

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 621.822

**МЕТОДИКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ИЗ SiSiC**© 2023 г. М. Н. Ерофеев<sup>а</sup>, И. С. Сплавский<sup>а,\*</sup><sup>а</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: spl-igor@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.05.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

Статья посвящена модельным трибологическим испытаниям и анализу полученных результатов исследования новых материалов и покрытий, таких как SiSiC, с целью ранжирования их и рекомендации по применению в упорных гидродинамических узлах трения, работающих при высоких скоростях и нагрузках.

*Ключевые слова:* упорный подшипник, коэффициент трения, износ, покрытия

**DOI:** 10.31857/S0235711923060068, **EDN:** EFGWCF

При эксплуатации в экстремальных условиях работоспособность новой техники обеспечивается конструктивными особенностями поверхностей трения и применением новых перспективных материалов. Условия работы, которые можно отнести к экстремальным, возникают в крупногабаритных узлах трения, работающих при высоких скоростях скольжения и нагрузках.

Отличительная особенность условий эксплуатации циркуляционных насосов — это их непрерывная и надежная работа в течение длительного времени, исчисляемого десятками тысяч часов, без ремонта и непосредственного обслуживания. Одними из наиболее ответственных и, в большинстве случаев, определяющими работоспособность насосов, являются радиальные и осевые подшипники скольжения и торцовые уплотнения, для которых в качестве смазывающей и охлаждающей жидкости используется перекачиваемая среда, в основном дистиллированная вода, а также нефтяные масла и др.

Материалы подшипников скольжения могут быть металлические и неметаллические. Металлические делятся на пластичные (<HB 50), мягкие (HB 50–100) и твердые (>HB 100) подшипниковые сплавы. К пластичным принадлежат баббиты, свинцовые бронзы, алюминиевые сплавы, серебро; к мягким — бронзы оловянные, оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-цинковые; к твердым — бронзы алюминий-железные и чугуны.

Неметаллические материалы для подшипников скольжения. В качестве материалов для подшипников используют пластики, твердые породы натурального дерева, усиленную древесину, резину, графит. Все перечисленные материалы применяют в сочетании с валами повышенной твердости (>HRC 50). При этом условия неметаллические подшипники обнаруживают высокую износостойкость.

Отличительная особенность неметаллических подшипниковых материалов — низкая теплопроводность. Почти все они лучше работают на воде, чем на масле.

Применение водяной смазки оправдано в тех случаях, когда машина работает с водой (водяные насосы) или в воде (установки гребных винтов, подводный механизированный инструмент и т.д.). В отдельных случаях применяют водяную смазку и на ма-

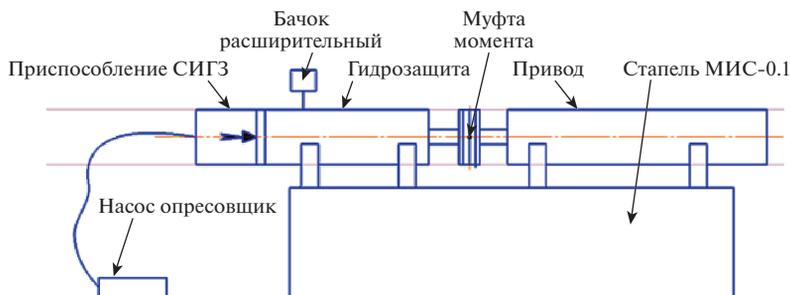


Рис. 1. Принципиальная схема испытаний.

шинах общего назначения. При водяной смазке валы выполняют из закаливающих коррозионностойких сталей (типа 30X13, 40X13). Металлические корпуса подшипников необходимо защищать от коррозии.

Для высоконагруженных быстроходных подшипников, рассчитанных на работу в области жидкостной смазки, применяют почти исключительно пластичные сплавы в виде тонких слоев, наносимые на стальные (реже бронзовые) втулки и вкладыши [1].

Мягкие и твердые сплавы применяют для изготовления подшипников граничной и полужидкостной смазки, работающих при умеренных скоростях.

Из литературных источников [2–4] известно, что подшипники скольжения из карбида кремния характеризуются очень высокой термической стойкостью при крайне низком тепловом расширении, а также высочайшей твердостью. Поэтому трение и износ очень низки, практически отсутствуют при возникновении гидродинамического смазывания. Именно поэтому эти материалы также подходят для работы в сложных условиях. Однако, нет информации по работе таких подшипников при больших скоростях.

SiSiC-керамику также называют керамикой из спеченного карбида кремния с реакционной связью, это керамический материал высокого класса с отличной стойкостью к истиранию и высокой температурной стойкостью, а также обладает преимуществом коррозионной стойкости к воздействию различных химических веществ. SiSiC-керамику можно использовать как износостойкий материал в горнодобывающей промышленности, электростанции, сталелитейного завода и т.д. Также такой материал можно использовать в качестве огнеупорного материала в керамической промышленности, металлургической промышленности и т.д. Благодаря отличной технологии и режущей кромке оборудования, Duratec SiSiC-керамики пользуются отличной репутацией на рынке.

Преимущества SiSiC-керамики следующие: 1) отличная износостойкость, ударопрочность и коррозионная стойкость; 2) отличная плоскостность и отличная термостойкость до 1350°; 3) простота установки; 4) дольше срок службы (примерно в 5 раз больше, чем у глинозема керамики и в 6 раз больше, чем у полиуретана).

Были проведены трибологические испытания на экспериментальном стенде МИС-01 (рис. 1), предназначенном для испытаний осевых опор гидрозащиты высокооборотных лопастных насосов [5]. Испытания включали в себя оценку времени выхода на гидродинамический режим и коэффициент трения.

Режимы испытаний, следующие: 1) скорость вращения 1000, 3000, 6000 и 10000 об/мин; нагрузка 200, 500, 1000, 1500, 2000 Н; 2) время испытаний 10 мин на каждой ступени нагружения; 3) среда – масло турбинное Тп22 (желательная система смазки трибопары – циркуляционная с охлаждением масла).

Основываясь на конструкторской документации, содержащей размеры и условия работы упорных подшипников главных циркуляционных насосов ВВЭР 1000 была разработана методика исследовательских испытаний модельного образца упорных

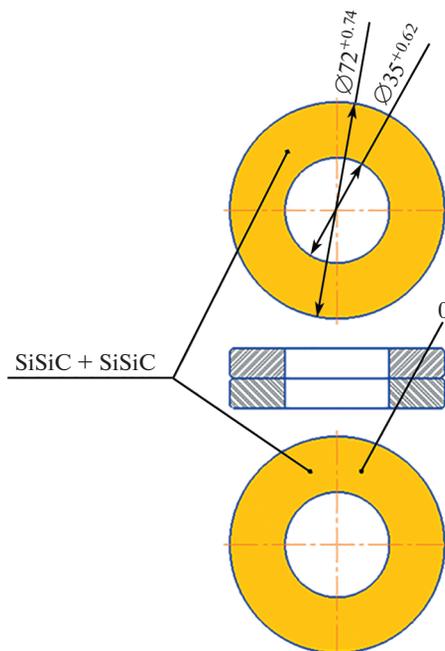


Рис. 2. Экспериментальный образец – пята и подпятник из карбида кремния SiSiC.

подшипников. В основе методики лежит применение условий нагружения экспериментальных образцов режимами, рассчитываемыми из условия равенства грузоподъемности модельного трибосопряжения грузоподъемности упорного подшипника ГЦН ВВЭР 1000, определяемому по произведению  $pV$ .

Основываясь на литературных данных [6–8], в которых указывается на уровень нагруженности трибосопряжений упорных подшипников главных циркуляционных на-

Таблица 1. Технические характеристики SiSiC

Элемент	Значение
Температура применения, °С	1380
Плотность, г/см <sup>3</sup>	>3.02
Открытая пористость, %	<0.1
Прочность на изгиб, МПа	250 (20)
	280 (1200)
Модуль упругости, ГПа	330 (20)
	300 (1200)
Теплопроводность	45 (1200)
Коэффициент температурного расширения, $K^{-1} \times 10^{-6}$	4.5
Жесткость, мг-экв/л	13
Кислотостойкий щелочной	отличный

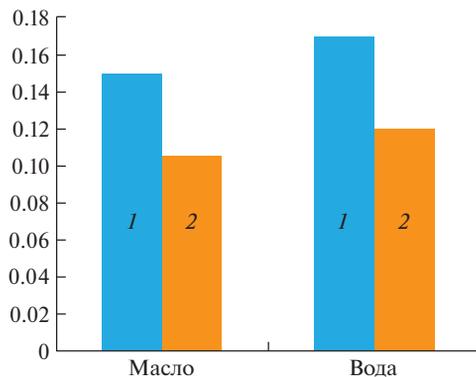


Рис. 3. Диаграмма статического трения экспериментального образца, пята SiSiC + подпятник SiSiC: 1 – трение покоя; 2 – трение движения.

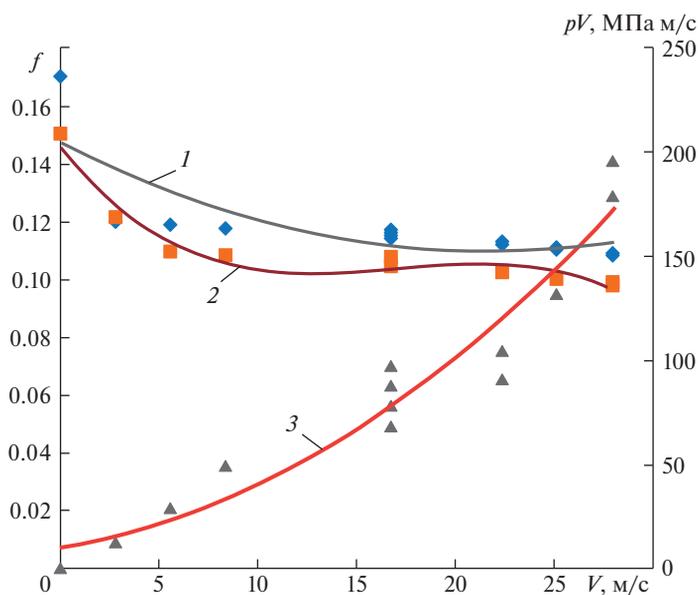


Рис. 4. Трибограмма пары SiSiC по SiSiC в разных средах: 1 – вода; 2 – масло; 3 –  $pV$ .

сосов, разработана методика экспериментальной оценки работоспособности по критерию грузоподъемности экспериментальных образцов.

Основные этапы экспериментов: 1) определение статического трения трибосопряжений, возникающего при страгивании и движении с небольшой скоростью. В этом случае определяется предельное значение момента на валу привода упорного подшипника; 2) эксперименты производятся при сухой фрикционной камере и при заполненной фрикционной камере рабочей жидкостью (вода техническая и масло); 3) эксперименты проводятся в динамическом режиме для выявления всего диапазона работоспособности трибосопряжения, в результате которых определяется предельное значение его грузоподъемности  $pV$ .

**Экспериментальные трибологические исследования экспериментальных образцов новых материалов и покрытий на стенде.** На рис. 2 представлена пара образец–пята и подпятник из карбида кремния SiC+SiC.

Таблица 2. Протокол испытаний трибосопряжения SiC+SiC в рабочей среде – техническая вода

	0	1000	2000	3000	6000	6000	6000	6000	6000	8000	8000	8000	9000	9000	10000	10000
Скорость, об/мин	0	80	90	100	70	80	80	90	100	70	70	70	90	100	110	10000
Давление на плунжер, атм	70	80	90	100	70	80	80	90	100	70	70	70	90	100	110	120
Осевое, кГ	1266	1446.9	1627.8	1808.6	1266	1446.9	1446.9	1627.8	1808.6	1266	1446.9	1446.9	1627.8	1808.6	1989.5	2170.4
Момент, Нм	57.57	46.45	51.82	57.09	39.62	44.9	44.9	50.07	55.15	38.27	43.35	43.35	48.33	53.22	58.01	62.7
$D$ , мм	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
$d$ , мм	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
$R_{\text{ср}}$ , мм	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75
Площадь сектора $S_1$ , мм <sup>2</sup>	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109
Площадь контакта $S$ , мм <sup>2</sup>	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109
$p$ , кг/см <sup>2</sup>	40.7	46.5	52.4	58.2	40.7	46.5	46.5	52.4	58.2	40.7	46.5	46.5	52.4	58.2	64	69.8
$p$ , МПа	4.1	4.7	5.2	5.8	4.1	4.7	4.7	5.2	5.8	4.1	4.7	4.7	5.2	5.8	6.4	7.0
$V$ , м/с	0	2.8	5.6	8.4	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	25.2	28.0	28.0
$pV$ , (кг/см <sup>2</sup> ) · м/с	0	130.3	293.2	488.6	684.1	781.8	781.8	879.5	977.3	912.1	1042.4	1042.4	1319.3	1465.9	1791.7	1954.5
$pV$ , МПа · м/с	0	13	29	49	68	78	78	88	98	91	104	104	132	147	179	195
Коэф. трения $f$	0.17	0.12	0.119	0.118	0.117	0.116	0.116	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112	0.111	0.11	0.109	0.108
$N_{fl}$ , fМПа · м/с	0	1.56	3.49	5.77	8	9.07	9.07	10.11	11.14	10.31	11.68	11.68	14.64	16.12	19.53	21.11
$N_{\text{го}}$ , W/m <sub>2</sub>	0	4861.3	10846.5	17926.2	24883.9	28195.7	28195.7	31446.8	34637.01	32044.3	36297.97	36297.97	45529.4	50132.5	60716.05	65628.02

Таблица 3. Протокол испытаний трибосопряжения SiC+SiC в рабочей среде – масло турбинное Тп22

Скорость, об/мин	0	1000	2000	3000	6000	6000	6000	6000	6000	8000	8000	9000	9000	9000	10000	10000	10000
Давление на плунжер, атм	70	80	90	100	70	80	90	100	100	70	80	90	100	100	110	120	120
Осевое, кГ	1266.0	1446.9	1627.8	1808.6	1266.0	1446.9	1627.8	11808.6	11808.6	1266.0	1446.9	1627.8	1808.6	1808.6	1989.5	2170.4	2170.4
Момент, Нм	50.8	46.83	47.46	52.25	36.24	41.03	45.72	50.32	50.32	34.88	39.48	43.98	48.38	48.38	52.69	56.9	56.9
$D$ , мм	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
$d$ , мм	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
$R_{\text{ср}}$ , мм	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75	26.75
Площадь сектора $S_1$ , мм <sup>2</sup>	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109
Площадь контакта $S$ , мм <sup>2</sup>	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109	3109
$p$ , кг/см <sup>2</sup>	40.7	46.5	52.4	58.2	40.7	46.5	52.4	58.2	58.2	40.7	46.5	52.4	58.2	58.2	64	69.8	69.8
$p$ , МПа	4.1	4.7	5.2	5.8	4.1	4.7	5.2	5.8	5.8	4.1	4.7	5.2	5.8	5.8	6.4	7	7
$V$ , м/с	0	2.8	5.6	8.4	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	25.2	28	28	28
$pV$ , кг/см <sup>2</sup> · м/с	0	130.3	293.2	488.6	684.1	781.8	879.5	977.3	977.3	912.1	1042.4	1319.3	1465.9	1465.9	1791.7	1954.5	1954.5
$pV$ , МПа · м/с	0	13	29	49	68	78	88	98	98	91	104	132	147	147	179	195	195
Коэф. трения $f$	0.15	0.121	0.109	0.108	0.107	0.106	0.105	0.104	0.104	0.103	0.102	0.101	0.1	0.099	0.098	0.098	0.098
$N_{\text{л}}, f$ МПа · м/с	0	1.58	3.2	5.28	7.32	8.29	9.24	10.16	10.16	9.39	10.63	13.33	14.66	14.66	17.74	19.15	19.15
$N_{\text{л}}, W/m_2$	0	4901.9	9935.4	16407.01	22757.1	25765.1	28712.3	3598.7	3598.7	29208.5	33057.1	41427.7	45575.02	45575.02	55145.8	59551.4	59551.4

**Результаты исследований.** На рис. 3 представлена диаграмма статического трения экспериментального образца пяты SiSiC+подпятник SiSiC.

В табл. 2 и 3 показаны протоколы испытаний трибосопряжения SiC+SiC в рабочей среде – вода и в рабочей среде – масло турбинное Тп22.

На рис. 4 показана трибограмма зависимости скорости трения скольжения от коэффициента трения и грузоподъемности пары SiSiC по SiSiC в разных средах.

**Выводы.** Результаты экспериментальных данных показали, что наиболее перспективными материалами для применения их в упорно-опорных подшипниках скольжения ГЦН ВВЭР на больших скоростях являются материалы трибосопряжений SiSiC по SiSiC (образец пяты SiSiC + подпятник SiSiC). Применение таких пар трения может быть эффективным средством снижения сил трения при высоких скоростях (скорости оборотов до 10000 об/мин).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. Чичинадзе А.В. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
2. Qiu Y., Khonsari M.M. Investigation of tribological behaviors of annular rings with spiral groove // Tribology International. 2011. V. 44. P. 1610.
3. Suh M., Chae Y., Kim S., Hinoki T., Kohyama A. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction // Advanced Materials Research. 2008. V. 47–50. P. 507.
4. Гаврилко А.И. Повышение надежности энергоснабжения основных технологических потребителей сверхмощных энергоблоков АЭС // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 1. С. 26.
5. Черемисинов Е.М., Славский И.С. Методика испытания трибологических свойств осевых опор // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 3. С. 100. <https://doi.org/10.31857/S0235711923020025>
6. Юшин Е.С. Насосное оборудование системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2019.
7. Ветохин В.И. Погружной асинхронный электродвигатель открытого исполнения нового поколения типа “АМВ НГС” для нефтегазовых скважин // Морской вестник. 2011. № 3 (39). С. 51.
8. Коновалов А.С., Копанский А.С., Култышев В., Уткин А.С. Расчет измерительно-испытательного стенда для главного циркуляционного насоса АЭС. Метрологическое обеспечение инновационных технологий // Международный форум: Тезисы. 2019. С. 211.