

**Почему полимерные антифрикционные композиты представляются более перспективными подшипниковыми материалами, чем баббиты.**

*Часть 3 (начало).*

*Трибология антифрикционных композиционных материалов.*

Как уже указывалось в [первой части](#), преимущества антифрикционных композитов по сравнению с баббитовыми сплавами проявляются и в их трибологических свойствах:

1. Коэффициент сухого трения.
2. Износостойкость.
3. Прирабатываемость.
4. Сопротивление механической и температурной усталости.

5. Смачиваемость, удержание на рабочей поверхности пленки смазки. Несущая способность ПСКМ.

Изучению данных свойств посвящено большое количество лабораторных исследований\*, особенно для композитов на основе РЕЕК, имеющих большое количество промышленных применений. Подтверждение данных результатов мы наблюдали также и в промышленных применениях ПСКМ с подшипниковым материалом К30ПТ, изготовленного из матрицы на основе РЕЕК. Рассмотрим эти результаты.

### 1. Коэффициент сухого трения.

Поведение подшипниковых материалов в условиях сухого трения определяет последствия работы подшипника при отсутствии смазки, переходных режимах работы (старта/останова), определяет пусковые

моменты для тяжелого роторного оборудования, работу уплотнительных колец. Рассматривая проведенные исследования, можно обнаружить:

1.1. Значения коэффициентов сухого трения для чистого РЕЕК и простых композитов лежат в диапазоне 0,1 – 0,35 [1-4], в то время как для баббитов эти значения составляют 0,24 – 0,9 [5-6], (рис. 1).

1.2. Правильным подбором состава материала можно получить еще более низкие значения коэффициентов трения (и износостойкости, п.2) в пределах 0,02 – 0,03 [7] (рис.2)

1.3. Полимерные композиты сохраняют или демонстрируют снижение коэффициентов сухого трения до 0,05 в диапазоне температур от 50 до 250 °С [1], [3], [7] (рис. 3).

\*Отбор исследований проводился по условиям: пары трения сталь-полимер, нагрузочные характеристики максимально приближены к значениям, аналогичным при получении данных для баббитовых сплавов.

Показатель	Единица измерения	Марка													
		Б83	Б89	Б91	Б93	Б93А	Б16	Б6	БК	БН	БС6	БС2	БС	БТ	
Плотность	г/см <sup>3</sup>	7,4	7,3	7,3	—	—	9,3	9,6	10,5	9,5	—	—	10,1	—	
Предел прочности:	кг/мм <sup>2</sup>	при растяжении	9,0	8,0	8,0	6,7	5,9	7,8	6,8	10,0	7,0	6,7	6,1	4,2	6,0
		при сжатии	11,5	11,4	9,0	—	—	12,3	13,6	16,0	12,7	—	14,6	8,8	12,8
Относительное удлинение	%	6,0	10,6	7,0	20,5	14,0	0,2	0,2	2,5	1,7	12,7	4,8	0,6	1,8	
Ударная вязкость	кг·м/см <sup>2</sup>	1,07	3,0	—	—	—	0,80	0,15	0,8	0,44	—	0,8	0,15	0,44	
Твердость по Бринеллю	кг/мм <sup>2</sup>	30	24,3	22,0	14,0	16,1	30,0	32,0	32,0	29,0	16,9	18,0	20,0	—	
Коэффициент трения:		со смазкой	0,006	—	—	—	—	0,006	0,005	0,004	0,006	—	0,006	0,007	0,009
		без смазки	0,28	—	—	—	—	0,25	—	0,44	0,27	—	—	0,24	0,38

Сплав	Эксплуатационные характеристики			Прочностные характеристики		Состав сплавов на основе олова, в вес. %								
	Коэффициент трения	Износ, мг/см <sup>2</sup> км	Коррозионная стойкость, м <sup>2</sup> /ч	Предел текучести при сжатии $\sigma_T$ в МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_s$ в МПа	Sn	Sb	Cu	Zn	Cd	In	Ag	Pb	Ni
Б83	0,8 - 0,9	0,1 - 0,12	4,95 - 4,97	78 - 79	102 - 105	ост.	10 - 12	5,5 - 6,5	-	-	-	-	-	-
Б88	0,7 - 0,9	0,09 - 0,1	4,45 - 4,50	82 - 85	108 - 118	ост.	7,3 - 7,8	2,5 - 3,5	-	0,8 - 1,2	-	-	-	0,15 - 0,25

Рис.1 Трибологические характеристики баббитов по [5] (вверху) и [6] (внизу)

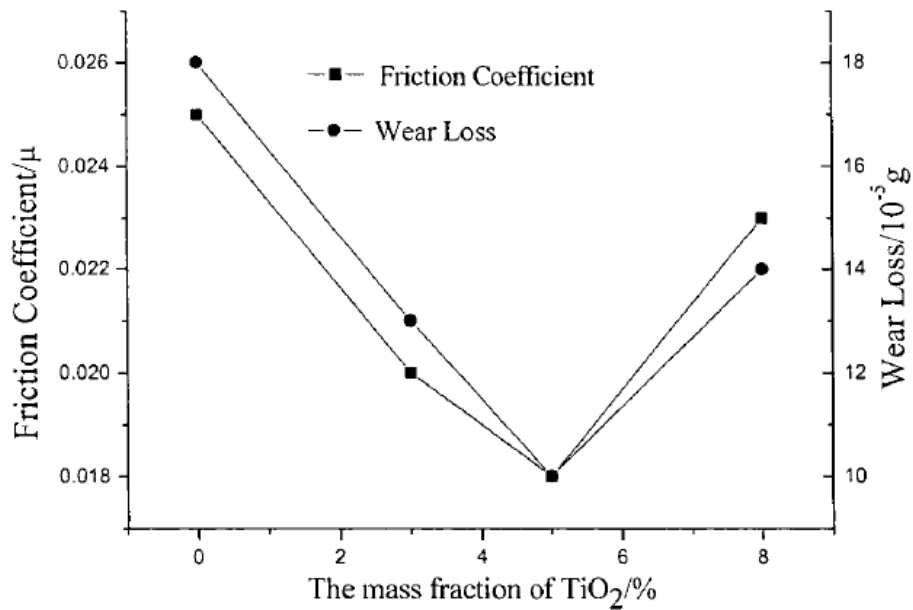


Рис. 2 Коэффициент трения и износ образцов РЕЕК, модифицированных частицами TiO<sub>2</sub>

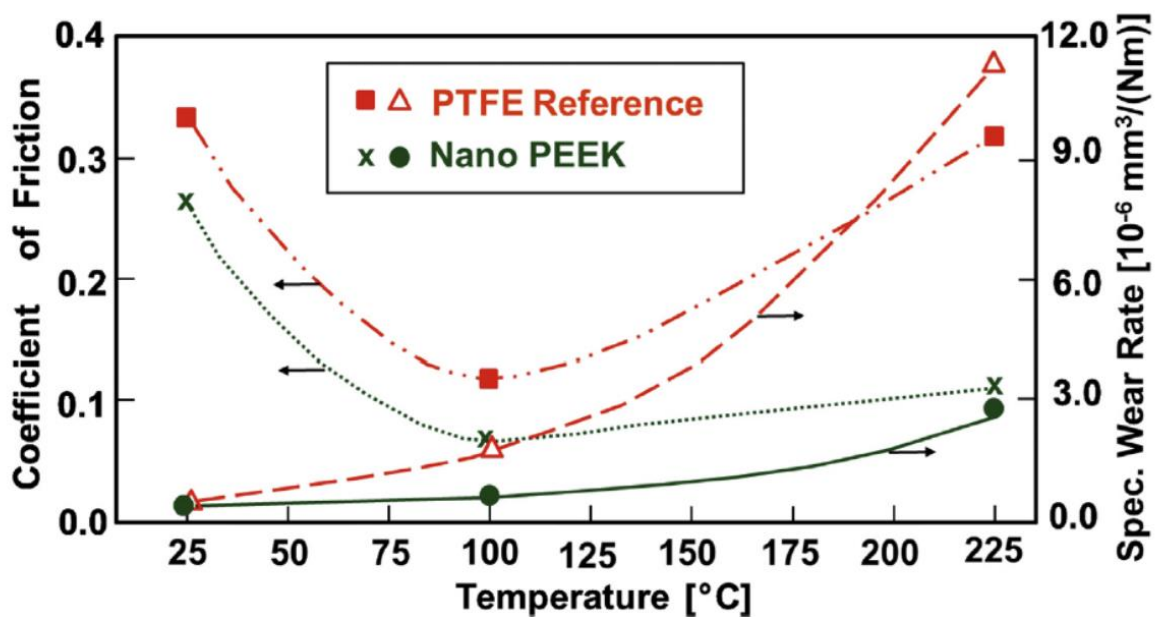


Рис. 3 Коэффициенты трения и износоустойчивость модифицированного РЕЕК в сравнении с PTFE.

1.4. Низкие коэффициенты трения наблюдаются также при применении композитов в области низких температур [12] (Рис. 4), в том числе благодаря образованию на поверхности контр-тела смазывающих пленок, выделяемых композиционным материалом в процессе трения.

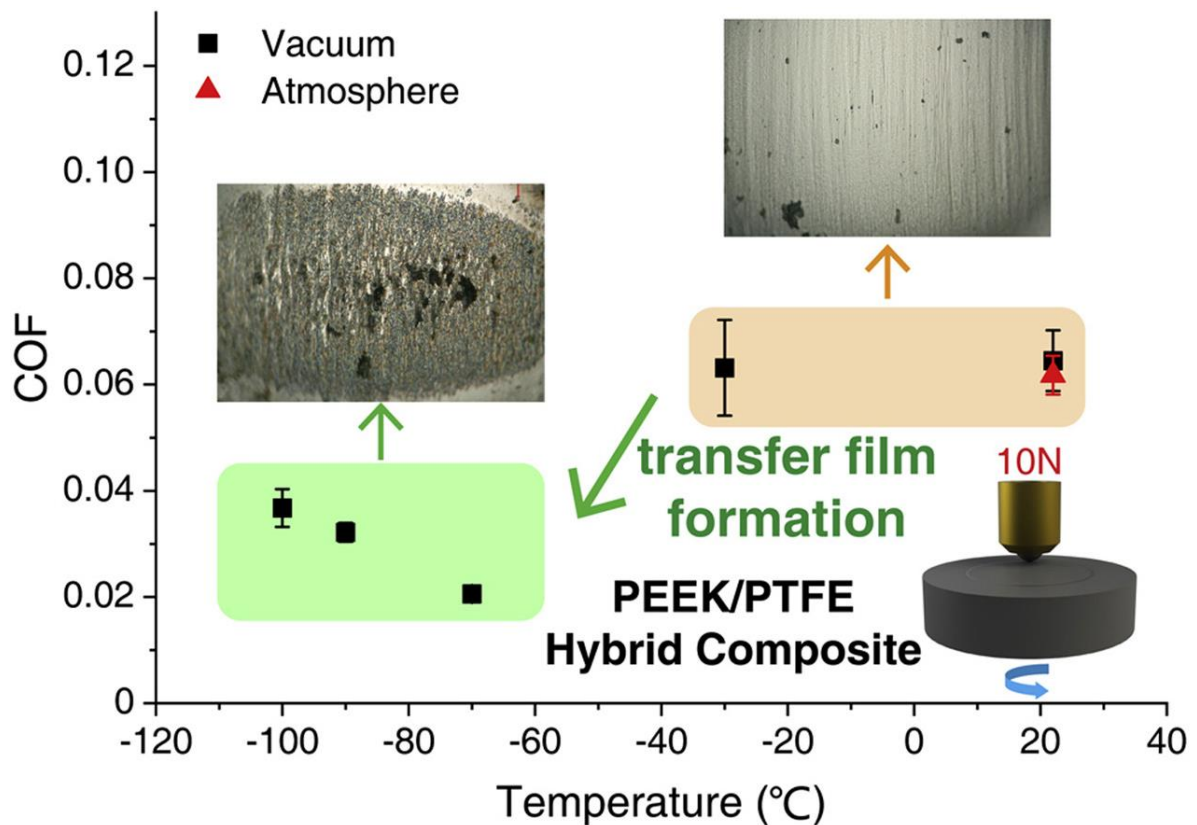


Рис. 4 Коэффициенты трения и перенос смазывающих пленок в области низких температур

1.5. Выделение графита из графитсодержащих композитов также способствует образованию на контактных поверхностях вала и подшипника пленки из частиц углерода, внешне похожих на пленки меди в процессе избирательного переноса в паре трения медный сплав — сталь. Данный процесс аналогичен процессу переноса в графитовых подшипниках, в которых в процессе приработки коэффициент трения снижается с 0,12—0,15 до 0,04—0,05 и скорость изнашивания становится незначительной [13].

## 2. Износостойкость.

2.1. Исследование износостойкости баббитовых подшипниковых материалов проводилась [6] и указана в таблице рис.1.

2.2. Износостойкость РЕЕК с различными наполнителями исследовалась во многих работах. Значения, приведенные

к объемным показателям, варьировались в зависимости от наполнителей матриц и указаны в таблице 1.

2.3. Присутствие смазки и полировка поверхности позволяет повышать износостойкость [8] (рис. 4).

*Таблица 1. Износ баббитов и полимерных материалов.*

Сплав, [источник]	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Износ массы, мг/см <sup>2</sup> км	Объемный износ, мм <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> км
Б83, [6]	7380	0.1 – 0.12	<b>13.5 – 16.2</b>
Б88, [6]	7350	0.09 – 0.1	<b>12.5 – 13.5</b>
Чистый РЕЕК, [9]	1320		<b>0,04 – 0,21</b>
Чистый РЕЕК в воде и с полировкой контр-тела, [8]	1320		<b>0,008-0,02</b>
РЕЕК наполненный 25% PTFE, [4]			<b>0,003</b>

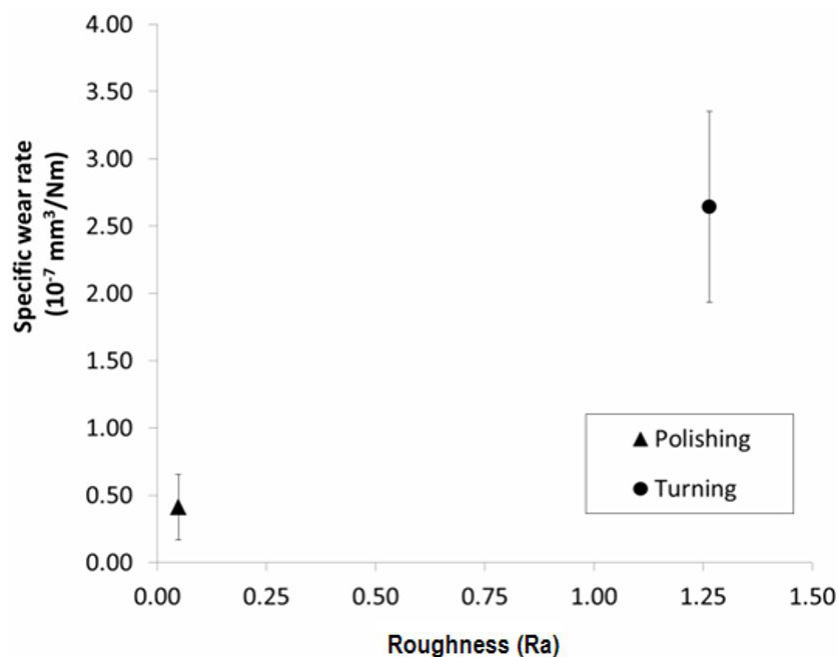


Рис. 4 Износостойкость РЕЕК при трении в воде при полировке поверхности контр-тела  $R_a$ , мкм, нагрузке 2 МПа.

### 3. Прирабатываемость.

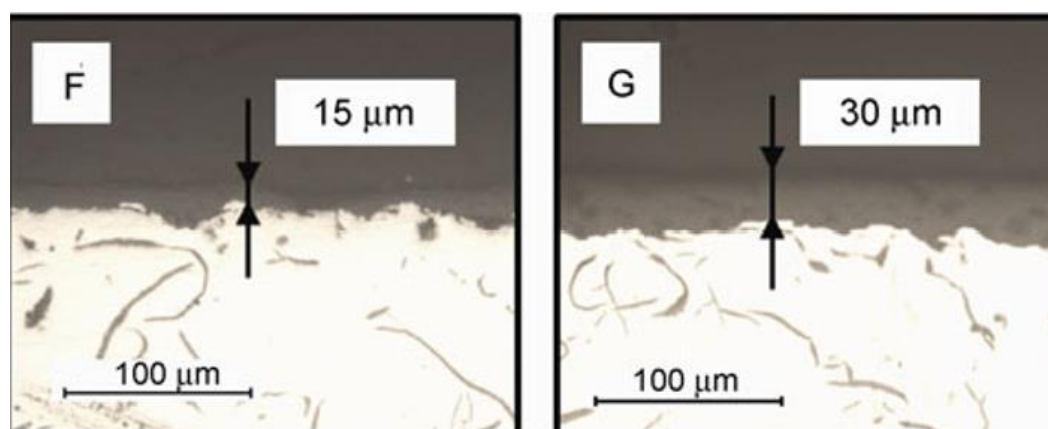
3.1. Свойства прирабатываемости материала - уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе эксплуатации - основана на термической пластичности полимерных матриц без последствий в виде усталости или разрушения материала. Под воздействием температуры снижающийся

предел прочности матрицы позволяет приложенному к поверхности давлению (сухого или гидродинамического трения) придавать поверхности соприкосновения оптимальную форму, при которой приложенное усилие распределяется на максимальную площадь, давление снижается, температура падает, и новая форма фиксируется в процессе остывания материала. Образующиеся в процессе переформирования поверхности излишки материала могут выдавливаться в холодные зоны подшипника (торцевое, межсегментное пространство, масляные карманы) и механически удаляться с проточным маслом или в процессе планового осмотра.

3.2. Толщина подшипникового слоя должна быть достаточной для компенсации приработки вследствие неточности монтажа подшипника и ротора.

3.3. В лабораторных условиях были получены данные об уменьшении

шероховатости поверхности полимера в процессе трения [14] (рис. 5).



Material	Surface finishing	$S_k$ before test ( $\mu\text{m}$ )	$S_k$ after test ( $\mu\text{m}$ )	Flatness before test ( $\mu\text{m}$ )
F	Blasting before coating	$6.4 \pm 1.3$	$1.4 \pm 0.2$	8–10
G	Blasting before coating	$3.8 \pm 0.5$	$1.6 \pm 0.4$	4–6

Рис. 5 Уменьшение шероховатости РЕЕК в процессе сухого трения.

3.4. Снижение трения и износа в процессе приложения различного давления, шероховатости контр-тела и продолжительной работы в присутствии водной смазки показаны [8], [15] (рис. 6).

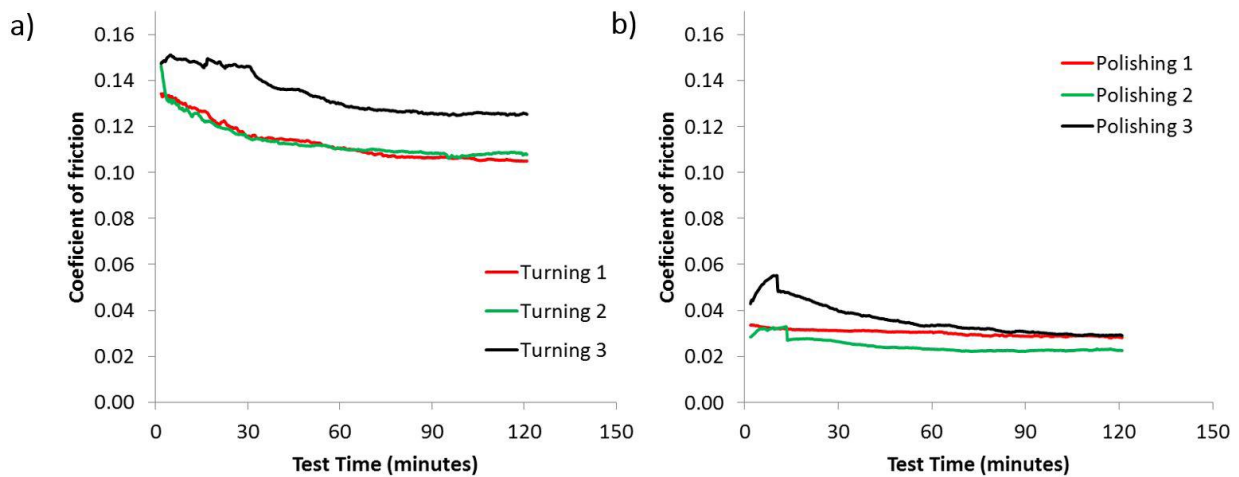
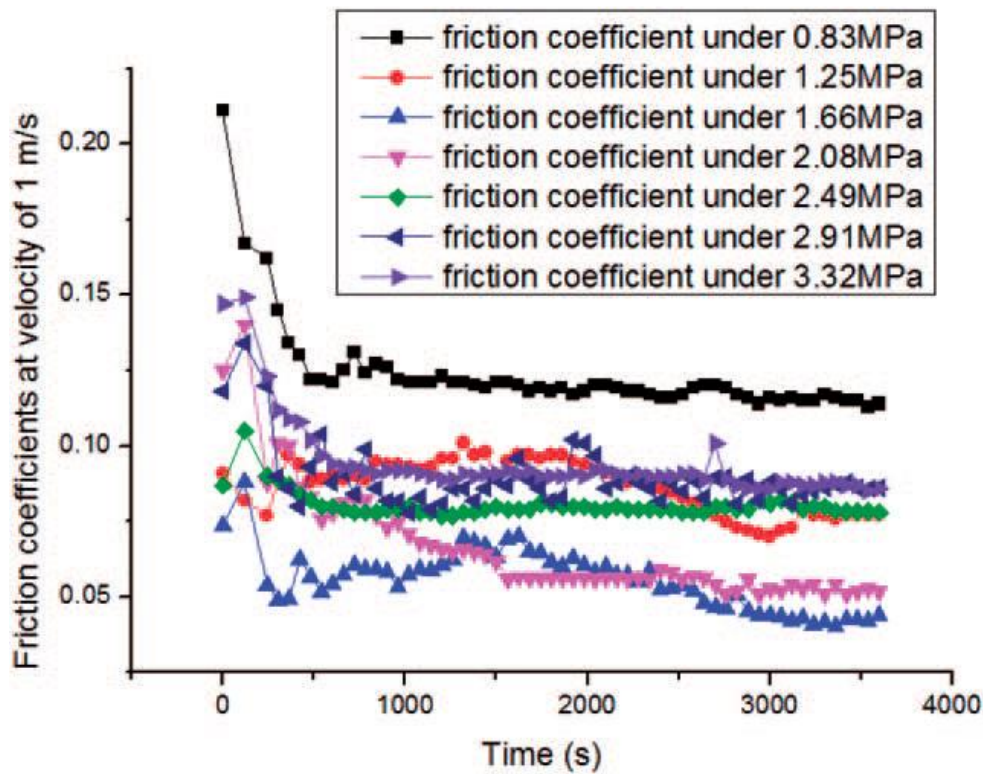
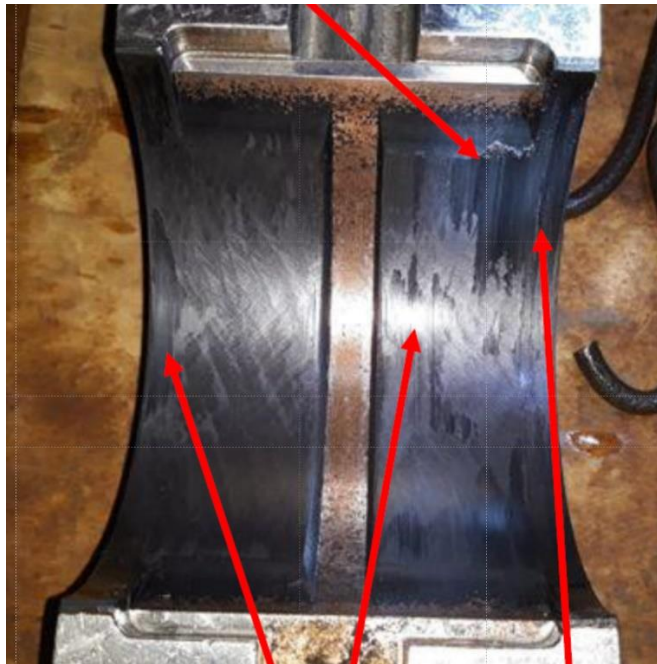
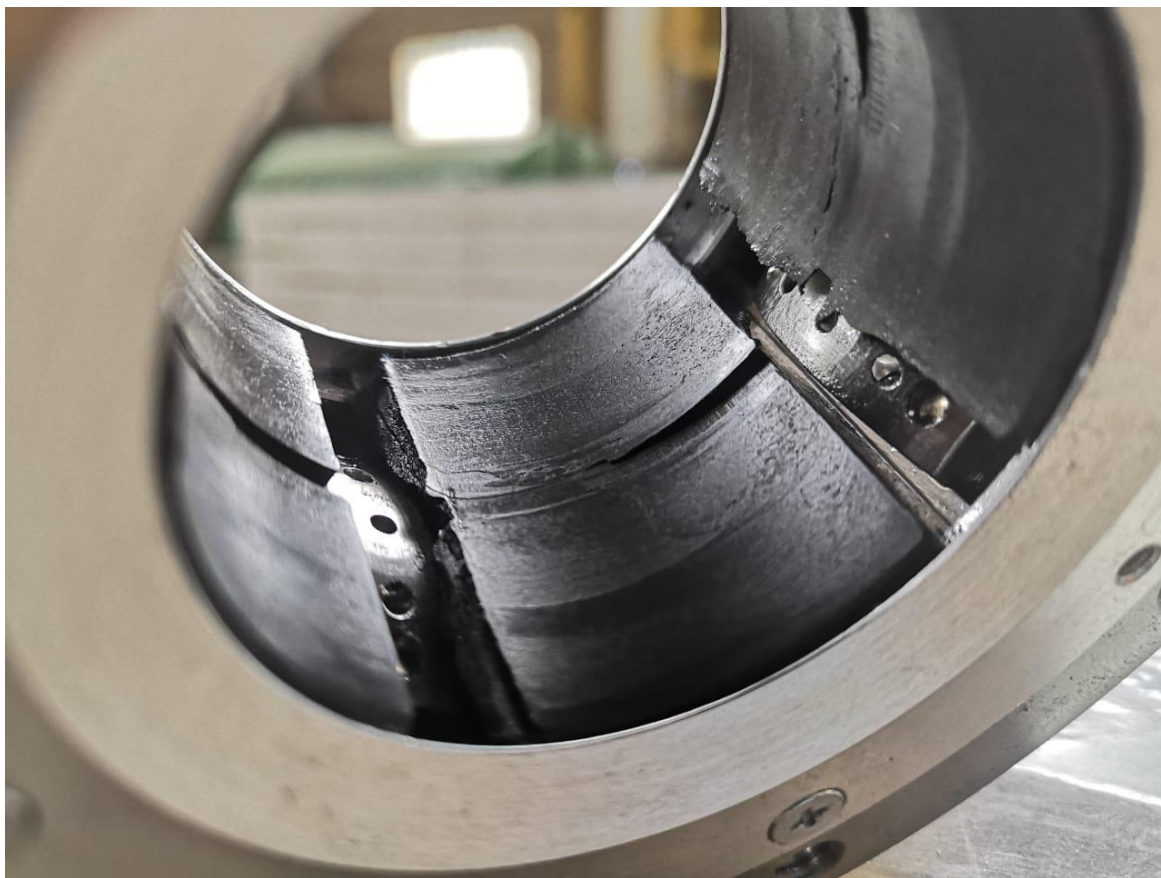


Рис 6. Динамика уменьшения коэффициента трения в процессе приработки при различных давлениях (вверху) и шероховатостях контр-тела (внизу) от  $R_a$  1,264 мкм (a) до  $R_a$  0,048 мкм (b)

3.5. В промышленных применениях прирабатываемость ПСКМ на основе К30ПТ наблюдалась во всех случаях установки и эксплуатации подшипников в неоптимальных условиях. В этих случаях возникали «наплывы» материала в торцовых зонах и по краям зоны трения, накопление излишков выдавленного материала в масляных карманах и межколодочном пространстве. Наличие данных эффектов не влияло на работоспособность ПСКМ. После устранения излишков материала ПСКМ продолжал нормально эксплуатироваться (рис. 7).



a)



б)

## Технические результаты выполненной работы:

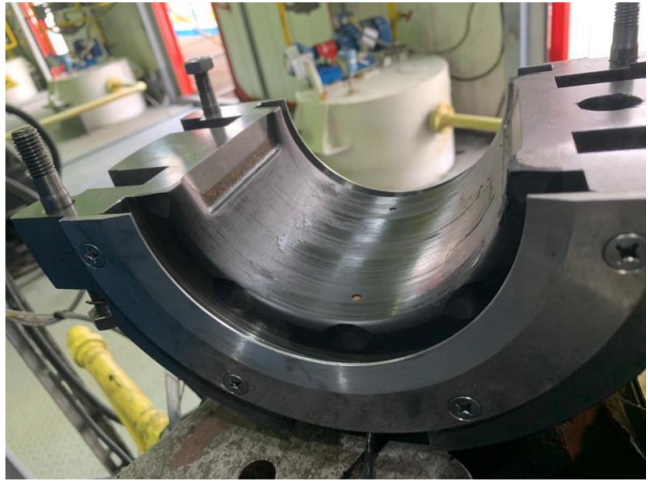
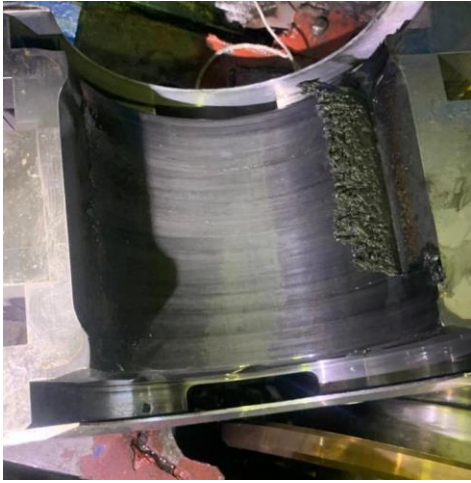
Был обнаружен и проверен наблюдавшийся на другом оборудовании **эффект от излишне заниженных зазоров** при установке подшипника:

1. На подшипнике №3 насоса типа 12ПД-8 с электродвигателем типа 2АЗМП1-500/6000-У4 присутствовала излишняя нагрузка на рабочую поверхность в связи с неточностью монтажа либо особенностями поведения ротора насоса при нагрузках энергоблока от 200 МВт.
2. Следствием нагрузки являлась увеличенная температура на сливе из подшипника (и в зоне трения) в пределах 95-113 С.
3. По согласованию со службой эксплуатации Заказчика БЭН был оставлен в эксплуатации, и в период с 20.02.2022 по 05.05.2022 г. данный эффект наблюдался, однако величина перегрева плавно снижалась, и по результатам мониторинга в сентябре 2022 г. температура подшипника №3 составляла 52 С на всех режимах работы.

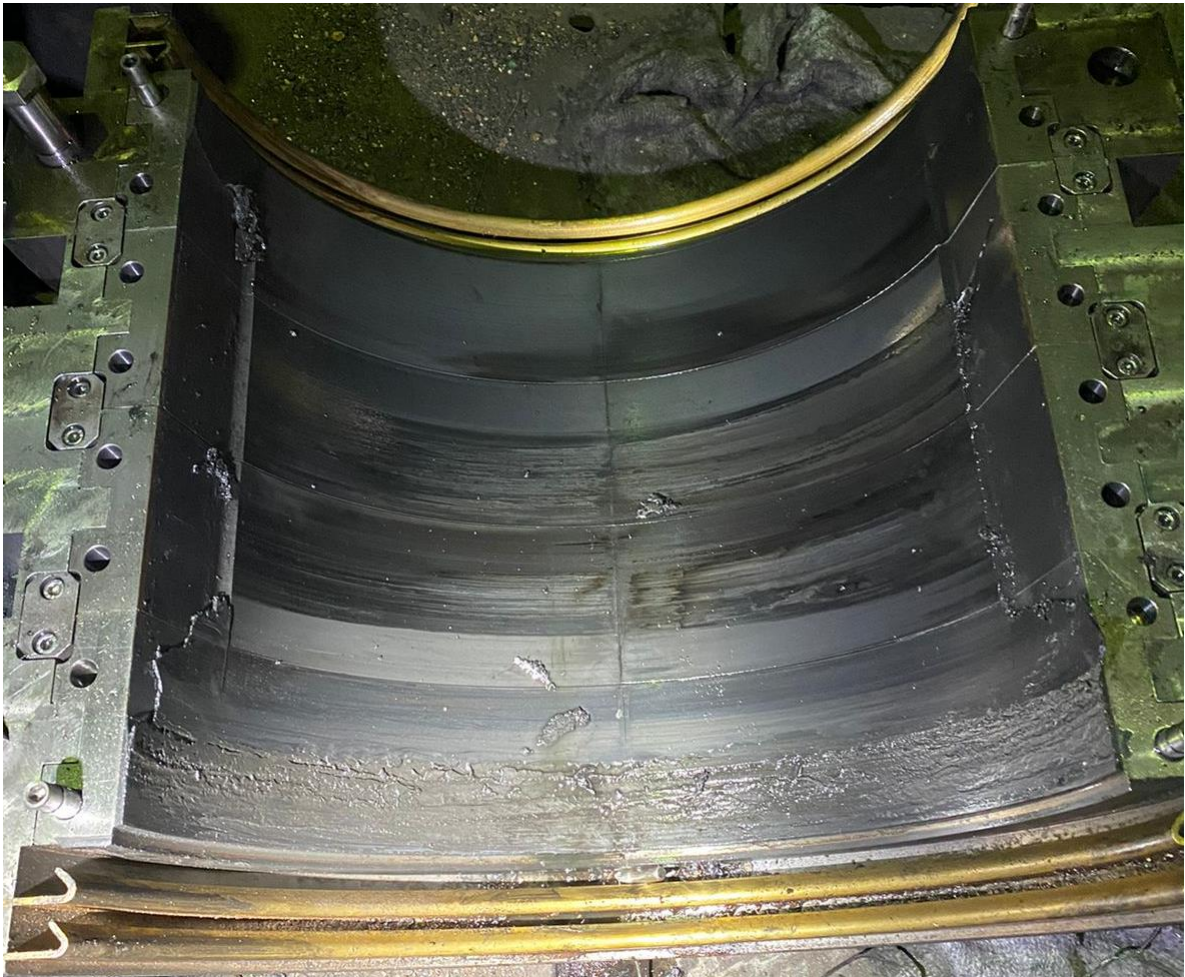
В)



Г)



д)



е)

### Рис. 7 Примеры приработки ПСКМ

а) в редукторе компрессора (справа, красные стрелки) в сравнении с последствиями эксплуатации баббитового подшипника (слева).

б) 5 и 6 ступень компрессора КУ АЭРОКОМ 2-300/31 УХЛ4.

в) из отчета НИОКР по применению ПСКМ в бустерном насосе.

г) ОУП ТНД ГПА-10М

д) электродвигателя СТДМ-1600-2РУХЛ4  
«Электротяжмаш-Привод»

е) электродвигателя СДМЗ-20-49-60 «ЛЭЗ»

3.6. Для электродвигателя СДМЗ-20-49-60 «ЛЭЗ» (рис. 7е) приработка осуществлялась в серии из пяти пусков. В каждом из пусков фиксировался темп роста температуры в диапазоне от 20 до 100 °С. Приработка выражалась в снижении темпа роста температуры в каждом из последующих пусках (рис. 8).

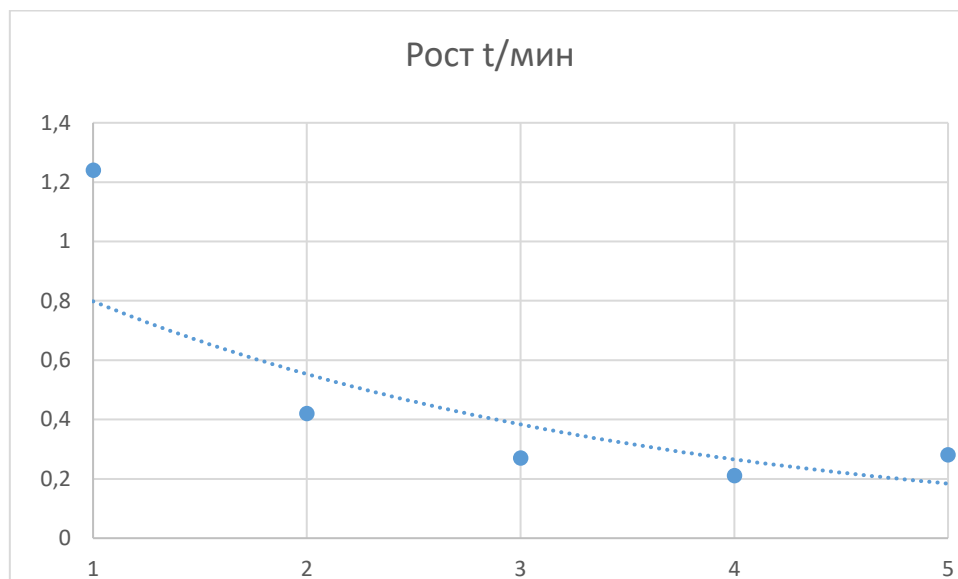


Рис. 8 Темп роста температуры в каждом из последовательных пусков № 1-5 электродвигателя СДМЗ-20-49-60 «ЛЭЗ»

3.7. Те же свойства термической пластичности полимерных матриц позволяют избегать тяжелых последствий аварийных ситуаций при эксплуатации ПСКМ вследствие прекращения маслоснабжения, перегруза, перегрева, изменения направления вращения ротора, присутствия посторонних включений в смазке и др. Во всех подобных случаях максимальное повреждение получает полимерный слой в виде повышенного износа, деформации под нагрузкой,

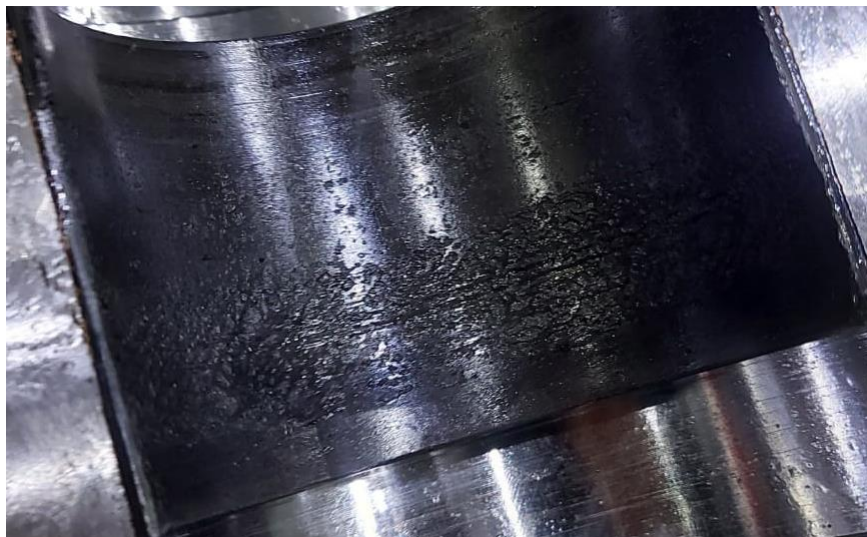
увеличения зазоров. Следствием развития процессов является увеличение вибрации, наличие дымных выделений от выгорающих углеродных фракций, цвета побежалости на шейках валов. В отличие от баббитовых подшипников, невозможно возникновение ситуации заклинивания вала, расплавления подшипникового слоя, наволакивания материала и задира поверхности шейки валов, раскрашивания и образования каверн на поверхности подшипникового слоя, и т.д. Примеры аварийных ситуаций, возникших от нарушения условий эксплуатации, приведены на рис. 9. Во всех данных случаях иных повреждений, кроме представленных повреждений подшипникового слоя, не наблюдалось.



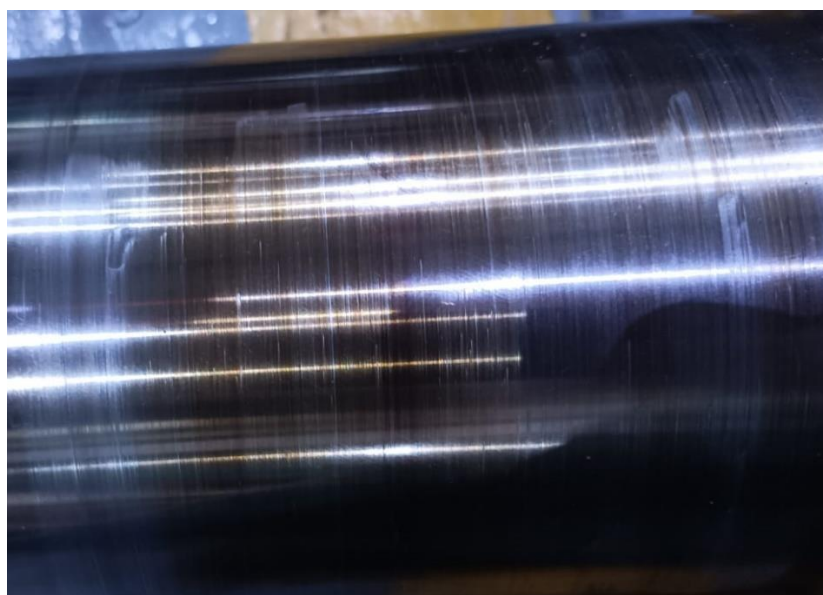
a)



б)



B)



Г)

Рис. 9 Примеры последствий аварийных ситуаций ПСКМ.

- а)-б) отсутствие смазки в упорной части ПСКМ
- в) перегрузка радиального подшипника
- г) следствие перегрева радиального подшипника на шейке вала

#### 4. Сопротивление механической и температурной усталости.

4.1. По сравнению с усталостными характеристиками баббитов [11] (рис. 10а), полимеры демонстрируют более высокую устойчивость к температурной усталости [10] (рис. 10б).

4.2. Рост сопротивления усталости для баббитов достигается применением тонких (менее 0,3 мм, рис. 10а) слоев подшипникового материала. Как указывалось в п. 3.2., такой слой не всегда может компенсировать приработку. Для полимерных композиционных материалов

такой проблемы не существует, и любая толщина слоя обеспечивает исходную сопротивляемость усталости.

4.3. Эксплуатация баббитовых подшипников в диапазоне от 85 до 140°C значительно снижает сопротивление материала температурной усталости (рис. 10а). Снижение сопротивления температурной усталости для полимеров в диапазоне 50 – 300 °C (рис. 10б) существенно меньше.

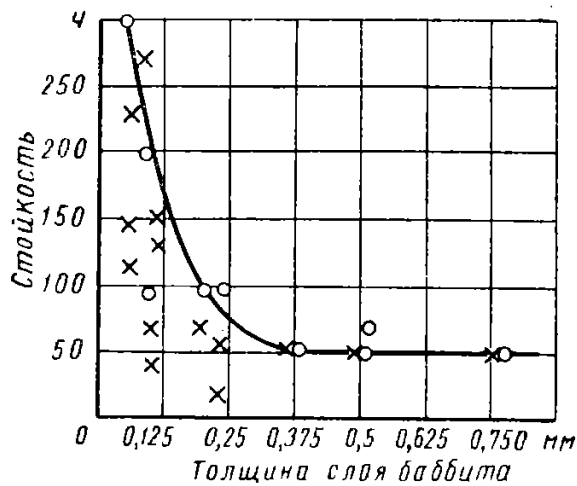


Рис. 14. Предел усталости (продолжительность работы в ч) подшипников под нагрузкой  $1,4 \text{ кг/мм}^2$  при различной толщине слоя баббита (оловянного и свинцовистого): о — заливка на сталь; х — заливка на сталь с последующим нанесением на баббит тонкого покрытия

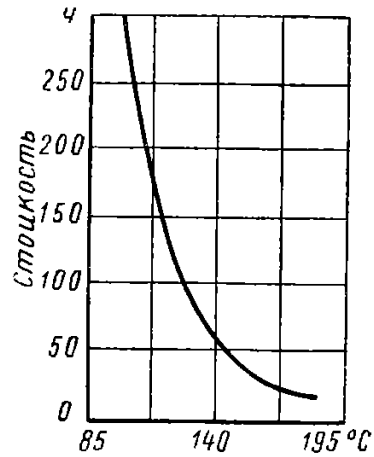
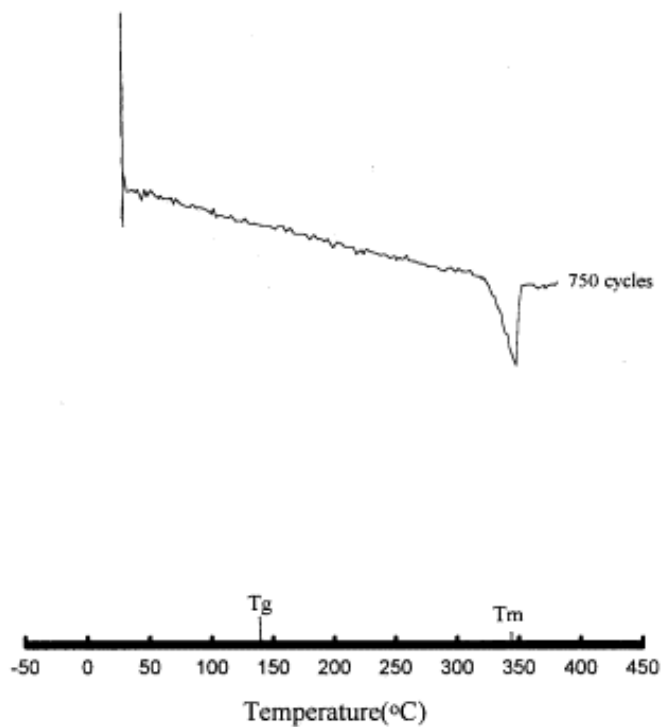


Рис. 15. Предел усталости (продолжительность работы) в ч оловянных и свинцовистых баббитов в зависимости от рабочей температуры. Нагрузка на подшипник  $14 \text{ кг/мм}^2$ . Толщина слоя баббита на стальном вкладыше  $0,05-0,125 \text{ мм}$ .

а)



б)

Рис. 9 Пределы усталости а) баббитов и б) модифицированного графитом РЕЕК.

В следующей части будут рассмотрены трибологические свойства полимеров при работе со смазкой и в условиях гидродинамического трения.

## Литература

- [1] Polymer composites for tribological applications. K. Friedrich, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 1 (2018) 3-39
- [2] Research on Tribological Behavior of PEEK and Glass Fiber Reinforced PEEK Composite, E.Z. Li, W.L. Guo, H.D. Wang, B.S. Xu, X.T. Liu, *Physics Procedia* 50 (2013) 453 – 460
- [3] Friction and Wear Studies of Some PEEK Materials, J. Lind, P. Lindholm, J. Qin and Å. Kassman Rudolphi, *TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology* 2 vol 33/2015
- [4] A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite, David L. Burris, W. Gregory Sawyer, *Wear* 261 (2006) 410–418
- [5] Краткий справочник машиностроителя, Г.П. Сальников, Государственное издательство технической литературы УССР, Киев, 1963
- [6] ЕДРИД, 19.01.2018, №218.016.083F, Антифрикционный сплав на основе олова, №

охранного документа 0002631564, Дата охранного документа, 25.09.2017

[7] Research on Progress of Tribological Modification of Polyetheretherketone, Li Shu Long, Wang Yan Jun, Qin Ke, Li Chao, International Journal of Materials Science and Applications

Volume 5, Issue 2, March 2016, Pages: 102-107.

[8] Tribology of natural Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) under transmission oil lubrication, Andrade T.F. et al., 2019, Polimeros: Ciencia e Tecnologia, 29(2), e2019026.

[9] Effect of Contact Pressure on Reciprocating Wear Behavior of PEEK, PTFE, and UHMWPE, Liu Lian, Duan Haitao, Jia Dan, Tu Jiesong, Zhan Shengpeng, Li Yinhua, Polymer(Korea) 2020; 44(6): 827-834

[10] Influences of thermal cycling and low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/PEEK laminates, Nyan-Hwa Tai, Ming-Chuen Yip, Chih-Ming Tseng, Composites Part B: Engineering, Volume 30, Issue 8, December 1999, Pages 849-865

[11] Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т.1 Цветные металлы и сплавы. Колл. авт. под ред. Лужникова Л.П. Машиностроение, 1967.

[12] Role of transfer film formation on the tribological properties of polymeric composite materials and spherical plain bearing at low temperatures, Wenyan Cui, Khalid Raza, etc.,

Tribology International, Volume 152, December 2020.

[13] Подшипники сухого трения, Воронков Б.Д.,  
Машиностроение, 1979 г., с.50

[14] Static/dynamic friction and wear of some selected  
polymeric materials for conformal tribo-pairs under  
boundary lubrication conditions, Daniel Nilsson,  
Braham Prakash, Friction 1(3): 232–241 (2013)

[15] Tribological behavior of PEEK filled with  
CF/PTFE/graphite sliding against stainless steel surface  
under water lubrication, Wutao Dong, Songlin Nie and  
Anqing Zhang, Journal of Engineering Tribology 1994-  
1996 (vols 208-210)

*Оставайтесь с нами!*