fe	Cu
Ориентировка углепластика в торцевом направлении поверхности контакта-1 (соответствует исходному состоянию)	89,2	5,4	5,4	-	-	-	-	-
Ориентировка углепластика в продольном направлении поверхности контакта-2	72,6	6,9	12,5	0,5	5,8	-	1,7	
Область включений-3	29,8	3,2	6,6	0,5	47,3	6,7	0,8	5,1
Ориентировка углепластика в продольном направлении поверхности контакта-4	78,7	6,7	10,1	0,4	3,2	-	0,9	-
Ориентировка углепластика в торцевом направлении поверхности контакта-5	86,4	5,9	5,8	0,5	0,9	-	0,5	-

Данные таблицы 2 показывают, что происходит намазывание олова, однако, чем дальше от трибомодификатора находятся области исследования, тем меньше в них его содержание. На самих частицах происходит образование ВС, о чём свидетельствует наличие таких элементов как углерод, азот, кислород, кремний и железо. Как показали структурные исследования, распределение трибомодификатора в структуре материала неоднородно, однако массоперенос имеет место, но не сильно развит. Программа испытаний на трение и изнашивание углепластика ФУТ-Б83 была аналогичной, что и для

предыдущей контактной пары. Зависимости f и I представлены формулами:

$$\hat{f} = 0.143 + 0.073P; I = 6.71 \cdot 10^{-10} P^{0.66}$$

Структурные исследования показали, что добавление трибомодификатора приводит к образованию плёнки ВС в виде отдельных областей, которые содержат олово. Однако сама по себе она не является сплошной и находится в областях расположения частиц и конгломератов. Её образование может влиять на трибологические свойства контактной поверхности.

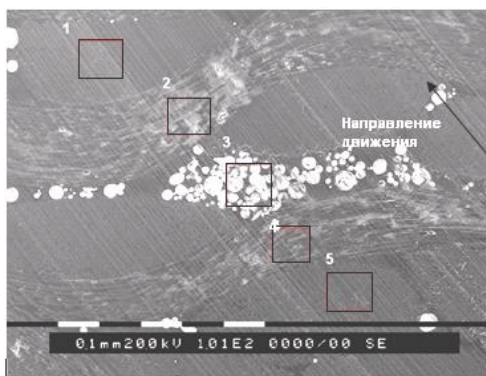


Рис. 3. Структура поверхности углепластика марки ФУТ модифицированного баббитом Б – 83 после трибологических испытаний (выделены области исследования состава).

Таблица 3. Состав структурных областей углепластика марки УГЭТ с фторопластовыми вставками

Исследуемые области	Содержание элементов % масс.							
	C	N	O	F	Si	Cl	Cr	Fe
Область углепластика на дорожке трения	76,5	2,3	7,1	3,0	0,4	2,9	0,9	6,9
Область фторопластовой вставки на дорожке трения	30,1	2,3	8,1	57,1	0,2	0,3	-	1,9
Поверхность трения контртела	5,8	4,5	15,3	11,5	0,3	0,7	8,8	53,1

Исследование структурных изменений на контактной поверхности при торцевом трении углепластика марки УГЭТ с фторопластовыми вставками по стали 20Х13. При испытании этого модельного материала в условиях трения скольжения по кольцевому выступу стального контртела обра-

Из данных таблицы видно, что в области углепластика на дорожке трения присутствуют элементы контртела – железо и хром. Присутствие кремния связано с появлением абразивных частиц из окружающей среды. Кроме того, происходит перераспределение основных химических элементов, таких как фтор, углерод и хлор между фторопластовой вставкой и углепластиком. Содержание фтора в области контакта между вставками может косвенно характеризовать присутствие фтористой плёнки твёрдой смазки на поверхности углепластика. Состав поверхности и плёнки ВС, образующихся на контртеле, представлен в таблице – 3. Из данных таблицы следует, что на поверхности контртела содержатся в основном оксиды, которые образуются

зуются дорожка трения и частицы износа. Последние особенно интенсивно образуются в начальный период трения и представляют собой фторопластовую стружку с частицами углепластикового волокна. Среднее содержание элементов на дорожке трения углепластика и фторопластовой вставке приведено в таблице 3.

за счёт процессов нагрева поверхности при трении. Плёнка фторопласта содержится на контртеле, а на отдельных участках её количество достигает 16,12%. Исследование торцевого трения углепластика с фторопластовыми вставками показало, что на дорожке трения между углеродной составляющей и фторопластом происходит перераспределение основных элементов.

Итогом каждого из экспериментов на определение трибологических свойств так же являлась получение зависимостей T^0C , f и h от пути трения. Результаты испытаний приведены в табл. 4. Влияние содержания фторопласта проявляется в незначительном снижении коэффициента трения.

Таблица 4. Результаты испытаний углепластика УГЭТ с фторопластовыми вставками $\varnothing 7$ мм., $P = 2$ Мпа; $V = 0.1$ м/с.

№	Вставки фторопласта		Коэффициент трения f	Средняя интенсивность изнашивания \bar{I}	Температура в конце исп-я T^0C	Примечания
	N шт	Конц-я %				
1	0	0	0.17 ÷ 0.3	$1.7 \cdot 10^{-9}$	177	Волокна основы \perp пов-ти трения
2	0	0	0.12 ÷ 0.32	$3.93 \cdot 10^{-9}$	193	Волокна основы \parallel пов-ти трения
3	2	10	0.13 ÷ 0.35	$3 \cdot 10^{-9}$	188	
4	4	20	0.13 ÷ 0.45	$2 \cdot 10^{-9}$	226	
5	8	40	0.13 ÷ 0.32	$1.5 \cdot 10^{-9}$	186	

Заключение

Проведено исследование структурной анизотропии композиционных углепластиковых материалов и установлены структурные различия по основным направлениям. Определена специфика разрушения углепластикового волокна и связующего материала в зависимости от его ориентации в основных структурных областях. Установлена

склонность к повышенному разрушению по механизму отслоения в направлении продольного трения волокон. Показано, что накопление частиц износа происходит преимущественно в областях перехода от торцевого к трению в продольном направлении волокон. В зонах разрушения и накопления частиц износа наблюдается значительная адсорбция

химических элементов. На основании данных химического анализа установлено, что между углепластиком и стальным контртелом происходит массоперенос таких элементов как: железа, хрома, углерода, кремния и хлора. Исследование процесса трения углепластика с фторопластовыми вставками показало, что происходит намазывание тонкой плёнки ВС на поверхность углепластика. При исследовании влияния трибомодификаторов на структуру материала марки ФУТ-Б83 установлено, что распределение по объёму материала неоднородно, а массоперенос незначительный. В связи с этим, в целях повышения эффективности их действия желательно добиться оптимальной концентрации и более равномерного распределения их по объёму материала. На основании сравнительных испытаний углепластиков типа ФУТ, ФУТ -Б83, УГЭТ с фторопластовыми вставками (модельный материал) по оценке антифрикционных и износных свойств в паре со Ст.

20Х13, выполненных на машине трения Т-10, можно выделить углепластик ФУТ-Б83, как более предпочтительный в отношении коэффициента трения и материал УГЭТ как более износостойкий.

Работа, проведена при поддержке проектов РФФИ (09-08-00901-а; 09-08-01148) и Гранта Президента РФ на поддержку ведущих научных школ России (проект НШ-3288.2010.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М., Машиностроение, 1982, 212 с.
2. Петров В.М. Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач. Санкт – Петербург, Издательство СПбГПУ, 2004. 282с.
3. Анисимов А.В., Барахтин Б.К., Бахарева В.Е. и др. Исследование микроструктуры и механизма изнашивания углепластика ФУТ в паре с коррозионно-стойкой сталью. // Вопросы материаловедения. № 2(46), 2006. С. 36 – 43

MORPHOLOGY OF THE CONTACT SURFACE AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CARBON PLASTICS

© 2011 I.I. Kurbatkin, G.V. Samokhvalov, T.I. Muravyeva, A.M. Mezrin

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences.

The processes running on the surface of carbon plastics during their friction over a steel counterbody are considered. The structure, composition, and tribological characteristics of the secondary structure film produced by friction are studied. The dependences of the friction coefficient and wear on the pressure and sliding velocity are found. The results of comparative tests allow the authors to distinguish carbon plastic ФУТ Б83 as having the lowest friction coefficient and carbon plastic УГЭТ as the most wear-resistant. Key words: carbon plastics, contact surface, anisotropy, structure, wear, friction coefficient.

Kurbatkin Igor Ivanovich, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer. E-mail: iikurbatkin@mail.ru

Samokhvalov Gennady Vasilevich, the head of patent service. E-mail: iikurbatkin@mail.ru

Muravyeva Tamara Ivanovna, the senior engineer. E-mail: muravyeva@list.ru

Mezrin Alexey Mihajlovich, the programmer. E-mail: iikurbatkin@mail.ru