

Анализ механических свойств антифрикционных материалов для применения в гидродинамических подшипниках скольжения в условиях эксплуатации при температурах выше 120 °С

В последние годы на фоне ухода западных сервисных компаний и общего дефицита экспертизы в области эксплуатации и ремонта подшипников скольжения возникла острая необходимость в разработке и использовании надёжных подшипниковых материалов. Это особенно актуально для оборудования импортного производства, рассчитанного на работу при повышенных нагрузках и температурах.

Использование отечественных марок баббитов, таких как Б83, Б16 и другие, часто не обеспечивает необходимого уровня надёжности: в условиях эксплуатации при повышенных нагрузках подшипники склонны к перегреву, преждевременному износу и выходу из строя. Правильный подбор отечественных баббитов для работы при повышенных температурах осложняется значительным статистическим разбросом сведений о физико-механических свойствах этих материалов в литературе. Такой разброс обусловлен различиями в методиках испытаний, особенностями нагрузочной истории образцов и другими факторами, что затрудняет объективную оценку предельно допустимых рабочих температур баббитов (см. Табл. 1)

Таблица 1

Предельные рабочие температуры баббитов Б83, Б16 и импортных марок

№	Баббит марка	Предельные рабочие температуры, °С		
1	Б83	115 - [1, 2]	117 ¹	120 - [3, с. 23]
2	Б16	110 - [1]	117 ²	120 - [3, с. 23]
3	TEGOSTAR 738	100 ³	110 ⁴ - [2]	114 ⁵
4	White Metal Bearing Alloys (Sn89...)	96 ⁶	107 ⁷	
5	Grade 2 ASTM B-23		129 [4]	130 ⁸

На фоне дефицита достоверной информации и технически обоснованных решений по обеспечению необходимых нагрузочных характеристик новых и ремонтируемых подшипников в последнее время на рынке появились так называемые "высокотемпературные" баббиты, позиционируемые как аналоги импортных сплавов (например, TEGOSTAR 738). Однако следует отметить, что термин «высокотемпературный баббит» отсутствует в зарубежной научной и технической литературе и носит преимущественно коммерческий характер, что вызывает вопросы о корректности подобной

¹ ГОСТ 1320-74 (указана нормальная рабочая температура 70 °С)

² Там же

³ Технические данные Gleitlagertechnik Essen GmbH

⁴ BPG Catalog, Manual: Сайт компании Kingsbury, Inc. (USA) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kingsbury.com/pdf/BPG-Catalog.pdf> (дата обращения: 03.05.2025 г.)

⁵ Технический паспорт ЕСКА Granulate Essen GmbH (температура падения НВ ниже 12).

⁶ <https://babbittrepair.com/babbitt/babbitt-information/>

⁷ Там же

⁸ Сайт компании Waukesha Bearings (USA) [Электронный ресурс]. URL

<https://www.waukbearing.com/en/products/fluid-film-bearings/babbitt-bearings.html> (дата обращения: 03.05.2025 г.)

классификации (например, ср. № 1 и № 5 в Табл. 1 — марка баббита Grade 2 ASTM B-23, содержащая меньше тугоплавких компонентов, применяется при более высоких рабочих температурах, чем отечественный Б83, см. Табл. 2). Более того, при применении импортных баббитов остаётся недостаточно раскрытыми ключевые технологические аспекты — такие как параметры производства, методики нанесения и процедуры контроля качества, а также достоверные данные о поведении материалов при температурах эксплуатации выше 120 °С.

Таблица 2

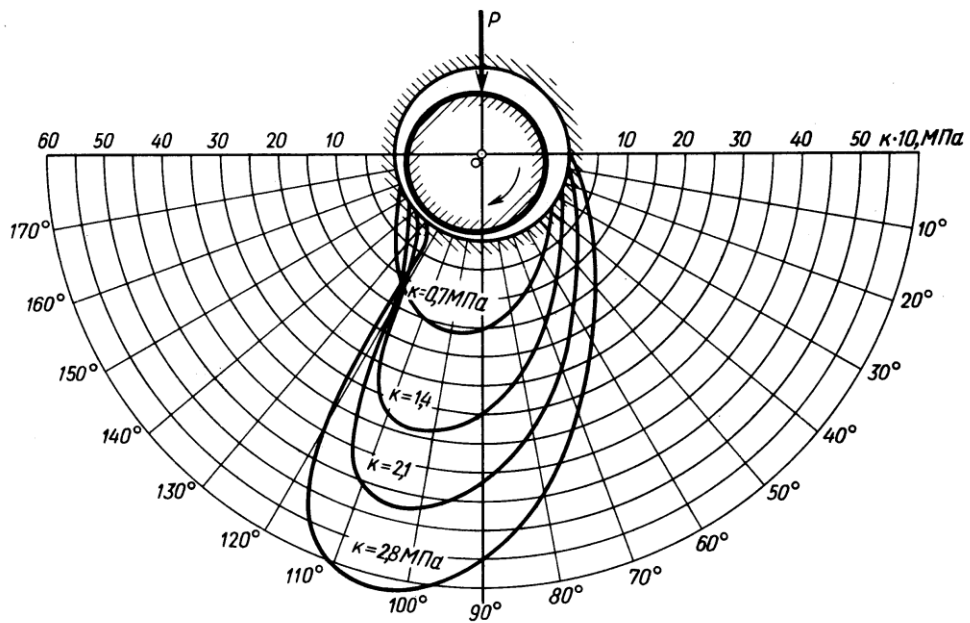
Химический состав баббита Б83 ГОСТ 1320-74 и Grade 2 ASTM B-23

Марка	Sn	Sb	Cu	Pb	Fe	As	Bi	Zn	Al	Cd	Ni
Б83	81,5-84,5	10-12	5,5-6,5	<0,35	<0,1		<0,05	<0,004	<0,005		
Grade 2 ASTM B-23	88-90	7-8	3-4	<0,35	<0,08	<0,1	<0,08	<0,005	<0,005	<0,05	<0,001

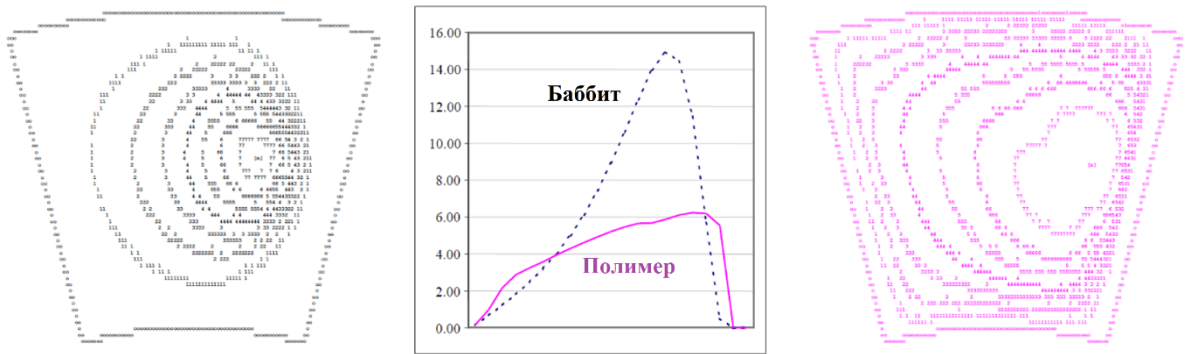
В условиях ограниченной достоверной информации и сохраняющегося консерватизма инженерного сообщества зачастую осуществляется нерациональный выбор подшипниковых материалов. Предпочтение отдается импортным баббитовым сплавам или отечественным аналогам сомнительного качества, которые по химическому составу мало от стандартных отечественных сплавов. Такой подход приводит к неоправданному увеличению допустимых нагрузок и рабочих температур подшипников, что влечёт за собой нарушение условий смазки в режиме гидродинамического трения, ухудшение характеристик рабочего слоя в режимах пуска и выбега (граничное и сухое трение) и, как следствие, повышает риск отказов и снижает ресурс роторного оборудования.

Действенной альтернативой баббитовым сплавам в настоящее время являются полимерные антифрикционные композиционные материалы (ПКМ), которые активно внедряются во все отрасли промышленности, удовлетворяют большинству требований к подшипниковым материалам и характеризуются расширенным температурным диапазоном эксплуатации — вплоть до 250 °С [5–8]. Более широкое внедрение таких материалов сдерживается инерционностью инженерной практики и ограниченной информированностью специалистов о технических возможностях современных ПКМ.

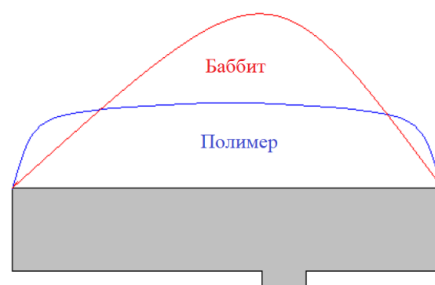
При проектировании и эксплуатации узлов трения основное внимание уделяется способности подшипникового материала выдерживать динамическую нагрузку pv , отражающую одновременно тепловую и механическую нагрузку на контакт. При прочих равных условиях повышение pv сопровождается ускоренным накоплением тепла и увеличением износа и пластической деформации материала. При этом следует учитывать, что распределение нагрузки, тепла и, соответственно, локальной температуры в зоне контакта радиальных и упорных подшипников является неравномерным. Перепады между пиковыми и средними значениями контактного давления в условиях гидродинамического трения могут достигать 20 раз (рис. 1), а температур — на 10–15 °С (рис. 2).



а)



б)



в)

Рис. 1. Распределение давления смазки в радиальном подшипнике (а), колодке упорного подшипника с баббитовым покрытием (б - слева, в) и полимерным покрытием (б - справа, в)

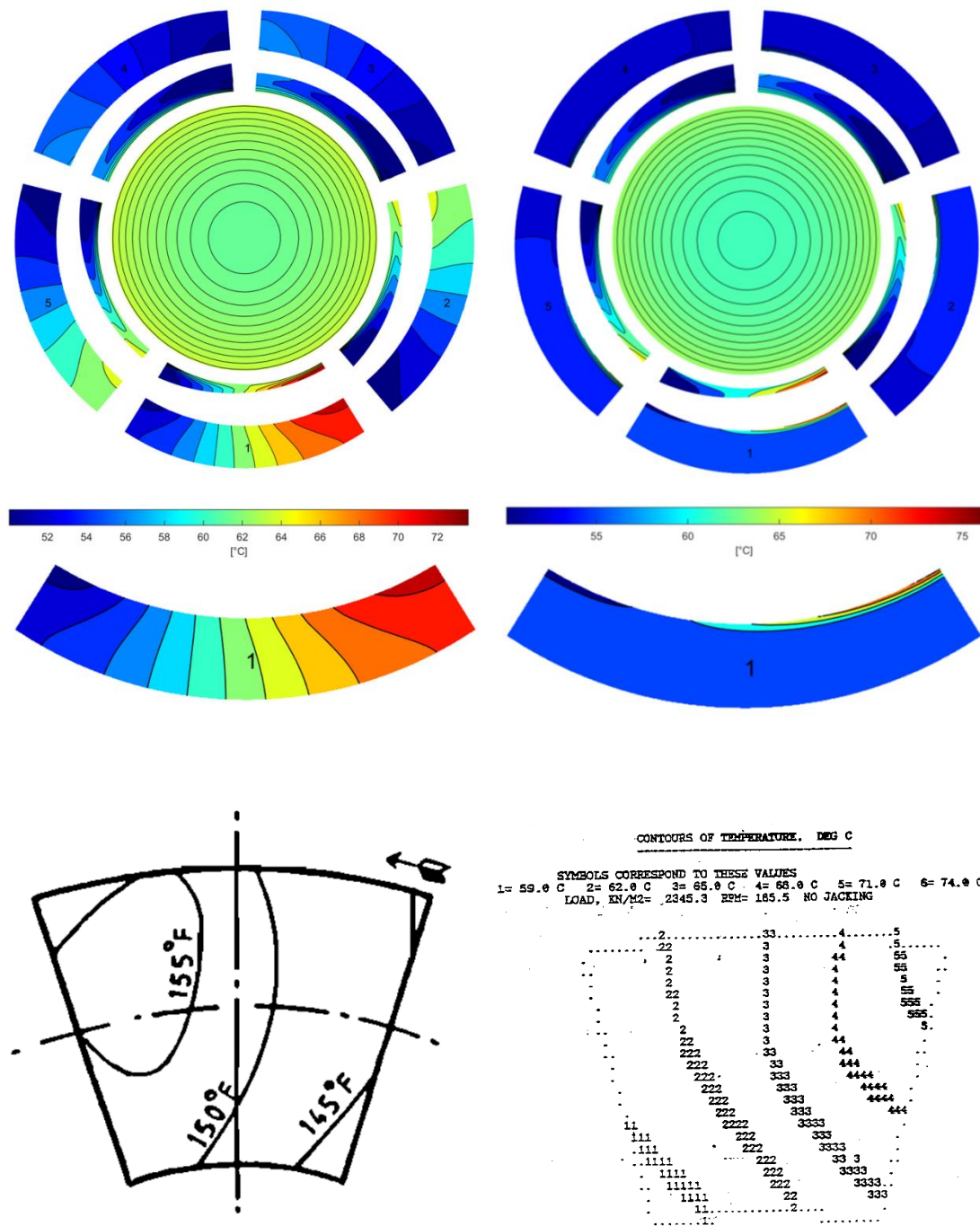


Рис. 2. Распределение температуры смазки в сегментном радиальном подшипнике с баббитом ASTM B-23 #2 (вверху слева), PEEK/CF20 (вверху справа) [11], колодках упорного подшипника с баббитовым покрытием (внизу).

В условиях граничного и сухого трения — характерных для переходных режимов работы агрегатов, таких как пуски, остановки и выбеги — контактные значения давления и температуры существенно возрастают, иногда достигая пределов прочности и температуры плавления материалов, что приводит к локальным повреждениям и ускоренному износу.

В связи с этим возникает необходимость оценки применимости различных подшипниковых материалов при повышенных нагрузках и температурах. Основными критериями являются температурные зависимости механических свойств, в первую

очередь пределов прочности, обеспечивающие достаточный запас прочности для пиковых значений нагрузки, а также вклад механических свойств материала, таких как твердость и предел текучести, в трибологические свойства и сопротивление износу.

Настоящая статья представляет сравнительный обзор механических характеристик промышленных полимерных композиционных материалов (ПКМ) и традиционных баббитовых сплавов в диапазоне температур 80–180 °С. Кроме того, оценивается возможность повышения допустимой температуры эксплуатации гидродинамических подшипников скольжения за счёт замены традиционных баббитов на ПКМ, что может способствовать увеличению долговечности и надежности подшипниковых узлов.

В рамках работ рассматривались следующие механические свойства материалов:

- пределы прочности на растяжение и сжатие ГОСТ 1497–2023, ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012), ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002)
- условный предел текучести с допуском на величину остаточной деформации 0,2% ГОСТ 1497–2023, ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012), ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002)
- твердость по Шору шкала D ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003).
- твердость по Бринеллю ГОСТ 9012-59 (ISO 410-82, ISO 6506-81)

Исследуемые материалы:

- промышленно изготавливаемые и доступные на рынке ПКМ
- распространённые отечественные баббиты марок Б83 и Б16 (ГОСТ 1320–74 и ISO 4383–91),

В качестве образца баббитов иностранных марок исследовался сплав, аналогичный по химическому составу марке TEGOSTAR 738 (Европейский патент: Bearing alloy. № EP 0717121B1 Рег. №: 95117032.3), производимой компанией ESKA Granulate Essen GmbH (Германия). В технической документации приведено вариативное описание химического состава: сплав на основе олова с сурьмой и медью состоящий из 6 - 15 мас.% сурьмы, 3 - 10 мас.% меди, 0,05 - 1 мас.% серебра и 0,1 - 2 мас.% цинка, остальное – олово, с вариантами содержания серебра 0,1 мас.% или от 0,05 до 0,15 мас.%, цинка 0,6 мас.% или от 0,5 до 0,7 мас.%. Марка TEGOSTAR 738 заявляется производителем как баббит с самой высокой статической грузоподъемностью вплоть до высоких скоростей гидродинамического скольжения, высокой устойчивостью к динамическим напряжениям, низкой ползучестью, хорошей стабильностью формы. Однако, как отмечено в [2], заявляемая производителем повышенная несущая способность подшипников, залитых баббитом TEGOSTAR 738, не была подтверждена в ходе натурных испытаний на стендах НПО ЦКТИ и диапазон рабочих температур (110 °С) практически не отличается от баббита Б83.

Состав и производитель исследуемых образцов материалов приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Состав и производитель исследуемых материалов

№ образца	Обозначение	Состав	Производитель
1	330CA30	PEEK + 30% CF	Jilin Joinature Polymer Co., Ltd (Китай)
2	324UG30	PEEK + 30% CF	ООО "ТД Пластмасс Групп", (РФ)
3	К30ПТ	PEEK + антифрикционные добавки	АО НПК «Промышленные технологии», (РФ)
4	TEGOSTAR 738	Sn 81,24% Sb 12,03% Cu 5,91% Zn 0,6% Ag 0,11% Fe 0,09% Pb 0,02%	ООО «НПО Феникс» (РФ, г. Санкт-Петербург)
5	Б16	ГОСТ 1320–74	ООО «НПО Феникс» (РФ, г. Санкт-Петербург)
6	Б83	ГОСТ 1320–74	ООО «Стронгмет» (РФ, г. Санкт-Петербург)

На рис. 3 - 6 представлены полученные значения прочности при растяжении, максимального напряжения при сжатии и условного предела текучести, твердости по Шору и Бринеллю для исследуемых материалов в диапазоне температур 80 – 180 °С. Номер образца согласно Табл. 3.

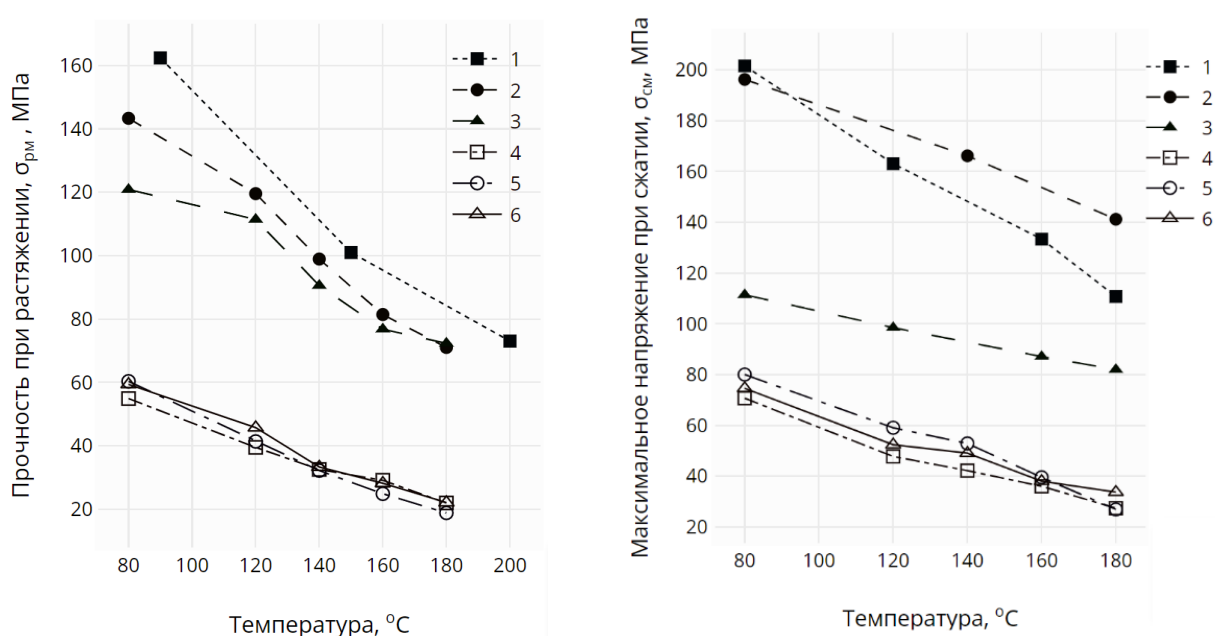


Рис. 3. Значения прочности ПКМ и баббитов при растяжении (слева) и сжатии (справа) при различных температурах

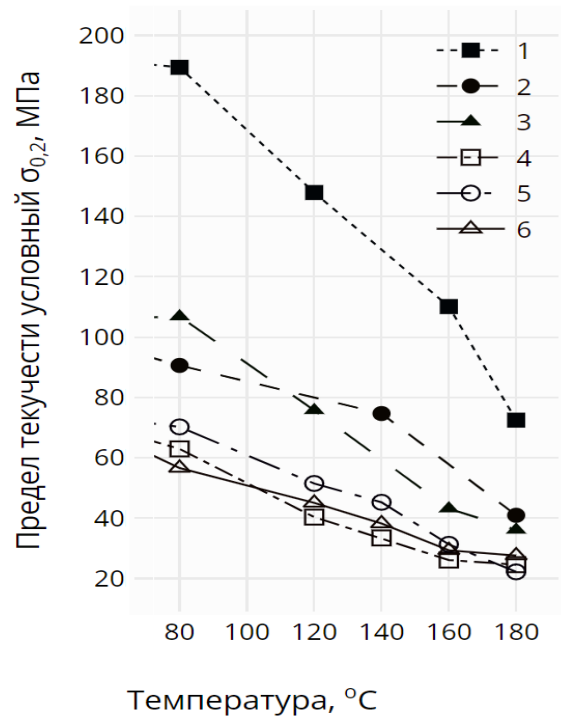
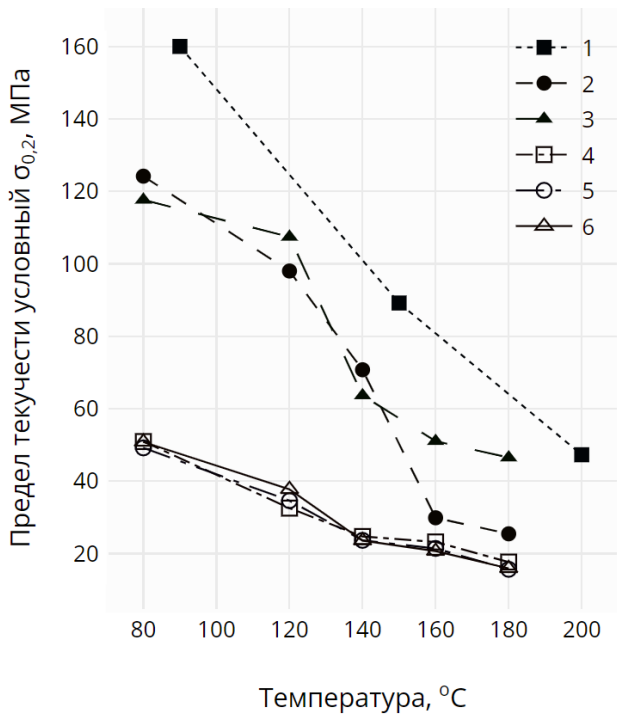


Рис. 4. Значения условного предела текучести с допуском на величину остаточной деформации 0,2% при разгрузении в испытаниях на растяжение (слева) и сжатие (справа) при различных температурах

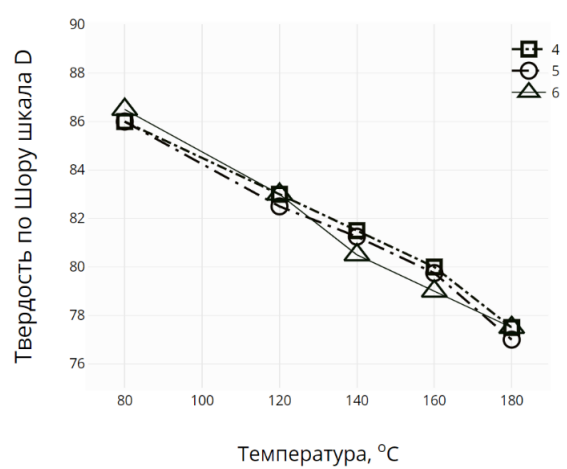
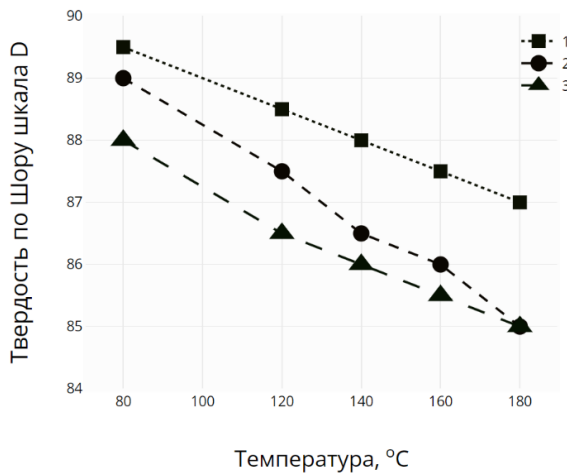


Рис.5. Значения показателей твердости материалов, измеренных по методу Шора шкала D, для ПКМ (слева) и баббитов (справа) при различных температурах

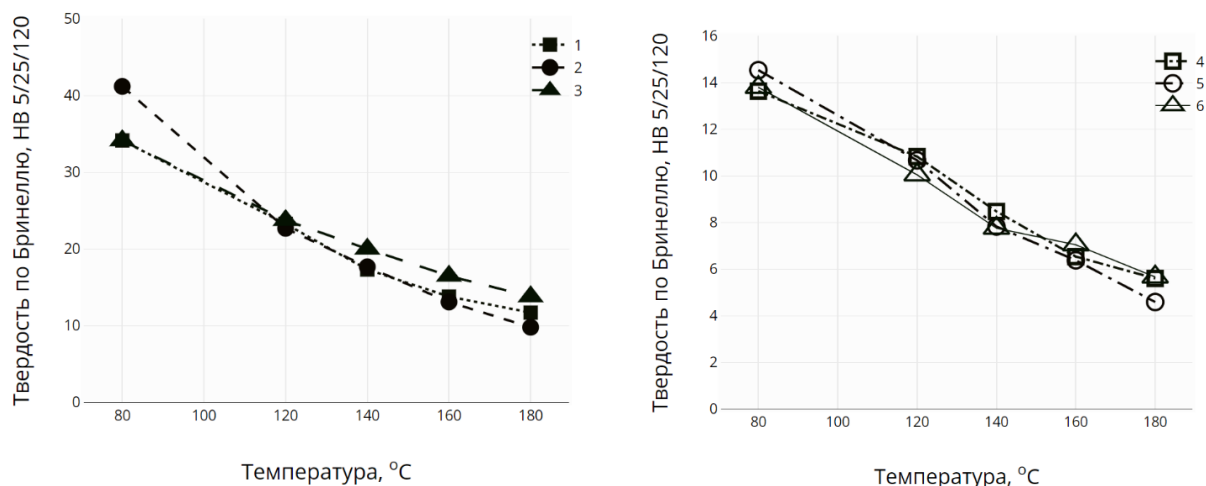


Рис. 6. Значения показателей твердости материалов, измеренных по методу Бринелля, для ПКМ (слева) и баббитов (справа) при различных температурах

Из анализа представленных данных следует, что ПКМ существенно превосходят баббитовые сплавы по всем представленным механическим показателям, особенно при температурах выше 80 °С. Наблюдается не только превышение твёрдости у ПКМ по сравнению с баббитами, но и более высокая стабильность показателей (меньшая деградация твердости) при повышении температуры.

При повышении температуры наблюдается более высокая стабильность прочностных характеристик у ПКМ, обусловленная высокой термостойкостью полимерной матрицы и эффективным распределением нагрузки через армирующую фазу. В то же время баббиты демонстрируют выраженное снижение предельных напряжений, что связано с описанными в литературе механизмами интенсификации при 60–120 °С диффузионных процессов, недостаточным сопротивлением ползучести и размягчением эвтектических структур, а при температурах близких к 200 °С - ухудшением микроструктур, коагуляции фаз и переходом материала в вязкотекучее состояние.

В процессе проведённых исследований не было выявлено существенно более высоких показателей механических свойств аналога баббита TEGOSTAR 738 по сравнению с другими исследованными марками баббитов (рис. 3 - 6, образцы №№ 4 - 6). Полученные результаты подтверждают предыдущие исследования [2], указывающие на сопоставимость характеристик импортных и отечественных баббитов при аналогичном химическом составе.

Для практической оценки применимости различных подшипниковых материалов целесообразно сравнить значения их механических свойств при одинаковых температурах и определить коэффициенты запаса прочности (превышения значений по сравнению с базовыми материалами) при их замене. Результаты представлены ниже в пунктах 1–2.

1. Коэффициент превышения значения прочности ПКМ по сравнению со значениями прочности баббитового сплава Б83 в качестве базового. Позволяет количественно оценить увеличение запаса прочности подшипника при одних и тех же температурах в условиях разрушающих нагрузок при замене базового материала на ПКМ. Данные показатели для ПКМ №№ 1 - 3 по сравнению баббитом марки Б83 представлен на рис. 7 и дают значения от 1,5 до 4, существенно увеличиваясь с ростом температуры.

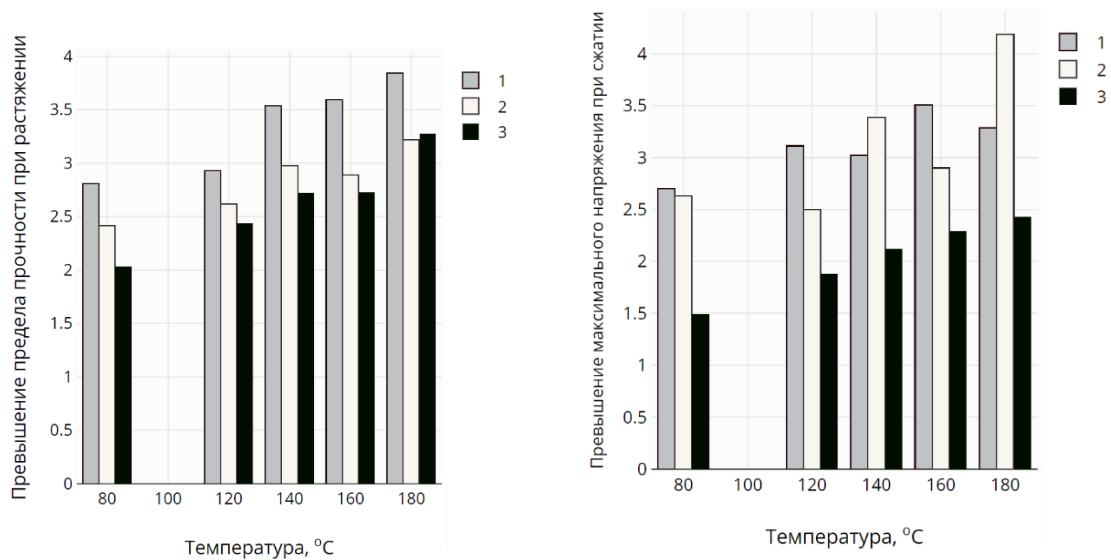


Рис. 7. Коэффициент превышения прочности ПКМ (образцы №№ 1 – 3) по сравнению с баббитом марки Б83 при растяжении (слева) и сжатии (справа) при различных температурах

2. Коэффициент превышения значения твердости ПКМ относительно базового материала баббита марки Б83. Сравнительный анализ показывает, что ПКМ демонстрируют относительное превышение твердости от 1.7 до 3 раз по отношению к базисным значениям для Б83 (рис. 8). Такой «запас твердости» позволяет предположить существенно более высокую нагрузочную способность и повышенную износостойкость ПКМ по сравнению с традиционными баббитами, в т.ч. аналогами импортных.

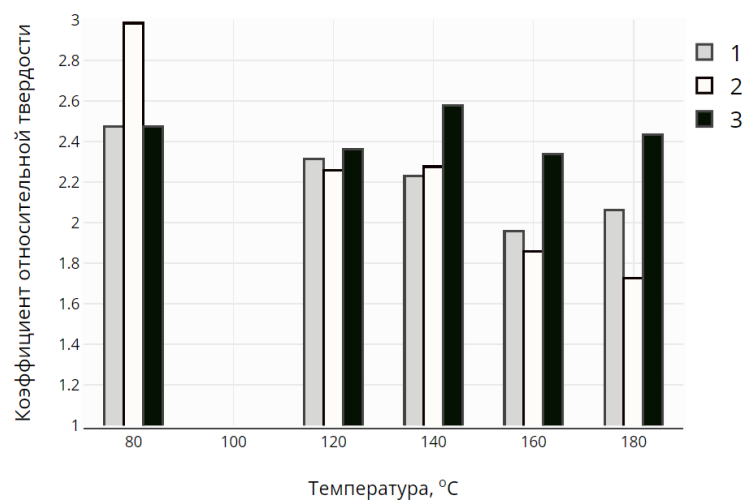


Рис. 8. Относительная твердость по Бринеллю для ПКМ относительно марки баббита Б83 при различных температурах

Для практической оценки диапазонов допустимых рабочих температур целесообразно сравнить температурные значения (эквивалентные температуры), при которых механические свойства антифрикционных материалов совпадают. Результаты для исследуемых ПКМ и баббитов представлены ниже.

3. Эквивалентные значения рабочих температур, при которых ПКМ и баббиты имеют равные показатели условного предела текучести. Позволяет оценить, до каких значений можно увеличить рабочие температуры для ПКМ по сравнению с баббитом, при которых материалы остаются в зоне упругих деформаций и сохраняют равными свои прочностные эксплуатационные характеристики. Данные показатели увеличения рабочих температур для ПКМ №№ 1 - 3 (по оси ординат) относительно выбранных температур баббита марки Б83 (по оси абсцисс) представлен на рис. 9. Можно отметить, что рабочие нагрузки, допустимые для баббитовых сплавов при их максимальной температуре эксплуатации 120 °С, могут быть приложены к подшипникам на основе ПКМ при температурах, превышающих 200 °С.

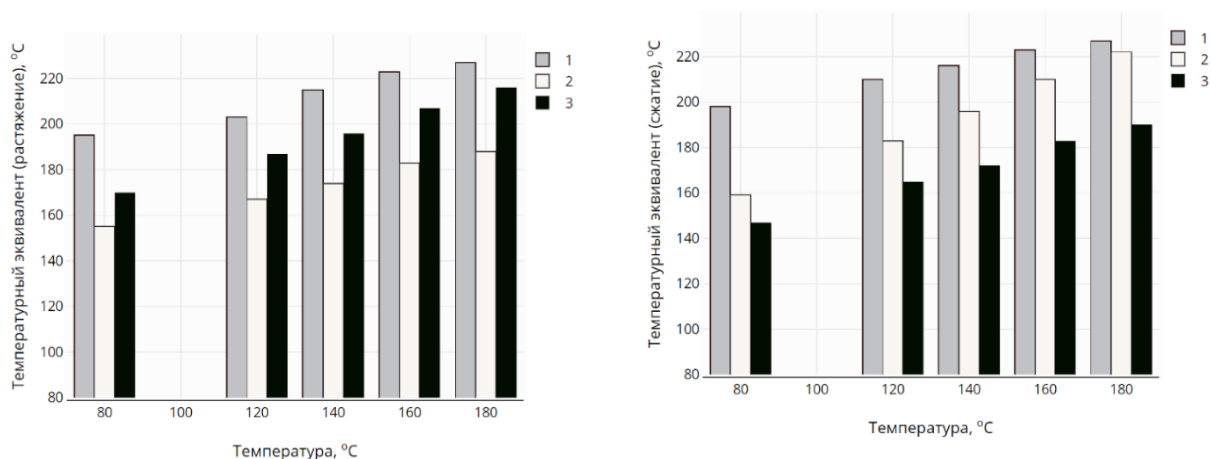


Рис. 9. Эквивалентные температуры равных значений условного предела текучести ПКМ (образцы №№ 1 – 3) и баббита марки Б83 при растяжении (слева) и сжатии (справа) при различных температурах

4. Эквивалентные температуры равных значений твердости. Принимая во внимание, что в отдельных конструкторских решениях подшипниковый материал может сохранять работоспособность даже при снижении твёрдости ниже рекомендуемого предела в 12 НВ [9, с. 47-48], представляется возможным использовать твердость как ориентир для оценки предельно допустимой рабочей температуры. Такой подход позволяет определить, при каких температурах исследуемые материалы сохраняют остаточную прочность и износостойкость, достаточные для продолжения эксплуатации подшипника при выбранных значениях твердости. На рис. 10 приведена оценка температурных значений, при которых различные материалы достигают одинаковых значений твёрдости. Эти значения могут быть интерпретированы как предельные рабочие температуры при заданном уровне допустимой твёрдости. График служит основанием для сравнительной оценки термической устойчивости подшипниковых материалов и позволят прогнозировать температурные границы их надёжной эксплуатации.

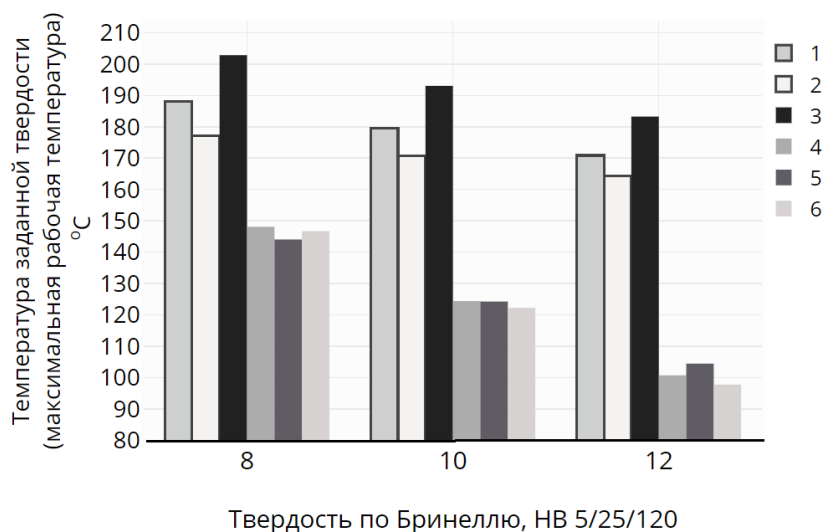


Рис. 10. Значения температур (по оси ординат), при которых твердость по Бринеллю у материалов принимает заданные значения (по оси абсцисс)

Выводы.

1. Представленные данные о механических свойствах антифрикционных материалов при температурах выше 80 °С демонстрируют существенные различия между промышленно изготавливаемыми ПКМ и традиционными баббитовыми сплавами. Эти различия обусловлены принципиально различными структурными механизмами обеспечения прочностных характеристик и поведения материалов в условиях повышенных температур.
2. ПКМ обладают значительно более высокими значениями прочности, условного предела текучести и твердости по сравнению с баббитами. При температурах выше 100 °С прочность баббитов при растяжении снижается до уровня, близкого к пределу текучести, что существенно ограничивает их несущую способность. Несмотря на высокую пластичность, обеспечивающую устойчивость к ударным нагрузкам, именно она часто становится причиной аварийных разрушений подшипников при перегревах и деформациях.
3. При температурах свыше 120 °С применение баббитов становится всё менее обоснованным из-за выраженной термической деградации прочностных характеристик, в первую очередь — пределов прочности и текучести. Указанные свойства подробно исследованы и подтверждаются настоящим исследованием и многочисленными научными данными, начиная с 1930-х годов (напр. см. рис. 11). Это связано с эвтектической структурой баббитов и склонностью к размягчению при нагреве.

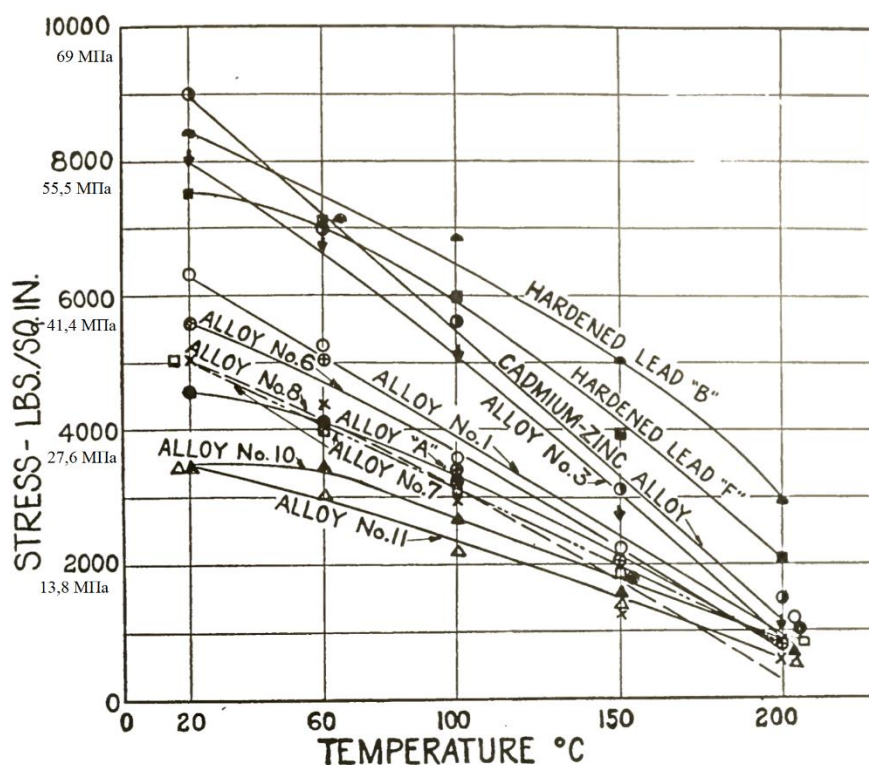


Рис. 11. Значения условного предела текучести при сжатии баббитов различных марок (исследование 1932 г.) [10]

4. Анализ свойств импортной марки баббита TEGOSTAR 738 показывает, что она не превосходит по прочности и твердости аналогичные оловянные отечественные баббиты, такие как, например, Б83, и представляет собой лишь незначительно химически модифицированный вариант стандартных отечественных баббитов (ср. Табл. 2 и 3). Это указывает на отсутствие существенных эксплуатационных преимуществ при использовании импортных решений, особенно с учётом их высокой стоимости и ограниченной доступности. Среди баббитов отечественные марки сохраняют конкурентоспособность по критерию «цена–качество».

5. В отличие от баббитов, армированные углеродными волокнами и другими упрочняющими добавками ПКМ демонстрируют более высокую и стабильную прочность при температурах выше 80 °C благодаря термостойкой полимерной матрице и эффективной передаче нагрузок через армирующую фазу вещества. Данные свойства ПКМ позволяют существенно расширить рабочий диапазон эксплуатации подшипников (рис. 12).

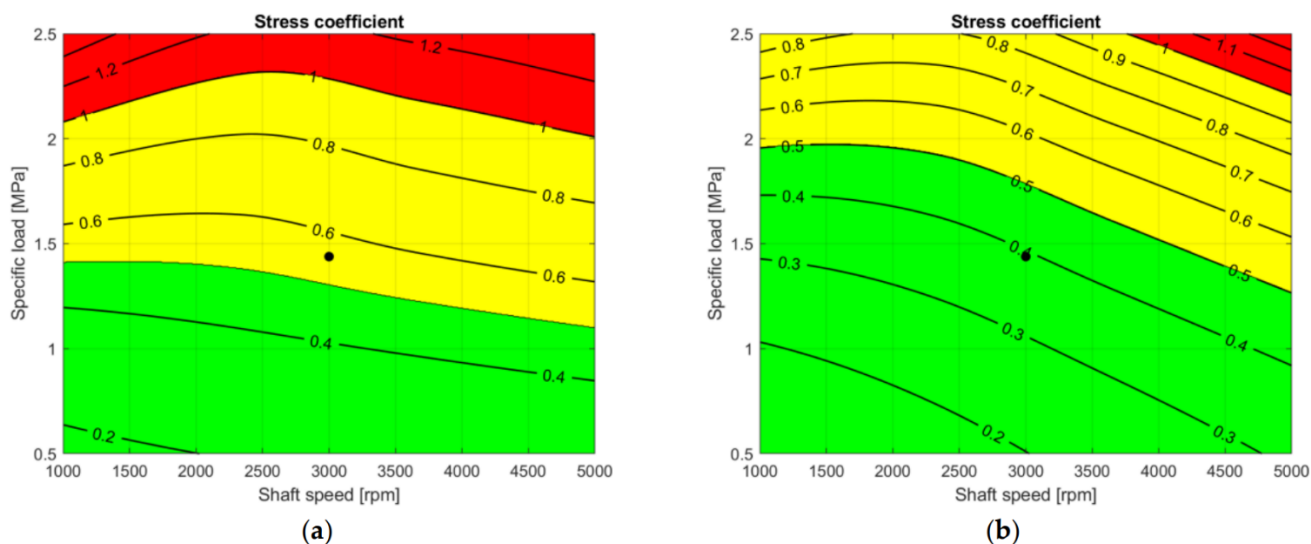


Рис. 12. Рабочий диапазон эксплуатации сегментного радиального подшипника из баббита (а) и ПЭЭК (б) в виде диаграммы: ось абсцисс - скорость вращения вала (об/мин), ординат – нагрузка (МПа) [11].

6. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о преимуществах ПКМ, доступных на российском рынке, для применения в подшипниках скольжения по сравнению с баббитовыми материалами отечественного и импортного производства. ПКМ обладают значительным технологическим и эксплуатационным потенциалом и могут рассматриваться в качестве эффективной альтернативы баббитовым сплавам при необходимости повышения допустимых рабочих температур подшипниковых узлов. Это открывает возможности для технической реализуемой и экономически целесообразной замены баббитов на ПКМ с целью увеличения термической надёжности узлов трения.

7. В настоящее время в компании ведутся дальнейшие исследования и ожидается получение новых данных в области:

- расширенного комплекса механических и трибологических испытаний материалов и конструкций из них, включая оценку прочности соединений, износостойкости, теплопроводности и взаимодействия материалов с различными типами смазок;

- разработки новых составов ПКМ, адаптированных под различные режимы эксплуатации подшипников скольжения.

Литература

1. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения. - М.: Машиностроение, 1980 г. – 223 с.
2. Эсперов Д.Г. Совершенствование конструкций опорных подшипников скольжения паровых турбин на основании экспериментальных исследований: дис. канд. техн. наук. — Санкт-Петербург: ОАО «НПО ЦКТИ», 2015. — 192 с
3. Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н., Орлов П.В. Трение и модифицирование материалов трибосистем. - М.: Наука, 2000 г. – 280 с.
4. Elwell R. C. Thrust Bearing Temperature. Parts 1 & 2 // Machine Design. – 1971. – 24 June. – P. 79–81; 8 July. – P. 91–94.

5. Овчаренко Н. Ю., Егорушков М. Ю., Романенков П. Г., Константинов А. Е. Термоустойчивые материалы в опорах стационарных газотурбинных установок // Турбины и дизели. – 2024. – № 1 (112). – С. 98–103.
6. Смирнов Е. А., Толстихин Ю. Ю., Шишов А. В. и др. Применение антифрикционных материалов в подшипниках скольжения центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов // Газовая промышленность. – 2023. – № 4 (857). – С. 74–81.
7. Овчаренко Н. Ю., Ладенко С. В., Егорушков М. Ю. Технический прогресс в разработке новых подшипниковых материалов узлов трения // Турбины и дизели. – 2023. – № 4 (109). – С. 16–18.
8. Бронников А. Н., Забелин Н. Н., Шарипов Ш. Г. и др. Применение подшипников скольжения с полимерным антифрикционным покрытием на газоперекачивающем агрегате ГТК-10М // Газовая промышленность. – 2024. – № 4 (864). – С. 84–89.
9. Воскресенский В. А., Дьяков В. И. Расчет и проектирование опор скольжения. – М. : Машиностроение, 1980. – 223 с.
10. Herschman, H. K., & Basil, J. L. Mechanical properties of white metal bearing alloys at different temperatures. Proceedings of the American Society for Testing Materials, 1932. 32(Part 2), с. 536.
11. Chatterton S., Gheller E., Vania A., Pennacchi P., Dang P.V. Investigation of PEEK Lined Pads for Tilting-Pad Journal Bearings. Machines 2022, 10, 125. DOI: 10.3390/machines10020125