

С. А. Бочкарева^{а,б}, В. О. Алексенко^а, Б. А. Люкшин^{а,б}, Д. Г. Буслович^а,
С. В. Панин^{а,б}*

*^аИнститут физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
^бТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия
^вНациональный исследовательский Томский политехнический университет, Россия*

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СОПРЯГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ

*S. A. Bochkareva, V. O. Alexenko, B. A. Lyukshin, D. G. Buslovich, and S. V. Panin**

EFFECT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF MATED MATERIALS ON THE WEAR INTENSITY OF A POLYMER-POLYMER FRICTION PAIR

Keywords: polymer composite, tribological mating, thermal conductivity, carbon fibers, carbon nanotubes, polyetheretherketone, ultra-high-molecular polyethylene, computational modeling

The development of new high-strength high-temperature thermoplastics opens up prospects for the creation of new types of polymer-polymer friction pairs. However, due to the low thermal conductivity of mated thermoplastic polymers, the frictional heat is localized in the tribocontact region. This fact exerts a significant effect on the physical and mechanical properties of the polymers and on their wear resistance. Taking into account the data of previous experimental studies, a model of the friction process and wear is developed, implemented, and verified as applied to the creation of a UHMWPE-PEEK polymer-polymer friction pair. In order to ensure the heat removal, it is proposed to use polymer composites in which, owing to the introduction of heat-conducting inclusions, the thermal conductivity increases. In addition, the degree of degradation of their strength properties caused by the frictional heating decreases, and, in turn, the wear rate decreases. The model developed was verified by the data of tribological tests of samples fabricated by the 3D-printing.

*Автор, с которым следует вести переписку: svetlanab7@yandex.ru
Corresponding author: svetlanab7@yandex.ru

Ключевые слова: композит полимерный, трибосопряжение, теплопроводность, волокно углеродное, нанотрубки углеродные, полиэфирэфиркетон, полиэтилен сверхвысокомолекулярный, моделирование численное

Появление новых высокопрочных высокотемпературных термопластов открывает перспективы для разработки новых видов полимер-полимерных пар трения. Однако вследствие низкой теплопроводности сопрягаемых термопластичных полимеров фрикционное тепло локализуется в области трибоконтакта. Это оказывает значительное влияние на физико-механические свойства полимеров и их сопротивление изнашиванию. С учетом результатов экспериментальных исследований реализована модель процесса трения и изнашивания применительно к созданию полимер-полимерной пары трения ПЭЭК—СВМПЭ. Для обеспечения отвода тепла предложено использовать полимерные композиты, в которых за счет введения теплопроводящих включений повышается теплопроводность, снижается степень деградации прочностных свойств, вызванных фрикционным нагревом, снижается интенсивность изнашивания. Показано, что значительное повышение теплопроводности обеспечивается за счет создания теплопроводящей сетки из нановключений. Проведена верификация модели по данным трибологических испытаний образцов, изготовленных методом 3D-печати.

Введение

Появление новых высокопрочных высокотемпературных термопластов открывает перспективы в области разработки и использования полимер-полимерных пар трения. С учетом их высокой стоимости речь идет преимущественно о приложениях в высокотехнологичных отраслях промышленности и медицине. Например, заметные успехи, достигнутые в области медицинского материаловедения, обусловили выпуск на рынок наполненного полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) марки Optima.

В [1] исследовали трение ПЭЭК в паре со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом (СВМПЭ), причем первый рассматривали в качестве замены металлического компонента искусственного сустава (тазобедренного либо коленного). Проведено сопоставительное сравнение полимер-полимерной и метал-полимерной пар трения ПЭЭК—СВМПЭ и CoCr—СВМПЭ. В обоих случаях испытания проводили в смазочной среде, показана ее важная роль в развитии процесса изнашивания, что определялось формированием пленки переноса и ее закреплением на контртеле. Подобные результаты были описаны и в работе [2].

Возможность замены металлического компонента на полимерный в искусственных суставах изучали в [3] при использовании коммерческого ПЭЭК и сильносшитого СВМПЭ (highly cross-linked) в условиях трибоконт-

такта. Дополнительно в ПЭЭК вводили углеродные волокна с их разной ориентацией относительно направления скольжения. В обоих случаях ПЭЭК характеризовался крайне низким износом, однако при наполнении короткими углеродными волокнами (КУВ) наблюдали заметный износ контртела из СВМПЭ. Проблема создания полимер-полимерных пар трения требует проведения дальнейших исследований.

По причине низкой теплопроводности термопластичных полимеров в условиях отсутствия смазочной среды фрикционный нагрев локализуется в зоне контакта, что оказывает значительное влияние на механические и триботехнические свойства полимеров. Величина тепловой энергии, выделяемой на поверхности контакта, зависит от трех основных параметров: скорости скольжения, контактного давления и коэффициента трения [4]. В [5] показано, что повышение температуры при трении может обуславливать как положительный, так и отрицательный эффект в зависимости от комбинации физико-механических свойств, химической активности сопрягаемых материалов, а также от нагрузочно-скоростных параметров трибоиспытаний.

В [6] исследовали триботехнические свойства трибосопряжения ПЭЭК—ПЭЭК. Показано, что в условиях отсутствия смазочной среды температура при трении может достигать 300 °С. При этом трибосопряжение ПЭЭК—ПЭЭК значительно превосходит по износостойкости пары трения на основе полиоксиметилена и полиамида. Однако при большой нагрузке и скорости скольжения скорость изнашивания и коэффициент трения возрастают.

Выбором наполнителей можно целенаправленно изменять теплопроводность полимерного композита. Это изменение определяется теплопроводностью наполнителя, его содержанием и преимущественной ориентацией и расположением включений, а также термическим сопротивлением материала на поверхности контакта (поскольку свойства материала на ней могут значительно отличаться от исходных компонентов, например вследствие развития процессов трибоокисления) [7]. В литературе показано, что подобные свойства присущи углеродным микро- и нановолокнам. По мере повышения содержания волокон отмечен рост теплопроводности [8, 9], повышение модуля упругости, предела текучести и износостойкости композитов. При этом повышение износостойкости объясняется локальным упрочнением и перераспределением (передачей) нагрузки от матрицы к армирующим волокнам [10—12].

При разработке полимер-полимерных пар трения для достижения требуемых триботехнических свойств необходимо решать комплексные (и зачастую связанные) задачи. При этом повышение одних ключевых свойств может сопровождаться снижением других. По этой причине актуальным представляется развитие методов численного моделирования, позволяющих при правильно построенной модели многократно снизить временные затраты на поиск рациональных составов композиций в трибопаре.

В настоящее время развиваются разные подходы и методы решения задач контактной механики, направленные на более глубокое изучение факторов износа с целью контролируемого управления структурой полимеров и их износостойкостью. Так, в работе [13] освещены некоторые методы решения таких задач. Они включают аналитические решения, основанные на моделях Гринвуда—Уильямсона, Арчарда, фрактальных теорий Персона [14] и т. д., которые наряду с численными методами (методом граничных элементов [15—17], методом конечных элементов (МКЭ) [18—20], подвижных клеточных автоматов [21], методов молекулярной динамики [22] и др.) применяются для решения контактных задач. При этом структурная неоднородность материалов учитывается, как правило, на основе концепции эффективной однородности [17, 18, 22].

Практическим приложением представленных далее результатов является создание полимер-полимерной пары трения ПЭЭК—СВМПЭ для биомедицинских приложений. Для снижения временных затрат на проведение исследований с учетом ранее полученных экспериментальных данных реализована модель процесса трения и изнашивания [23] на основе МКЭ. В рамках развиваемой модели оценивали влияние наполнения полимеров теплопроводящими добавками на изменение их теплофизических свойств, температуры трибоконтакта и изнашивания.

1. Описание расчетного метода

В [23] выявлено, что СВМПЭ, модифицированный (наполненный) мелкодисперсными частицами полипропилена (ПП) СВМПЭ+20% по массе ПП, обладает необходимой текучестью расплава для его переработки 3D-печатью (методом Fused Deposition Modeling). В рамках получения полимер-полимерного биотрибоузла предполагается сопряжение композита СВМП+20% по массе ПП с полиэфирэфиркетонам (ПЭЭК). Однако по причине их низкой теплопроводности при трении в условиях отсутствия смазочной среды происходит сильный нагрев. Это снижает механические и триботехнические свойства и сопровождается значительным износом.

Для обеспечения отвода тепла предложено вводить в ПЭЭК теплопроводящий наполнитель. В настоящей работе реализована модель оценки влияния структуры композитов на их теплопроводность и изнашивание при трении по схеме вал—колодка.

Расчет проводили в квазистатической плоской постановке методом конечных элементов, реализованным в авторском пакете программ на языке фортран. Расчетная область представляла собой образец и контртело аналогично проведению испытаний по схеме вал—колодка (рис. 1). В плоском случае в расчете рассмотрен образец в форме прямоугольника и часть контртела (сегмент, расположенный над образцом). На рисунке показано разбиение расчетной области конечно-элементной сеткой (один из вариантов, полученный при определении сеточной сходимости). Длину расчетной области при моделировании трения принимали равной

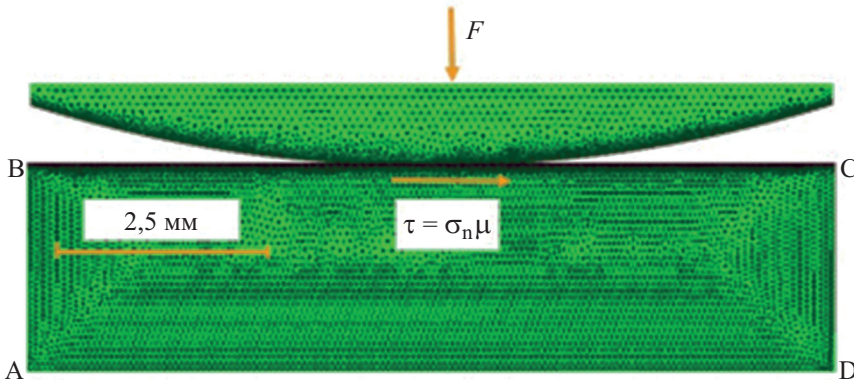


Рис. 1. Схема расчетной области с конечно-элементной сеткой для моделирования процесса трения.

10 мм, высоту — 2,5 мм. Диаметр контртела 35 мм, нагрузка $F = 20$ Н; исходная контактная поверхность полимерных образцов в расчете принята гладкой.

Износ определяли на основе модели процесса трения [23], в которой учитывается действие нормальной и касательной нагрузок, возникающих при трении. При этом учитываются изменения свойств материалов контактирующих тел в результате фрикционного нагрева. Температуру контактирующих тел определяли через работу сил трения. Распределение температуры в контактирующих телах находили на основе решения нестационарной задачи теплопроводности по методике, описанной в [24]. Определение НДС в паре трения основано на решении уравнений механики деформируемого твердого тела. В соответствии с методом последовательных нагружений, использованном при расчетах, нагрузку задавали пошагово. Когда суммарные нормальные напряжения на контакте равны заданной нормальной прижимающей силе, задается касательная нагрузка по закону Кулона, но без учета молекулярной составляющей. При расчете на каждом шаге по нагрузке проверяются критерии разрушения. При их выполнении реализуется разрушение в виде удаления из расчета элементов сетки, в которых выполнены критерии.

В качестве критериев разрушения принимали достижение интенсивностью напряжений (или деформаций) предела текучести на границе контакта и/или превышение касательными напряжениями максимально допустимого значения, принятого равным 0,3 от напряжения предела текучести. После удаления ячеек, в которых выполнен один из критериев разрушения, формируется новая граница контакта, и конечно-элементная сетка перестраивается. Свойства материала в каждой конечно-элементной ячейке меняются пошагово в соответствии с диаграммой напряжение—деформация и ее зависимостью от температуры.

Учет нелинейности свойств, в том числе при больших температурах, приводит к большим деформациям даже при небольшой нагрузке, что

вызывает сильное искажение сетки (появление острых углов в элементах либо взаимопроникновение контактирующих тел). Это приводит к некорректным результатам вычислений, поэтому шаг по нагрузке уменьшается и расчет повторяется. В этой связи расчеты на износостойкость требуют больших вычислительных затрат.

Величину объемного износа рассчитывали как произведение площади удаленных элементов на ширину контртела.

2. Результаты расчетов и их обсуждение

Расчет проводили применительно к образцу композита СВМПЭ+20% по массе ПП [23]. В качестве материала контртела использовали ПЭЭК с соответствующими физико-механическими свойствами.

Физико-механические свойства материалов (табл. 1) получены на основе экспериментальных и литературных данных, за исключением композита СВМПЭ+20% по массе ПП, для которого эффективные свойства определяли в рамках численного моделирования на основе анализа поведения представительного объема [25]. Нагрузку задавали как одноосное растяжение и решали задачу о плоском напряженном состоянии (в силу того, что нагрузка действует в одной плоскости) с использованием аппарата механики деформируемого твердого тела МКЭ, реализованном в авторском пакете программ на языке фортран. Использовали треугольные симплекс-элементы. Расчет проводили методом последовательных нагружений, что позволяет учитывать нелинейность диаграммы нагружения материала, в том числе при разных температурах. Применив процедуру осреднения к параметрам напряженно-деформированного состояния расчетной области, вычислили модуль упругости E , коэффициент Пуассона μ и пошагово получали диаграмму нагружения представительного объема [25]. Диаграммы нагружения композита СВМПЭ+20% по массе ПП при разной температуре получали с учетом нелинейности диаграмм нагружения СВМПЭ при разных температурах [26]. Предел текучести σ_y композиции в целом вычисляли, приняв, что в 20% объема расчетной области материала достигнут предел текучести.

Табл. 1

Значения свойств материалов, используемые при расчете

Материал	ρ , г/см ³	C , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	μ	E , МПа	σ_y , МПа
СВМПЭ	0,934	1,8	0,42	0,45	711	21,6
ПЭЭК	1,308	1,34	0,25	0,38	2840	105
ПП	0,850	1,93	0,20	0,46	1200	34
КУВ	1,800	800	200	0,25	250000	-
СВМПЭ+ +20% по массе ПП	0,901	1,8	0,36	0,45	1037	25,5

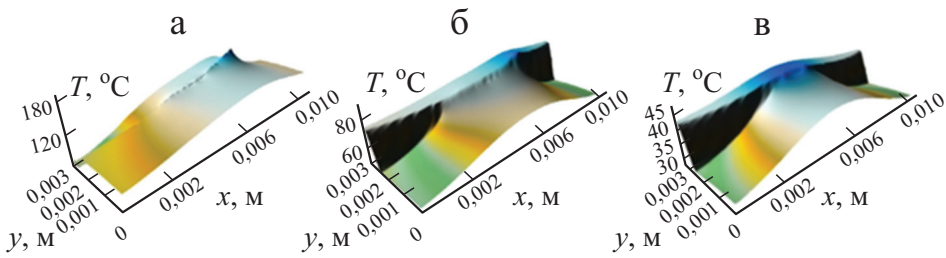


Рис. 2. Поверхности распределения температуры в расчетной области при трении и $\lambda = 0,25$ (а); 5 (б); 10 Вт/(м·К) (в).

Коэффициент теплопроводности λ вычисляли на основе решения стационарной задачи теплопроводности. Теплоемкость C и плотность ρ вычисляли по формулам теории смесей. Методики расчета эффективных теплофизических свойств и тестовые примеры приведены в работах [25, 27].

Коэффициент трения для пары ПЭЭК—СВМПЭ+20% по массе ПП (оба компонента изготовлены методом 3D-печати) был равен 0,3. Его значение в работе определяли экспериментально в режиме сухого трения по схеме палец—диск на трибометре CSEM CH-2000 (ASTM G99).

Анализ поверхностей распределения температуры тел на контакте при разных значениях λ контртела (рис. 2) показал, что при $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К) (см. рис. 2—а) полимерная колодка и полимерное контртело прогреваются практически одинаково, так как их значения коэффициента теплопроводности достаточно близки (см. табл. 1); температура при этом превышает 150 °С.

На свободных границах образца температура контртела на 80—100 °С ниже, чем на контактной поверхности, что можно объяснить влиянием естественной конвекции. Последнюю задавали величиной коэффициента теплоотдачи от свободных поверхностей в окружающую среду: для вала 30 Вт/(м²·К), а для колодки — 20 Вт/(м²·К).

При повышении коэффициента теплопроводности (см. рис. 2—б, в) контртело прогревается равномерно, а температура на контакте снижается за счет того, что с увеличением коэффициента теплопроводности увеличивается и теплоотдача. Коэффициент теплоотдачи от свободных поверхностей в окружающую среду при этом для вала увеличивался до 60 и 80 Вт/(м²·К) пропорционально росту коэффициента теплопроводности — 5 и 10 Вт/(м·К) соответственно.

В силу того что коэффициенты теплоотдачи являются функцией некоторых параметров (коэффициента теплопроводности, температуры, теплоемкости, площади и др.), его сложно оценить без экспериментальных данных. Поскольку размеры расчетной области приняты меньше реальных (физических), то даже экспериментально измеренные значения коэффициента теплоотдачи не будут соответствовать условиям проведения расчетов.

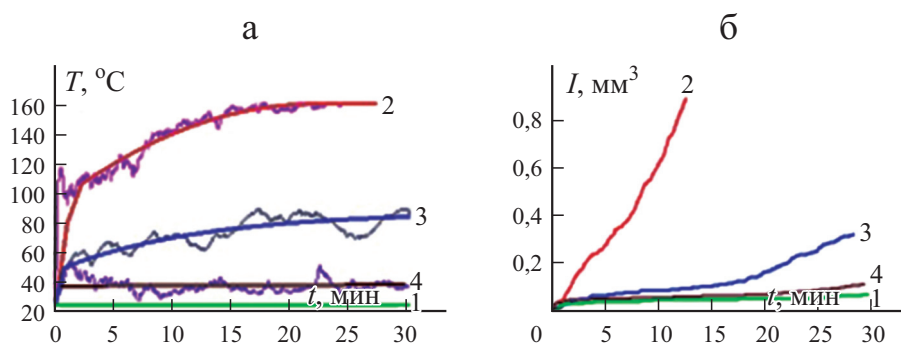


Рис. 3. Зависимость температуры T на контакте (а) и объемного износа I (б) от времени t без учета изменения температуры (1); с учетом изменения температуры при $C = 0,25$ (2); 5 (3); 10 Вт/(м·К) (4).

В связи с этим коэффициенты теплоотдачи для пары трения ПЭЭК—СВМ-ПЭ+20% по массе ПП подбирали таким образом, чтобы температура на контакте соответствовала экспериментально измеряемой. С увеличением коэффициента теплопроводности пропорционально увеличивается и коэффициент теплоотдачи.

На рис. 3 представлены временные изменения температуры на контакте и объемного износа для трибопары ПЭЭК—СВМПЭ+20% по массе ПП. Моделировали условия сухого трения скольжения. Видно, что температура интенсивно возрастает и уже через 10 мин после начала трибоагружения достигает 150 °С (см. кривую 2 рис. 3—а), что является следствием высокого коэффициента трения и низкого коэффициента теплопроводности сопрягаемых полимеров. Повышение температуры приводит к заметному снижению таких прочностных свойств полимеров, как предел текучести и модуль упругости, и, как следствие, к интенсивному износу (см. кривую 2 рис. 3—б).

В случае, когда свойства материала принимали постоянными, как при $T = 25$ °С (см. кривую 1 рис. 3—а), износ становился небольшим (см. кривую 1 рис. 3—б), даже несмотря на высокий коэффициент трения.

Для отвода тепла из зоны контакта и снижения температуры контактирующих тел необходимо повысить их теплопроводность. Это достигается добавлением в полимеры (в том числе в контртело из ПЭЭК) углеродных наполнителей, в частности, коротких углеродных волокон (КУВ) или углеродных нанотрубок (УНТ).

Для оценки влияния наполнителей на физико-механические свойства в рамках численного моделирования рассчитывали эффективные свойства двух типов композитов:

1) ПЭЭК, наполненного короткими углеродными волокнами (КУВ, средняя длина 40 мкм); расположение включений по расчетной области предполагали равномерным (рис. 4—а).

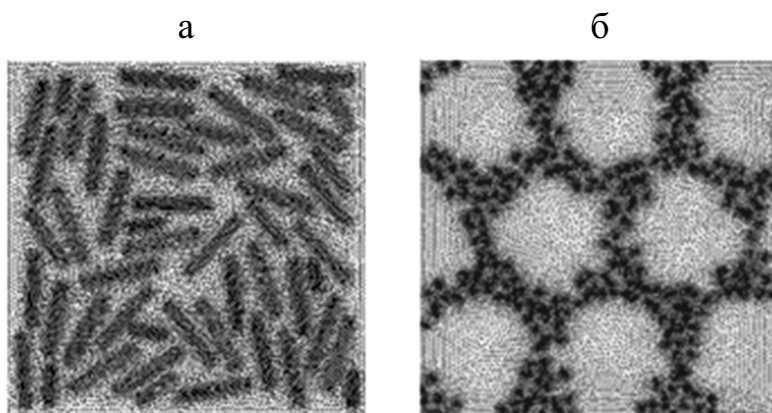


Рис. 4. Расчетная область с конечно-элементной сеткой для композитов ПЭЭК + 30% по массе КУВ (а); ПЭЭК + 10% по массе УНТ (б).

2) ПЭЭК с углеродными нанотрубками (УНТ, внешний диаметр 60 нм, средняя длина 2 мкм).

Эффективные свойства наполненных композиций определяли аналогично определению свойств композита СВМПЭ+20% по массе ПП.

При моделировании представительного объема наполненных композиций на основе ПЭЭК включения УНТ располагались вокруг частиц ПЭЭК, средний размер (диаметр) которых был равен 70 мкм. На рис. 4—б показана расчетная область в виде представительного объема размером 200×200 мкм с нанесенной сеткой конечных элементов. Размеры элементов зависят от размеров включений и соблюдения равномерности разбиения сетки, поэтому в области включений элементы значительно мельче. По причине большого количества элементов и узлов сетки система уравнений содержала в среднем до 30 000 уравнений. Поскольку современные вычислительные средства позволяют решать такие системы уравнений в течение нескольких секунд, затраты на вычисление эффективных свойств композитов небольшие.

КУВ распределены равномерно по расчетной области и не контактировали между собой (см. рис. 4—а), нанотрубки расположены вокруг частиц ПЭЭК и образовывали непрерывные цепочки (перколяционный каркас, рис. 4—б). Эффективные свойства определяли с учетом такого характера распределения включений. Чтобы оценить влияние расположения и геометрии включений на эффективные свойства композитов, физико-механические свойства КУВ и УНТ принимали (условно) одинаковыми.

В табл. 2 приведены результаты расчетов среднестатистического характера.

Полученные данные свидетельствуют о том, что с повышением степени наполнения увеличиваются плотность, коэффициент теплопроводности, модуль упругости, предел прочности по сравнению с ненаполненным

Табл. 2.

Расчетные значения физико-механических свойств ПЭЭК и композиций ПЭЭК + $n\%$ по массе КУВ и ПЭЭК + $n\%$ по массе УНТ

Содержание наполнителя, % по массе	ρ , г/см ³	λ , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)	E , МПа	σ_y , МПа	ε_y
КУВ						
+10	1,359	0,44	1268	4433	120	2,75
+23	1,420	0,70	1183	6501	114	1,75
+30	1,457	0,90	1138	7510	93	1,25
УНТ						
+7	1,359	1,75	1209	6371	150	2,75
+10	1,359	2,10	1209	8235	198	2,50
+23	1,424	3,52	1132	18460	134	0,75
+30	1,456	6,87	1096	31843	80	0,25

ПЭЭК. В то же время деформация ε_y , соответствующая пределу текучести, снижалась.

В случае решения задачи теплопроводности сформированный перколяционный каркас из УНТ (рис. 5—б) способствовал увеличению теплопроводности по сравнению с введением дисперсных КУВ (см. рис. 5—а). Так, из данных табл. 2 видно, что чем больше степень наполнения, тем выше коэффициент теплопроводности, так как сеть теплопроводящих включений плотнее.

На рис. 6—а приведено распределение деформаций и напряжений по представительному объему для композиции ПЭЭК + 30% по массе КУВ, на рис. 6—б — в образце ПЭЭК + 10% по массе УНТ. Видно, что деформации и напряжения композитов распределяются по-разному за счет

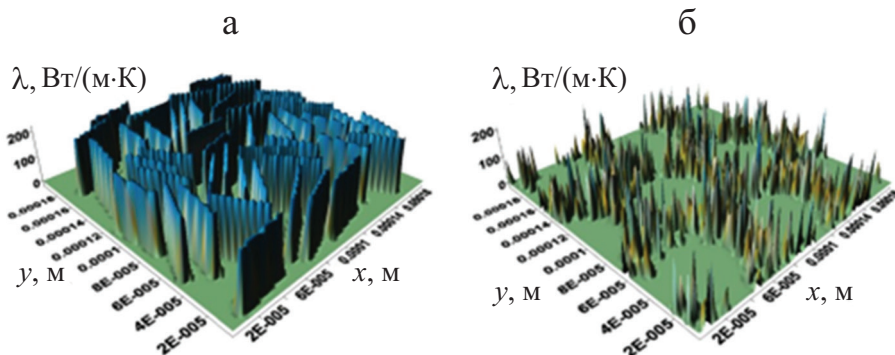


Рис. 5. Распределение коэффициентов теплопроводности λ по представительному объему для композитов ПЭЭК + 30% по массе КУВ (а); — ПЭЭК + 10% по массе УНТ (б).

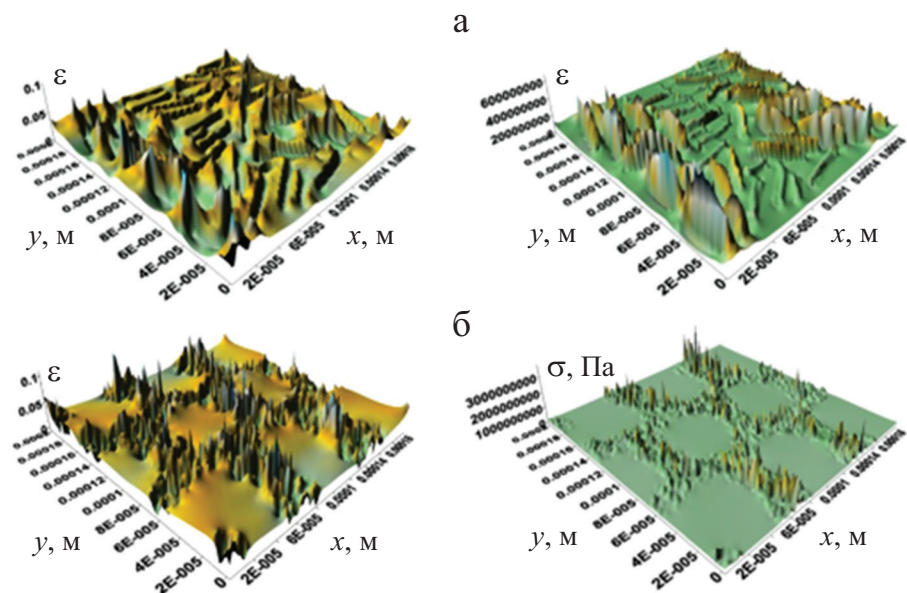


Рис. 6. Распределение интенсивности деформаций и напряжений при одноосном растяжении представительного объема композитов ПЭЭК + 30% по массе КУВ (а); ПЭЭК + 10% по массе УНТ (б).

расположения включений и их размера. С одной стороны, “каркас”, образованный частицами нанонаполнителя, препятствует деформированию расчетной области, с другой, — включения намного меньше по размерам и концентрация напряжений, вызванная их наличием, соответственно меньше (известно, что концентрация напряжений возрастает с увеличением неоднородности при анализе области ограниченных размеров [28]).

Таким образом, наполнение ПЭЭК углеродными нанотрубками одновременно повышает теплопроводность и прочность композитов на основе ПЭЭК.

3. Трибоиспытания композитов ПЭЭК по композиту СВМПЭ+20% по массе ПП в условиях сухого трения и граничной смазки

Для верификации полученных расчетных данных проведены экспериментальные триботехнические испытания ПЭЭК и его композитов при трении по СВМПЭ+20% по массе ПП в режиме сухого трения и граничной смазки на машине трения 1070 СМТ-1 по схеме вал—колодка. ПЭЭК был армирован двумя типами углеродных волокон — КУВ и УНВ. Диаметр контртела (вала) из ПЭЭК и композитов на его основе 35 мм. Размер колодки из композита СВМПЭ+20% по массе ПП в форме параллелепипеда 16×10×8 мм. В качестве граничной смазки использовали водный раствор

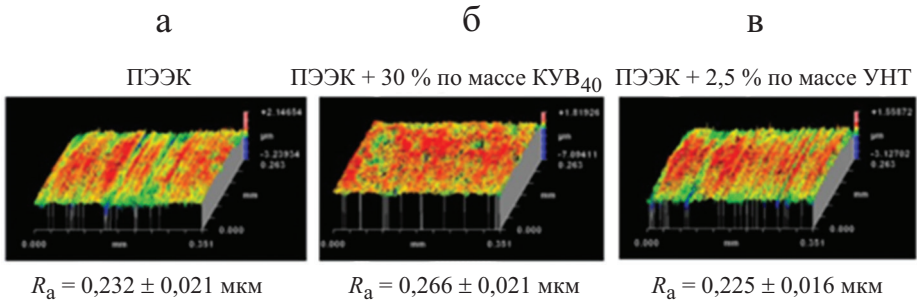


Рис. 7. 3D-профилограммы поверхностей дорожек трения с указанием значений шероховатости R_a .

хлорида натрия NaCl с массовой долей 0,9% (т.н. физиологический раствор). Параметры трибоиспытаний следующие: нагрузка 40 Н, скорость скольжения 0,3 м/с, путь трения 1000 м.

В качестве реперной точки использовали ненаполненный ПЭЭК. Износ СВМПЭ-колонки определяли по площади профиля дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor).

На рис. 7 приведены профилограммы поверхностей с указанием шероховатости R_a ПЭЭК-контртел (исходная шероховатость ПЭЭК-вала $R_a = 0,2$ мкм). Видно, что независимо от типа композита значения R_a по окончании трибоиспытаний сопоставимы и не превышают 0,27 мкм. Равенство значений R_a для трех типов образцов свидетельствует о подобии механизма их изнашивания (видны микророзды, ориентированные в направлении скольжения контртела).

Данные об интенсивности износа WF (Wear Factor) композита СВМПЭ+ +20% по массе ПП при трении по контртелу из ПЭЭК с углеродными

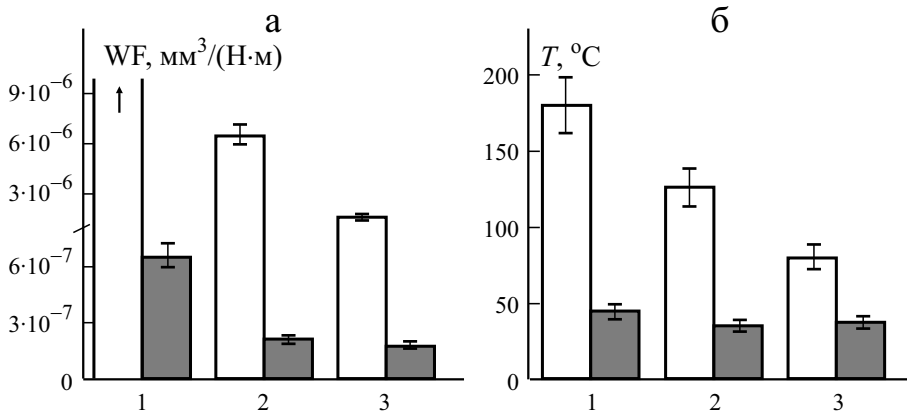


Рис. 8. Интенсивность износа WF композита СВМПЭ+20% по массе ПП (а) и температура на контакте при трении с контртелом (б): 1 — ПЭЭК; 2 — ПЭЭК+30% по массе КУВ; 3 — ПЭЭК+2,5% по массе УНТ. □ — сухое трение; ■ — граничная смазка.

наполнителями, полученные при нагрузке 40 Н, скорости скольжения 0,4 м/с, приведены на рис. 8—*a*. Видно, что в трибосопряжении ПЭЭК—СВМПЭ+20% по массе ПП в условиях сухого трения температура наибольшая и превышает 170 °С. В результате износ был очень большой, и его невозможно было оценить имеющимися в распоряжении исследователей методами. По этой причине данные о нем не приведены на диаграмме (рис. 8—*б*). При использовании контртела ПЭЭК + 30% по массе КУВ температура близка к температуре плавления СВМПЭ (120 °С), что вызывает большие пластические деформации в образце и соответственно большой объемный износ (см. рис. 8—*б*).

Износостойкость композита СВМПЭ+20% по массе ПП при трибосопряжении с ПЭЭК, наполненным УНТ, в условиях сухого трения скольжения в 4,5 раза выше, чем наполненным КУВ: $6,5 \cdot 10^{-6}$ и $1,45 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м) соответственно (см. рис. 8—*a*). Причиной повышения износостойкости является уменьшение нагрева за счет повышения теплопроводности контртела.

На рис. 8—*б* показано, что введение УНТ в ПЭЭК в условиях сухого трения скольжения приводит к снижению температуры в 2,2 раза по сравнению с ненаполненным ПЭЭК. При этом добавление КУВ снижает температуру контртела лишь на 30%. В условиях смазочной среды температура на контакте кратно ниже. Дополнительно отметим, что в условиях граничной смазки интенсивность износа композита СВМПЭ+20% по массе ПП близка при введении в ПЭЭК обоих типов наполнителей (см. рис. 8—*a*).

На рис. 9 приведены фотографии поверхностей трения композита СВМПЭ+20% по массе ПП после испытания в условиях сухого трения и граничной смазки. При испытании в паре с ПЭЭК в условиях сухого трения на поверхности трения композита СВМПЭ+20% по массе ПП (рис. 9—*a*) наблюдается образование наплывов. Они вызваны пластической деформацией вследствие фрикционного нагрева полимера (выше температуры плавления СВМПЭ). В подобных условиях унос материала носит катастрофический характер, поэтому поверхность в целом является гладкой, а некоторая ее «шероховатость» обусловлена адгезионным взаимодействием контактирующих нагретых материалов, составляющих пару трения (см. рис. 8—*б*; температура превышает 170 °С). При трении в условиях граничной смазки на поверхности трения наблюдаются лишь одиночные неглубокие борозды, хотя сама поверхность выглядит достаточно гладкой (см. рис. 9—*б*).

При сухом трении скольжения в паре ПЭЭК+30% по массе КУВ — СВМПЭ+20% по массе ПП на поверхности композита СВМПЭ (см. рис. 9—*в*) наблюдали образование крупных наплывов (протяженность каждого не менее 100 мкм). Также фиксировались единичные борозды, ориентированные вдоль направления скольжения. В этом случае температура была близка к температуре плавления СВМПЭ. В этой связи появление подобного вида наплывов является термически индуцированным

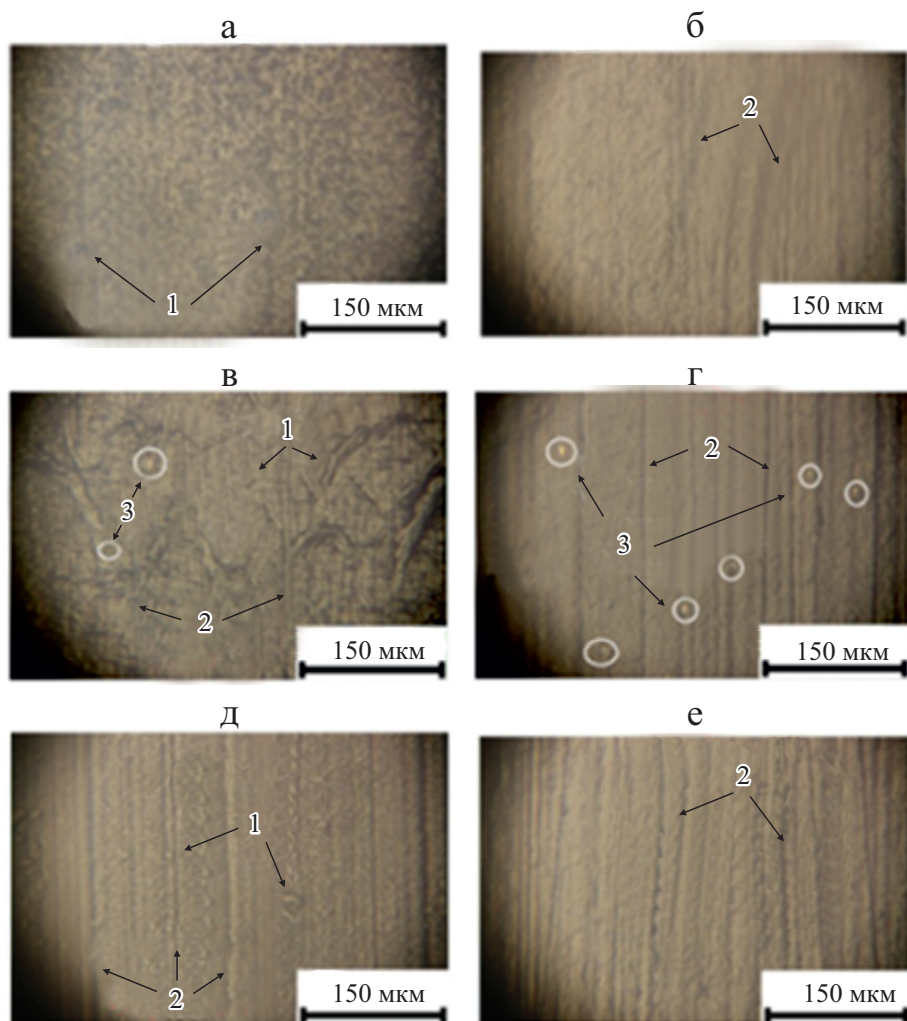


Рис. 9. Микрофотографии поверхностей износа композита СВМПЭ+20% по массе ПП: трибосопряжение с ПЭЭК, сухое трение (а), граничная смазка (б); трибосопряжение с композитом ПЭЭК + 30% по массе КУВ, сухое трение (в), граничная смазка (г); трибосопряжение с композитом ПЭЭК + 2,5% по массе УНТ, сухое трение (д); граничная смазка (е). 1 — наплывы; 2 — борозды; 3 — углеволокна.

явлением. Пластифицированный поверхностный слой течет и гофрируется, что и приводит к формированию подобных складок.

При трении в граничной смазке на поверхности трения наблюдаются нерегулярные борозды, ориентированные в направлении скольжения контртела (см. рис. 9—г). Разрушение углеродных волокон, следы пропахивания которыми наблюдаются на поверхности трения СВМПЭ-композита, обусловили признаки микроабразивного изнашивания.



Рис. 10. Фотографии образцов СВМПЭ + 20% по массе ПП после трибоиспытаний: а — трение по ПЭЭК; б — трение по ПЭЭК + 2,5% по массе УНТ.

При сухом трении в трибопаре ПЭЭК + 2,5% по массе УНТ—СВМПЭ+20% по массе ПП на поверхности композита СВМПЭ (см. рис. 9—д) наблюдали образование единичных наплывов пластифицированного поверхностного слоя. Однако по причине невысокой температуры ($T \leq 100^\circ \text{C}$, см. рис. 8—б) это явление носило локализованный (единичный) характер. То же можно сказать и о продольных бороздах. При трении в режиме граничной смазки на поверхности трения также наблюдали микроборозды (см. рис. 9—е), ориентированные вдоль направления скольжения. При этом интенсивность износа композита СВМПЭ+20% по массе ПП при скольжении по нано- и микрокомпозитам на основе ПЭЭК примерно одинакова (см. рис. 8—а).

На рис. 10 для сравнения приведены результаты испытаний образцов СВМПЭ при скольжении по контртелам из ПЭЭК и ПЭЭК + УНТ в условиях сухого трения. Видно, что износ СВМПЭ-композита в трибопаре ПЭЭК—СВМПЭ + 20% по массе ПП (см. рис. 10—а) значительно больше, чем в случае наполнения ПЭЭК углеродными нанотрубками (см. рис. 10—б).

Таким образом, по причине большего снижения температуры на трибоконтакте более эффективным наполнителем для ПЭЭК при его сухом трении скольжения по СВМПЭ являются УНТ по сравнению с введением КУВ.

Выводы

Для решения задачи отвода тепла исследованы полимерные композиты, содержащие углеродные волокна нано- и микроразмера. Использована модель процесса трения и изнашивания применительно к полимер-полимерной паре трения ПЭЭК—СВМПЭ.

Увеличение теплопроводности контртела на основе ПЭЭК за счет введения УНТ существенно снижает температуру в области трибоконтакта,

что приводит к меньшему снижению предела текучести образца СВМПЭ+ +20% по массе ПП в зоне контакта и соответственно к меньшему износу.

Показано, что введение частиц и/или волокон для повышения теплопроводности играет двоякую роль. С одной стороны, отвод тепла снижает температуру непосредственно в зоне контакта, в результате предел текучести снижается в меньшей степени и износ уменьшается. С другой стороны, наличие включений приводит к появлению зон концентрации напряжений в их окрестности и локализации деформаций в относительно податливой матрице. Поскольку включения меньших размеров вызывают меньшие концентрации напряжений, использование углеродных нанотрубок более эффективно, чем углеродных волокон.

Благодарность. Работа выполнена по государственному заданию ИФПМ СО РАН (FWRW-2021-0010). Авторы выражают благодарность РФФИ и БРФФИ за финансирование исследования в рамках проекта № 20-58-00032_Бел_а (Т20Р-223).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cowie R. M., Briscoe A., Fishera J., Jennings L. M. Wear and Friction of UHMWPE-on-PEEK OPTIMA // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. — 2019. — Vol. 89. — P. 65—71.
2. Scholes S., Unsworth A. Wear studies on the likely performance of CFR-PEEK/CoCrMo for use as artificial joint bearing materials // J. Mater. Sci. Mater. Med. — 2009. — Vol. 20. — P. 163—170.
3. East R. H., Briscoe A., Unsworth A. Wear of PEEK-OPTIMA and PEEKOPTIMA-Wear performance articulating against highly cross-linked polyethylene // Proc. IMechE. Part H: J. Eng. Med. — 2015. — Vol. 229(3). — P. 187—193.
4. Černe B., Duhovnik J., Tavčar J. Semi-analytical flash temperature model for thermoplastic polymer spur gears with consideration of linear thermo-mechanical material characteristics // J. Comput. Des. Eng. — 2019. — Vol. 6 (4). — P. 617—628.
5. Ramesh V., Kuilenburg J. V., Wits W. W. Experimental analysis and wear prediction model for unfilled polymer-polymer sliding contacts // Tribol. Trans. — 2019. — Vol. 62(1). — P. 1—13.
6. Hoskins T. J., Dearn K. D., Chen Y. K., Kukurek S. N. The wear of PEEK in rolling-sliding contact — simulation of polymer gear applications // Wear. — 2014. — Vol. 309. — P. 35—42.
7. Burger N. et al. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory // Prog. Polym. Sci. — 2016. — Vol. 61. — P. 1—28.
8. Zheng X. et al. Enhancement of thermal conductivity of carbon fiber-reinforced polymer composite with copper and boron nitride particles // Composites: Part A. — 2019. — Vol. 121. — P. 449—456.
9. Li M. et al. Stress induced carbon fiber orientation for enhanced thermal conductivity of epoxy composites // Composites: Part B. — 2021. — Vol. 208. — P. 108599.

10. *Chen B., Wang J., Yan F.* Comparative investigation on the tribological behaviors of CF/PEEK composites under sea water lubrication // *Tribol. Int.* — 2012. — Vol. 52. — P. 170—177.
11. *Lu M., Zheng F., Wang Q., Wang T., Liang Y.* Friction and wear behaviors of carbon and aramid fibers reinforced polyimide composites in simulated space environment // *Tribol. Int.* — 2015. — Vol. 92. — P. 246—254.
12. *Yamamoto Y., Hashimoto M.* Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts: Part 2. Composites with carbon or glass fibre // *Wear.* — 2004. — Vol. 257(1—2). — P. 181—189.
13. *Müser M. H., Dapp W. B., Bugnicourt R., et al.* Meeting the contact-mechanics challenge // *Tribol. Lett.* — 2017. — Vol. 65. — P. 118.
14. *Persson B. N. J.* Theory of rubber friction and contact mechanics // *J. Chem. Phys.* — 2001. — Vol. 115, No. 8. — P. 3840—3861.
15. *Putignano C., Afferrante L., Carbone G., Demelio G.* A new efficient numerical method for contact mechanics of rough surfaces // *Int. J. Solids Struct.* — 2012. — Vol. 49(2). — P. 338—343.
16. *Akchurin A., Bosman R., Lugt P. M.* A stress-criterion based model for the prediction of the size of wear particles in boundary lubricated contacts // *Tribol. Lett.* — 2016. — Vol. 64, No. 35. — P. 35.
17. *Belyak O. A., Suvorova, T. V.* Predicting the mechanical properties of antifriction composite materials // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57. — P. 647—656.
18. *Chebakov M. I., Danilchenko S. A.* Wear simulation of a spherical hinge joint with a thin composite coating // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 5. — P. 667—674.
19. *Buczowski R., Kleiber M.* Statistical models of rough surfaces for finite element 3D-contact analysis // *Arch. Comput. Methods Eng.* — 2009. — Vol. 16. — P. 399—424.
20. *Ding J., McColl I. R., Leen S. B., Shipway P. H.* A finite element based approach to simulating the effects of debris on fretting wear // *Wear.* — 2007. — Vol. 481. — P. 481—491.
21. *Popov V. L., Psakhie S. G.* Numerical simulation methods in tribology // *Tribol. Int.* — 2007. — Vol. 40. — P. 916—923.
22. *Yang C., Persson B. N. J.* Molecular dynamics study of contact mechanics: contact area and interfacial separation from small to full contact // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 100. — P. 024303.
23. *Bochkareva S. A., Grishaeva N. Y., Buslovich D. G., Kornienko L. A., Lyukshin B. A., Panin S. V., Panov I. L., Dontsov Y. V.* Development of a wear-resistant extrudable composite material based on an ultrahigh-molecular polyethylene with predetermined properties // *Mech. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 56, No. 1. — P. 15—26.
24. *Bochkareva S. A., Panin S. V., Lyukshin B. A., Grishaeva N. Yu., Matolygina N. Y., Aleksenko V. O.* Simulation of frictional wear with account of temperature for polymer composites // *Phys. Mesomech.* — 2020. — Vol. 23, No. 2. — P. 147—159.
25. *Гришаева Н. Ю., Люкшин П. А., Люкшин Б. А., Панин С. В., Бочкарева С. А., Реутов Ю. А., Матолыгина Н. Ю.* Модификация теплофизических характеристик полимеров введением микронаполнителей // *Механика композиц. материалов и конструкций.* — 2016. — Т. 22, № 3. — С. 342—361.
26. *Андреева И. Н., Веселовская Е. В., Наливайко Е. И. и др.* Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. — Л.: Химия, 1982. — 80 с.

27. *Bochkareva S. A., Grishaeva N. Yu., Lyukshin B. A., Lyukshin P. A., Matolygina N. Yu., Panin S. V., Reutov Yu. A.* A unified approach to determining the effective physicommechanical characteristics of filled polymer composites based on variational principles // *Mech. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 54, No. 6. — P 775—788.

28. *Петерсон Р.* Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. — М.: Мир, 1977. — 302 с.

Поступила в редакцию 12.01.2022

Окончательный вариант поступил 28.02.2022

Received Jan. 12, 2022 (Feb. 28, 2022)
