

## АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПАРАХ ТРЕНИЯ С ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ

Е. Б. СЕДАКОВА<sup>1,2</sup>, Ю. П. КОЗЫРЕВ<sup>1</sup>, Ли Сяньшунь<sup>2</sup>, В. Е. ЖАРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия

Экспериментально исследована износостойкость политетрафторэтилена, его композита Ф4К20, полиэфирэфиркетона и сверхвысокомолекулярного полиэтилена при трении скольжения по углеродистой и легированной стали. Показано, что в парах трения с легированной сталью может возникать температурный режим, при котором активируются реакции химического взаимодействия никеля и полимера. Эти реакции в присутствии политетрафторэтилена и его композита приводят к образованию прочных пленок переноса и расширению диапазона рабочих нагрузок, а в случае полиэфирэфиркетона и сверхвысокомолекулярного полиэтиленом — к более интенсивному нагреву полимеров и сокращению диапазона нагрузок приблизительно в два раза.

**Ключевые слова:** трение, износ, никель, легированная сталь, полимер, адгезия, температура на контакте, коэффициент трения, коэффициент износа

**Введение.** Полимеры достаточно широко применяются в машиностроении в качестве конструкционных материалов. В узлах трения все чаще используются полукристаллические полимеры, физико-механические свойства которых наиболее полно отвечают условиям эксплуатации узлов трения машин. К числу триботехнически важных свойств полимерных материалов относят низкий коэффициент трения, способность работать без смазочного материала, малый удельный вес, достаточную прочность, высокую химическую стойкость к агрессивным средам. Такие материалы хорошо выдерживают возникающие при трении температуры и способны работать в условиях Крайнего Севера. В полукристаллических полимерах наряду с кристаллической фазой содержится достаточно много аморфной фазы [1]. При получении материалов этой группы применяется особая порошковая технология. Основой этой технологии является получение материала путем прессования исходных порошков под давлением, спекания при температуре, несколько превышающей температуру плавления кристаллической фазы, с последующим управляемым охлаждением. Скорость охлаждения является важным параметром технологического процесса, так как от нее зависит степень кристалличности получаемого материала [2]. К группе полукристаллических полимеров относятся, например, политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ).

ПТФЭ (химическая формула  $(-C_2F_4-)_n$ ), относящийся группе фторопластов, способен работать при температуре от  $-60$  до  $+250$  °С, он имеет очень низкий коэффициент трения (порядка 0,1—0,2) и по химической стойкости превосходит все известные синтетические материалы [3]. Однако ПТФЭ в чистом виде почти не применяют из-за хладотекучести и низкой энергии активации (7 ккал/моль), что при трении приводит к деформированию его поверхностных слоев и значительному износу даже при низких нагрузках. Для увеличения несущей способности изделий и значительного снижения интенсивности изнашивания в ПТФЭ вводятся различные типы наполнителей. Поэтому в машиностроении используют в основном

композиционные материалы на основе ПТФЭ, например Ф4К20, содержащий 80 об.% ПТФЭ и 20 об.% литейного кокса.

Содержащий эфирную и кетонную группы ПЭЭК может работать в узлах трения без смазочного материала при температуре до 240 °С. ПЭЭК также имеет низкий коэффициент трения, обладает высокой химической стойкостью [3].

Прочностные свойства СВМПЭ (химическая формула  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ ) превосходят подобные характеристики всех других полукристаллических полимеров. Кроме того, он обладает хорошими триботехническими характеристиками, в том числе достаточно высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения без смазочного материала. Однако верхняя граница диапазона рабочих температур СВМПЭ не превышает 100 °С. СВМПЭ применяется в качестве биополимера в медицине, а также в различных областях машиностроения для изделий, стойких к удару, растрескиванию и истиранию [3, 4].

В узлах трения полимеры работают в контакте с различными сталями, часто при отсутствии смазочного материала [5, 6]. При этом стали могут существенно различаться по своим физико-механическим свойствам. Известно, что для улучшения механических и физических свойств в сталь вводят различные химические элементы — легирующие добавки. Однако особенность химического строения ряда полимеров приводит при определенных температурах к их повышенному износу вследствие химического взаимодействия с легирующими элементами [7—9].

Для сравнительного анализа влияния легирующих элементов на износостойкость полимеров в качестве исходного материала контртел использовались углеродистая сталь 45 ГОСТ 1050–88, а также легированная сталь 18Х2Н4МА ГОСТ 10702–78. Согласно маркировке, в составе 18Х2Н4МА имеются легирующие добавки: хром, никель, марганец, медь, молибден и кремний. Если меди, марганца, молибдена и кремния в ней содержится менее 1 мас.%, то содержание хрома может достигать 2 мас.%, а никеля — 4,4 мас.%. Поэтому можно допустить, что на триботехнические характеристики пар трения „исследуемый полимер—сталь 18Х2Н4МА“ основное влияние оказывает никель. Никель относится к материалам с высокой твердостью, также он характеризуется высокой коррозионной и химической стойкостью. Введение никеля повышает вязкость и коррозионную стойкость стали, увеличивает сопротивление распространению трещин. Химическая стойкость никеля обусловлена склонностью к пассивированию, т.е. к образованию на поверхности оксидных пленок, обладающих сильным защитным действием [10].

Цель настоящей работы — исследование влияния никеля, входящего в состав легированной стали контртела в качестве преобладающего элемента, на триботехнические характеристики ПТФЭ, его композита Ф4К20, а также ПЭЭК и СВМПЭ.

Экспериментальная часть. Триботехнические испытания полимерных образцов в парах трения со сталями проводились по схеме „кольцо—плоскость“ на трибометре [11]. В качестве электропривода использовался двигатель постоянного тока ДТ550-ПГ ТУ 1-531-0044-89 с максимальным током 6 А и номинальной мощностью 700 Вт. Зафиксированное на валу электродвигателя стальное контртело (рабочая поверхность — кольцо диаметром 10×8 мм) контактировало с образцом (20×25×5 мм). Контртела были изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050–88 и стали 18Х2Н4МА ГОСТ 10702-78. Перед каждым испытанием контактная поверхность контртел обрабатывалась наждачной бумагой с зернистостью 1200 для придания требуемой шероховатости.

Испытания износостойкости полимерных образцов проводились при окружной скорости скольжения  $v = 0,6$  м/с и таких значениях контактного давления  $p$ , чтобы диапазон совместной нагрузки  $pv$  находился в пределах 0,1—2 МПа·м/с. По окончании испытаний определялась величина массового износа  $\Delta m$  путем взвешивания образца. Критерием износостойкости полимерных материалов служил коэффициент износа  $K$ :

$$K = \Delta m / \rho N L_T, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность полимера,  $N$  — внешняя нагрузка,  $L_T$  — путь трения.

Коэффициент трения  $f$  определялся по соотношению, предложенному в [11], с учетом разности между произведением напряжения  $U_\Sigma$  и тока электродвигателя  $I_\Sigma$ , нагруженного моментом трения, и этими же величинами, полученными в режиме холостого хода двигателя,  $U_{xx}$  и  $I_{xx}$ :

$$f = \frac{0,5(U_\Sigma I_\Sigma - U_{xx} I_{xx})}{Nr2\pi n}, \quad (2)$$

где  $r$  — средний радиус контртела;  $n$  — частота вращения вала двигателя.

По разработанной методике [11] определялась температура в зоне трения „полимер—стальное контртело“. Для этого с помощью бесконтактного инфракрасного термометра UT302C измерялась температура в центре боковой грани полимерного образца в конце испытаний после прохождения пути трения  $L_T = 1000$  м. Эта температура принималась за объемную температуру образца.

Мощность фрикционного нагрева полимерного образца определялась как

$$P = (1 - K_T) f p v S_H, \quad (3)$$

где  $K_T$  — коэффициент распределения тепловых потоков, зависящий от структуры сталей [12]

$$K_T = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (4)$$

$\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности металлического контртела и полимерного образца соответственно;  $p$  — контактное давление;  $v$  — скорость скольжения;  $S_H$  — площадь номинального контакта.

Для расчета величины фрикционного нагрева полимера на контакте использовалось соотношение [11]:

$$t_{cp} = \frac{P\varphi}{\lambda L} + \Delta t_p + t_c, \quad (5)$$

где  $L$  — средний линейный размер грани полимерного объема;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\varphi$  — коэффициент, определяемый по номограммам [13];  $\Delta t_p$  — средний температурный напор по результатам измерений;  $t_c$  — температура окружающей среды.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рис. 1, а, б приведены интерполяционные зависимости, построенные по экспериментальным значениям коэффициента износа, определенного по (1), от совместной нагрузки для ПТФЭ и Ф4К20, при трении по углеродистой стали 45 и легированной стали 18Х2Н4МА.

В работе [8] проанализирована модель адгезионного износа пары трения „ПТФЭ—металл“. На рис. 1 видны участки обратной зависимости  $K$  от  $p v$ , которые соответствуют проявлению адгезионного механизма изнашивания. Так как адгезионный механизм изнашивания предпочтителен для пары трения „полимер—сталь“, то за верхний предел предпочтительного диапазона нагрузок следует принять величину  $p v$  в минимуме кривых рис. 1. По данным рис. 1, а, для пары трения „ПТФЭ—сталь 45“ (кривая 1) минимальной величине коэффициента износа соответствует  $p v = 0,1$  МПа м/с, а для „ПТФЭ—сталь 18Х2Н4МА“ (2) —  $p v = 0,2$  МПа м/с. По-видимому, это объясняется наличием присадок в легированной стали, которые вступают в реакцию с молекулами ПТФЭ и создают фториды, способные увеличивать прочность связи между пленкой переноса ПТФЭ и контртелом. Ранее в экспериментальных исследованиях при изнашивании ПТФЭ по легированной стали была обнаружена способность никеля к образованию фторидов [14].

Проанализируем зависимости рис. 1, б. Из приведенных графиков следует, что при изнашивании Ф4К20 по исследуемым сталям наблюдается расширение приблизительно на порядок величины диапазона предпочтительных нагрузок. Так, для пары трения „Ф4К20—сталь 45“ (кривая 1) минимальной величине коэффициента износа соответствует  $p v = 1$  МПа м/с, а

для „Ф4К20—сталь 18Х2Н4МА“ (2) —  $pv=2$  МПа м/с. Такой эффект двукратного увеличения диапазона предпочтительных нагрузок при переходе от стали 45 к стали 18Х2Н4МА, так же как и в случае с чистым ПТФЭ, можно объяснить возможностью образования фторидов никеля, поскольку в составе композита Ф4К20 содержится 80 об.% ПТФЭ. Необходимо отметить, что величины коэффициента износа в парах трения с Ф4К20 приблизительно на два порядка ниже значений  $K$ , регистрируемых в парах трения с ПТФЭ. Диапазон контактных температур, рассчитанных по (5), при которых  $K$  резко возрастает при трении ПТФЭ по легированной стали, находится в пределах от 70 до 130 °С. Аналогичное поведение коэффициента износа наблюдается при трении композита Ф4К20: при трении по легированной стали коэффициент износа возрастает приблизительно в три раза, при  $pv=1,5—2,5$  МПа м/с, что соответствует диапазону контактных температур от 125 до 225 °С.

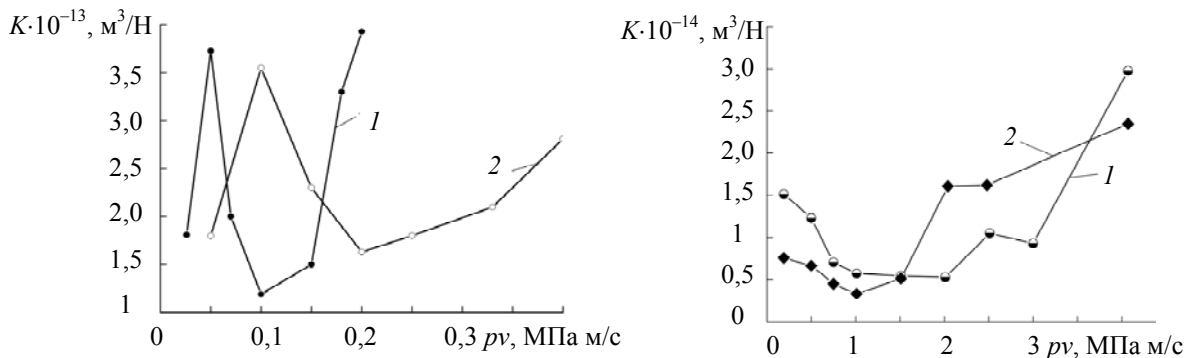


Рис. 1

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента трения, определенного по (2), от  $pv$  при изнашивании ПТФЭ и композита Ф4К20 по углеродистой и легированной сталям: кружки — „Ф4К20—сталь 18ХН4МА“, звездочки — „ПТФЭ—сталь 18ХН4МА“, треугольники — „Ф4К20—сталь 45“, квадраты — „ПТФЭ—сталь 45“. Из рисунка видно, что величина  $f$  в парах трения с композитом Ф4К20 в 2—3 раза ниже коэффициента трения в парах с ПТФЭ. По-видимому, это связано с уменьшением сдвиговых напряжений в композите Ф4К20. Кроме того, в парах трения с легированной сталью значение  $f$  несколько ниже, чем с углеродистой.

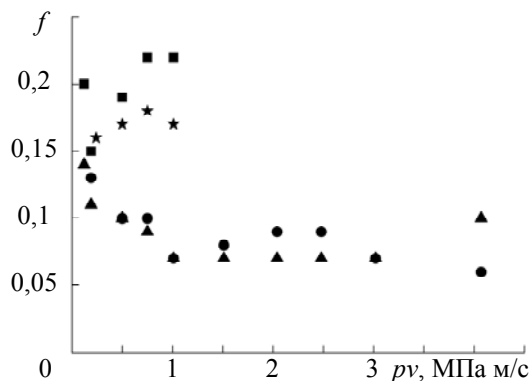


Рис. 2

Далее исследуем особенности взаимодействия других широко используемых в машиностроении полимеров с никелем, входящим в качестве преобладающего легирующего элемента в состав стали контртела 18Х2Н4МА — полиэфирэфиркетон и сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Они, в отличие от ПТФЭ, не содержат химически активных элементов, но в паре трения со сталью 18Х2Н4МА контактируют с защитными пленками, формируемыми за счет выраженных пассивирующих свойств никеля [10].

На рис. 3 приведены результаты исследования износостойкости ПЭЭК в парах трения с углеродистой и легированной сталью. В исследуемых парах трения наблюдается сходный характер изменения коэффициента износа с увеличением нагрузки. Однако относительной

стабильности величины коэффициента износа для пары трения „ПЭЭК—сталь 18Х2Н4МА“ (кривая 2) соответствует диапазон  $p\nu=0,22—0,4$  МПа м/с, для пары трения „ПЭЭК—сталь 45“ (1) —  $p\nu=0,18—0,8$  МПа м/с. Из рис. 2 следует, что при  $p\nu=0,57$  МПа·м/с наблюдается минимальное значение  $K$  в паре „ПЭЭК—сталь 45“, в то же время в паре трения „ПЭЭК—сталь 18Х2Н4МА“ при этом же значении  $p\nu$  имеет место увеличение коэффициента износа приблизительно на два порядка. Существенное возрастание коэффициента износа до  $1,3 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/Н наблюдается и в паре „ПЭЭК—сталь 45“, но при  $p\nu=1,13$  МПа м/с.

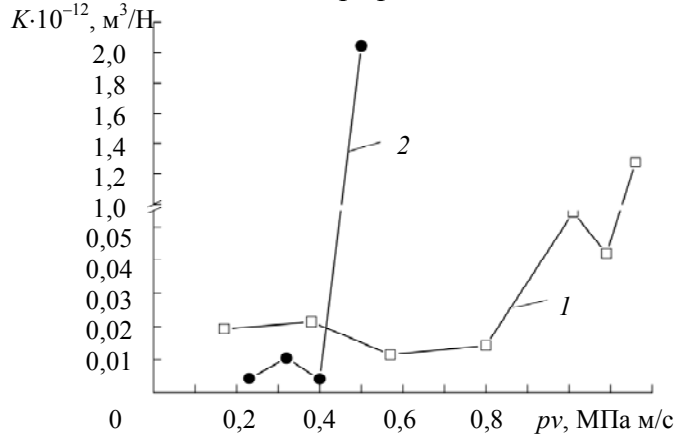


Рис. 3

В паре трения „ПЭЭК—сталь 45“ при нагрузке, соответствующей минимальному значению  $K$ ,  $t_{cp} = 128$  °С при  $f = 0,227$ . При этой же нагрузке в паре трения „ПЭЭК—18Х2Н4МА“ наблюдается катастрофически большой износ полимера. Необходимо отметить, что в этом случае температура в области контакта в 1,8 раз больше температуры в паре трения „ПЭЭК—сталь 45“ практически при той же нагрузке — 235 °С (близка к температуре плавления кристаллической фазы ПЭЭК). Отмеченный большой износ можно объяснить процессом схватывания между полимером и сталью 18Х2Н4МА, возникающим при повышении коэффициента трения и температуры на контакте [15]. По-видимому, процесс схватывания более интенсивен при трении по стали 18Х2Н4МА благодаря наличию в ней никеля в качестве легирующей добавки.

Необходимо отметить, что основным параметром для расчета контактной температуры полимера в узле трения является величина  $P$ , определяемая по (3) с учетом величины  $K_T$ , определяемой по (4), которая в значительной степени зависит от теплопроводности используемых стальных контртел  $\lambda_1$ . Так, для стали 45  $\lambda_1 = 74$  Вт/м·°С, а для 18Х2Н4МА  $\lambda_1 = 36$  Вт/м·°С [10].

На рис. 4 приведены интерполяционные зависимости коэффициента износа от совместной нагрузки, полученные по экспериментальным данным при изнашивании СВМПЭ по углеродистой (кривая 1) и легированной (2) сталям.

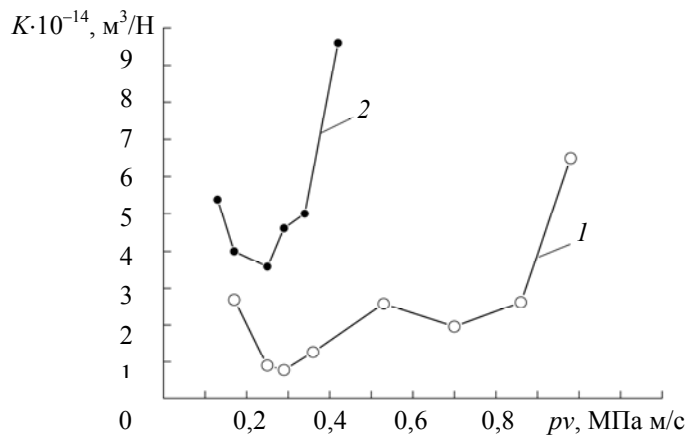


Рис. 4

Из рис. 4 следует, что при контакте со сталью 18Х2Н4МА износ СВМПЭ в исследуемом диапазоне выше приблизительно в 2,5 раза что, по-видимому, связано с более высокими значениями коэффициента трения для этой пары. На рис. 4 наблюдается сужение диапазона предпочтительных нагрузок в парах трения „СВМПЭ—легированная сталь“ по сравнению с парой „СВМПЭ—углеродистая сталь“. Нагрузки, при которых наблюдается повышенный износ полимера, для пары трения „СВМПЭ—сталь 45“ приблизительно два раза выше значений  $p\nu$  для пары трения „СВМПЭ—сталь 18Х2Н4МА“. В случае изнашивания СВМПЭ по стали 18Х2Н4МА при  $p\nu = 0,4$  МПа м/с величина  $K$  возрастает на порядок и достигает  $1 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/Н м. При этом  $f = 0,5$  и  $t_{cp} = 140^\circ\text{C}$ . В паре трения „СВМПЭ—сталь 45“ резкий подъем величины  $K$  до  $6 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/Н м происходит при  $p\nu = 1$  МПа м/с. При этом  $f = 0,3$  и  $t_{cp} = 138^\circ\text{C}$ . Указанные температуры близки к значениям температуры плавления кристаллической фазы СВМПЭ. По-видимому, значительное возрастание величины  $K$ , так же как и при изнашивании ПЭЭК, можно объяснить возникающим процессом схватывания между СВМПЭ и сталью 18Х2Н4МА.

### Выводы

1. В парах трения ПТФЭ и его композита Ф4К20 со сталью 18Х2Н4МА образуются фториды никеля, повышающие прочность слоев переноса полимерного материала на поверхности стального контртела, что приводит к расширению диапазона предпочтительных нагрузок по сравнению с парами трения указанных полимерных материалов со сталью 45.

2. Наблюдается повышенный износ ПЭЭК и СВМПЭ в парах трения с легированной сталью 18Х2Н4МА по сравнению с парами трения с углеродистой сталью 45, сужение диапазона предпочтительных нагрузок при существенном повышении контактной температуры и формировании зон схватывания.

3. При необходимости применения в узлах трения легированной стали 18Х2Н4МА, обладающей более высокими прочностными свойствами по сравнению со сталью 45, необходимо предусматривать поверхностную обработку легированной стали с целью увеличения теплопроводности ее поверхностного слоя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Ю. А. Термостойкие полимеры и полимерные материалы. СПб: Профессия, 2006. 295 с.
2. Aoike T., Yokoyama D., Uehara H., Yamanobe T., Komoto T. Tribology of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Disks Molded at Different Temperatures // Wear. 2007. Vol. 262, N 5—6. P. 742—748.
3. Справочник по пластическим массам / Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. М.: Химия, 1985.
4. Панин С. В., Корниенко Л. А., Нгуен Суан Т. и др. Износостойкость композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненных микрочастицами графита и дисульфида молибдена // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 4. С. 444—453.
5. Cadman P. and Gossedge G. M. The Chemical Nature of PTFE Tribological Interaction as Studied by X-Ray Photoelectron Spectroscopy // Wear. 1979. Vol. 54. P. 224—232.
6. Krasnyy V. A. Application of seals made of directed reinforced polymeric composite materials to improve wear resistance of friction units of oil well pumps // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. P. 042008.
7. Yemei Liu, Sujeet Kumar Sinha, Christina, Y. H. Lim, Keldren Xing Zheng Loy. Pre-Polishing the Metal Counterface of Metal-UHMWPE Wear Pair with Filler-Filled UHMWPE Composites to Generate Counterface Changes for an Effective Reduction in Pure UHMWPE Wear // Tribology Letters. 2014. Vol. 53, N 1. P. 11—16.
8. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Механизмы износа политетрафторэтилена при трении по сталям различных марок // Проблемы машиностроения и надежность машин. 2016. № 2. С. 80—84.

9. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Особенности износа политетрафторэтилена и промышленного композита Ф4К20 при трении по углеродистой и легированной сталям // Проблемы машиностроения и надежность машин. 2018. № 4. С. 73—80.
10. Трушин Ю. В. Физическое материаловедение. СПб: Наука, 2000. 310 с.
11. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Тепловая нагруженность полимера в паре трения политетрафторэтилен—сталь // Трение и износ. 2017. Т. 38, № 5. С. 386—390
12. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, износ, смазка. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
13. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в электронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968.
14. Глинка Н. Л. Общая химия. Л.: Химия, 1971. 712 с.
15. Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. Физико-химическое обоснование выбора материала контртел для пар трения с полимерным материалом // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 4. С. 431—436.

#### Сведения об авторах

- Елена Борисовна Седакова** — д-р техн. наук, доцент; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru
- Юрий Петрович Козырев** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; E-mail: ykoz2006@yandex.ru
- Сяньшунь Ли** — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ВШ Машиностроения; E-mail: 1162348646@qq.com
- Виталий Евгеньевич Жаров** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ВШ Машиностроения; E-mail: vitala9572@gmail.com

Поступила в редакцию  
03.02.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Седакова Е. Б., Козырев Ю. П., Ли Сяньшунь, Жаров В. Е. Анализ причин снижения износостойкости полимерных материалов в парах трения с легированной сталью // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 302—309.

### ANALYSIS OF REASONS FOR REDUCTION OF WEAR RESISTANCE OF POLYMER MATERIALS IN FRICTION PAIRS WITH ALLOY STEEL

E. B. Sedakova<sup>1,2</sup>, Yu. P. Kozyrev<sup>1</sup>, Li Syanshun<sup>2</sup>, V. E. Zharov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, 199178, St. Petersburg, Russia, E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia,

The wear resistance of polytetrafluoroethylene, its F4K20 composite, polyesterephyrketone, and ultrahigh-molecular polyethylene under sliding friction on carbon and alloy steels is studied experimentally. It is shown that in pairs of friction with alloy steel, a temperature regime can be created in which reactions of chemical interaction of Nickel with the polymer are activated. In the presence of polytetrafluoroethylene and its composite, the reactions are found to lead to formation of strong transfer films and an expansion of the range of workloads, and in the case of polyetherephyrketone and ultrahigh-molecular polyethylene --to a more intense heating of polymers and a reduction in the range of loads approximately in half.

**Keywords:** friction, wear, Nickel, alloy steel, polymer, adhesion, contact temperature, friction coefficient, wear coefficient

#### REFERENCES

1. Mikhaylov Yu.A. *Termostoykiye polimery i polimernyye materialy* (Heat Resistant Polymers and Polymer Materials), St. Petersburg, 2006, 295 p. (in Russ.)
2. Aoike T., Yokoyama D., Uehara H., Yamanobe T., Komoto T. *Wear*, 2007, no. 5-6(262), pp. 742–748.
3. Katayev V.M., Popov V.A., Sazhin B.I., ed., *Spravochnik po plasticheskim massam* (Plastics Handbook), Moscow, 1985. (in Russ.)
4. Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R., Nguen Suan T., Poltaranin M.A., Shil'ko S.V. *Journal of Friction and Wear*, 2014, no. 4(35), pp. 290–296.

5. Cadman P. and Gossedge G.M. *Wear*, 1979, vol. 54, pp. 224–232.
6. Krasnyy V.A. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, pp. 042008.
7. Yemei Liu, Sujeet Kumar Sinha, Christina, Lim Y. H., Keldren Xing Zheng Loy, *Tribology Letters*, 2014, no. 1(53), pp. 11–16.
8. Sedakova E.B., Kozyrev Y.P. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2016, no. 2, pp. 80–84. (in Russ.)
9. Sedakova E.B., Kozyrev Y.P. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 4, pp. 73–80. (in Russ.)
10. Trushin Yu.V. *Fizicheskoye materialovedeniye* (Physical Materials Science), St. Petersburg, 2000, 310 p. (in Russ.)
11. Sedakova E.B., Kozyrev Y.P. *Journal of Friction and Wear*, 2017, no. 5(38), pp. 390–394.
12. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. *Treniye, iznos, smazka. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskiye prilozheniya tribologii* (Friction, Wear, Lubrication. Physical Foundations and Technical Applications of Tribology), Moscow, 2007, 368 p. (in Russ.)
13. Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. *Teploobmen v elektronnykh apparatakh* (Heat Transfer in Electronic Devices), Leningrad, 1968. (in Russ.)
14. Glinka N.L. *Obshchaya khimiya* (General Chemistry), Leningrad, 1971, 712 p. (in Russ.)
15. Sedakova E.B., Kozyrev Y.P. *Journal of Friction and Wear*, 2019, no. 4(40), pp. 337–341.

#### Data on authors

- Elena B. Sedakova** — Dr. Sci., Associate Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear;  
E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru
- Yury P. Kozyrev** — PhD, Senior Researcher; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Friction and Wear;  
E-mail: ykoz2006@yandex.ru
- Syanshun Li** — St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Engineering;  
E-mail: 1162348646@qq.com
- Vitaly E. Zharov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Engineering; E-mail: vitala9572@gmail.com

**For citation:** Sedakova E. B., Kozyrev Yu. P., Li Syanshun, Zharov V. E. Analysis of reasons for reduction of wear resistance of polymer materials in friction pairs with alloy steel. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 302–309 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-302-309