

Металлокерамический композиционный материал для конструкций надбандажных уплотнений проточной части паровых турбин

- **Большаков Б. О.**¹, ООО “НПП “Уралавиаспецтехнология”, Республика Башкортостан, Уфа
- **Галиакбаров Р. Ф.**, ООО “НПП “Уралавиаспецтехнология”, Республика Башкортостан, Уфа
- **Смыслов А. М.**, доктор техн. наук, Уфимский государственный авиационный технический университет, Республика Башкортостан, Уфа
- **Кулешов А. С.**, ПАО “Силовые машины”, Санкт–Петербург
- **Усачев К. М.**, канд. техн. наук, ПАО “Силовые машины”, Санкт–Петербург

Представлены результаты разработки нового металлокерамического композиционного материала для применения в конструкциях уплотнений проточной части паровых турбин. Разработаны концепция создания нового материала и модель его эффективной работы в случаях задевания гребней лопаточного аппарата. Приведены данные по его структуре, физико-механическим свойствам, опытно-промышленной эксплуатации в составе надбандажных уплотнений экспериментальной паровой турбины, а также серийно изготавливаемых турбин различной мощности.

Ключевые слова: уплотнения, проточная часть, паровая турбина, металлокерамический композиционный материал, микроструктура, механические свойства, истираемость.

Эффективность и надёжность эксплуатации паровых турбин определяются, в том числе и эффективностью применяемых в проточной части турбин типов уплотнений, их конструкциями и материалами исполнения, расходными, динамическими и другими характеристиками [1].

Сегодня турбостроительные фирмы применяют в проточных частях паровых турбин уплотнения различных конструкций: с использованием газотермического напыления порошковых материалов [2 – 4], сотовые [5 – 7], щёточные [8 – 12] и др. Перечисленные конструкции уплотнений обладают как положительными, так и отрицательными показателями эксплуатации.

Паразитные протечки пара через уплотнения сильно зависят от радиальных зазоров в них. Стремление значительно уменьшить зазоры приводит в процессе эксплуатации к задеваниям гребешков рабочих лопаток об уплотнения. Для обеспечения условий безопасной работы уплотнений требуется, чтобы в результате этого контакта гребни лопаток сохраняли свою геометрию, а материал уплотнений достаточно легко истирался без налипания на гребешки лопаток.

Исходя из сказанного, необходимость совершенствования уже имеющихся и разработка новых конструкций уплотнений с использованием новых материалов, позволяющих решить задачу безопасной работы в условиях контакта рабочих лопаток и элементов уплотнения, являются актуальными для турбостроения. С учётом опыта экс-

плуатации различных типов уплотнений можно сформулировать ряд основных требований, которым они должны удовлетворять:

- обладать требуемым уровнем прочности;
- сопротивляться эрозионному и коррозионному воздействию;

- обеспечивать безопасное врезание гребней лопаточного аппарата, т.е. обладать хорошей истираемостью;

- материал уплотнений должен иметь сплошную структуру с минимальным уровнем пористости.

Применение классических материаловедческих подходов формирования физико-механических свойств материалов, таких как термомеханическая, деформационная и термическая обработки, не обеспечит одновременного сочетания прочности и истираемости. При разработке новых материалов уплотнений, в качестве базовой технологии изготовления необходимы альтернативные способы получения изделий, среди которых особое место занимает порошковая металлургия [13].

Она характеризуется высокой производительностью процесса, позволяет варьировать компонентный состав материала и тем самым регулировать свойства готового изделия, получать изделия конечной формы и минимизировать затраты на финишную механическую обработку.

В работах [14 – 18] приводятся сведения об обеспечении требуемых показателей истираемости порошковых материалов за счёт введения в состав исходной шихты так называемой “твёрдой” смазки, к которой относятся синтетические и при-

¹ Большаков Борис Олегович: bobolshakov@gmail.com

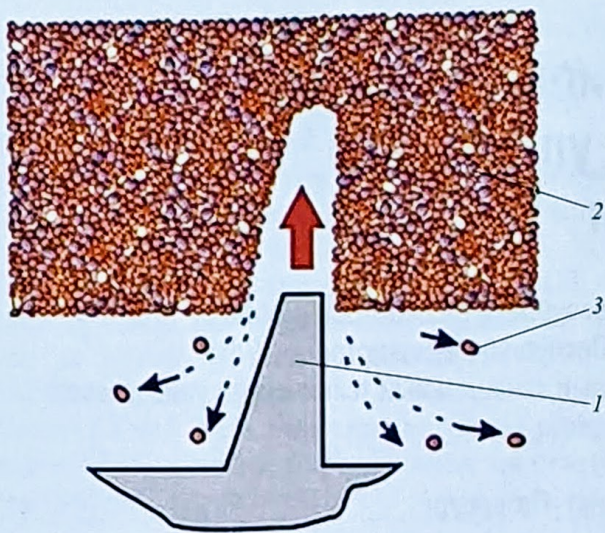


Рис. 1. Модель врезания гребня лопатки в металлокерамический композиционный материал (стрелкой указано движение гребня лопаточного аппарата при врезании):

1 – гребень лопатки; 2 – металлокерамический материал нового поколения; 3 – локальное отделение частиц

родные кристаллические материалы с графитоподобной структурой. Подобное сочетание компонентов активно используют при нанесении прирабатываемых (уплотняющих) покрытий в газотурбиностроении. Однако в научно-технической литературе отсутствуют сведения о возможности применения подобных составов для получения изделий в процессе твердофазного спекания.

Разработка технологии изготовления методом порошковой металлургии объёмного композиционного металлокерамического материала с регламентированной структурой и заданным комплексом физико-механических свойств для применения в конструкциях уплотнений паровых турбин является сложной наукоёмкой задачей.

С учётом высоких рабочих температур и наличия коррозионно-эрозионной среды в проточной части паровых турбин, за основу разрабатываемого материала был выбран порошок коррозионно-стойкой стали ПХ13М2, изготовленный по

ГОСТ 13084-84, а в качестве второго компонента (“твёрдой” смазки) с учётом своей инертности в широком температурном интервале – мелкодисперсный порошок нитрида бора BN по техническим условиям У26.8-00222226-007-2003. При этом предполагалось, что сочетание этих компонентов в процессе формообразования и спекания позволит перейти к принципиально новому механизму их влияния на основные физико-механические характеристики материала – регулированию площади соприкосновения металлических частиц друг с другом, что в конечном итоге позволит обеспечить лучшие показатели истираемости.

Модель врезания гребней лопаток в разрабатываемый металлокерамический композиционный материал представлена на рис. 1. Вследствие особенностей молекулярного строения, частицы нитрида бора не могут взаимодействовать с другими химическими элементами вплоть до температуры их деструктуризации (обладают химической инертностью) [19]. Равномерное их распределение в шихте обуславливает уменьшение площади соприкосновения частиц металлического порошка друг с другом, что, как следствие, снижает полностью протекания между ними процессов зернограничной диффузии и приводит к формированию менее прочной связи. При внедрении гребней лопаточного аппарата в тело разрабатываемого композиционного материала происходит проскальзывание отдельных частиц металлического порошка друг относительно друга, их отрыв и унос. При этом в результате локального истирания металлокерамического композиционного материала фракционность образовавшейся мелкодисперсной пыли соответствует по гранулометрическому составу исходным материалам шихты.

Наряду с разработкой концепции создания нового материала, конструкторами СКБ “Турбина” (ПАО “Силловые машины”, г. Санкт Петербург) были сформулированы технические требования к этому материалу, соответствие которым позволило бы начать его опытную эксплуатацию в конструкциях надбандажных уплотнений.

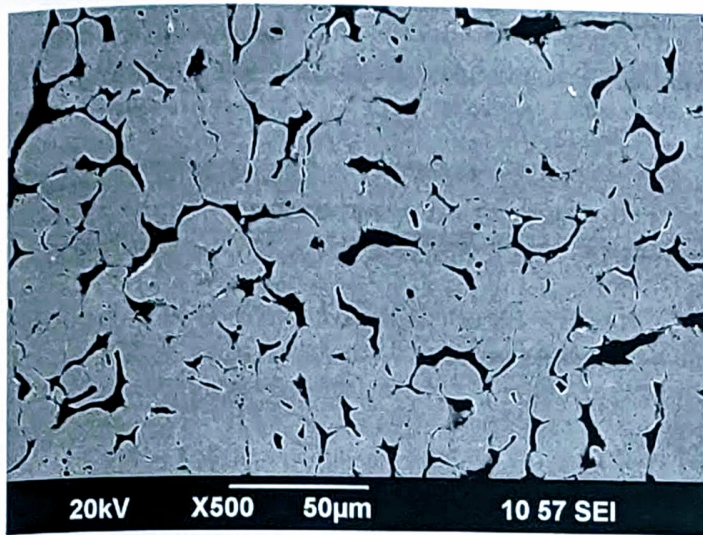
Оптимизацию компонентного состава, разрабатываемого композиционного материала, отработку технологии формообразования и спекания проводили опытным путём до достижения наилучшего сочетания физико-механических характеристик. В табл. 1 представлены сводные данные по основным физико-механическим свойствам разработанного материала, из которых видно его полное соответствие техническим требованиям.

На рис. 2 представлена микроструктура разработанного металлокерамического композиционного материала. Наблюдаемая в плоскости шлифа структура представляет собой совокупность порового пространства и сформировавшегося ансамбля металлических частиц. В структуре наблюдаются границы зёрен, дисперсные поры правильной фор-

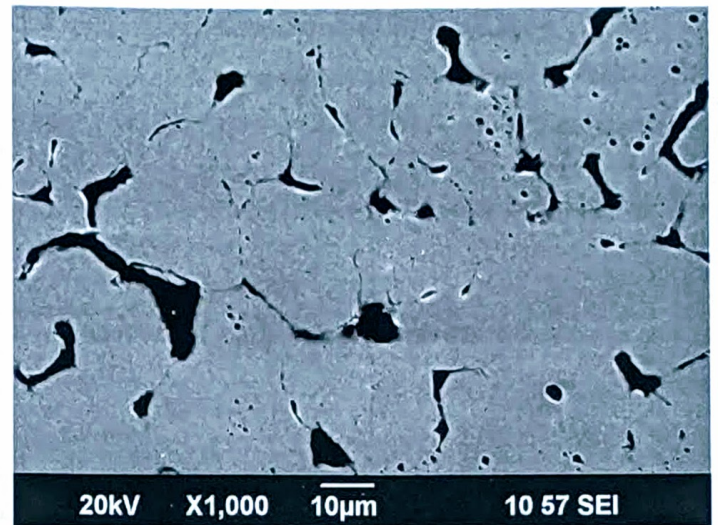
Таблица 1

Основные физико-механические свойства разработанного композиционного материала

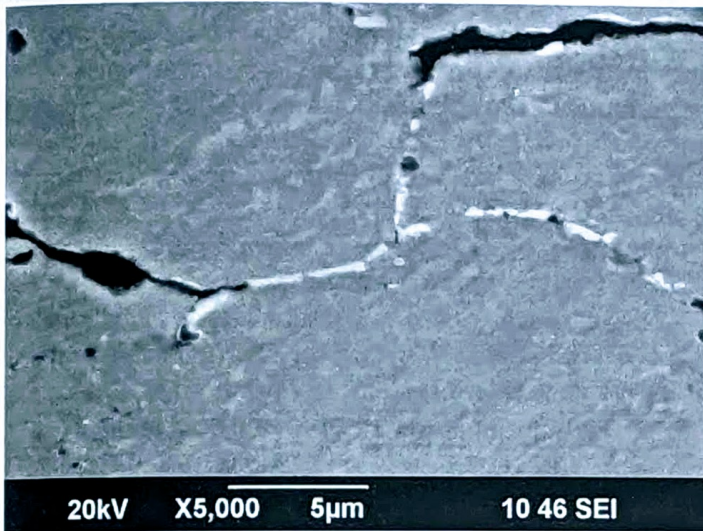
Показатель	Норма по техническим требованиям	Экспериментальные значения
Плотность, г/см ³	5,5 – 6,0	5,9
Твёрдость, НВ	65 – 120	65 – 85
Предел прочности (σ_B) при температуре 600°C, МПа (кгс/мм ²)	≥ 49 (5)	88 – 118 (9 – 12)
Ударная вязкость (КС), кДж/м ² (кгс·м/см ²)	≤ 98,066 (1)	33 – 65 (0,34 – 0,66)
Коэффициент термического линейного расширения при 600°C, 10 ⁻⁶ /K ⁻¹	≤ 14	12,2 – 13,1



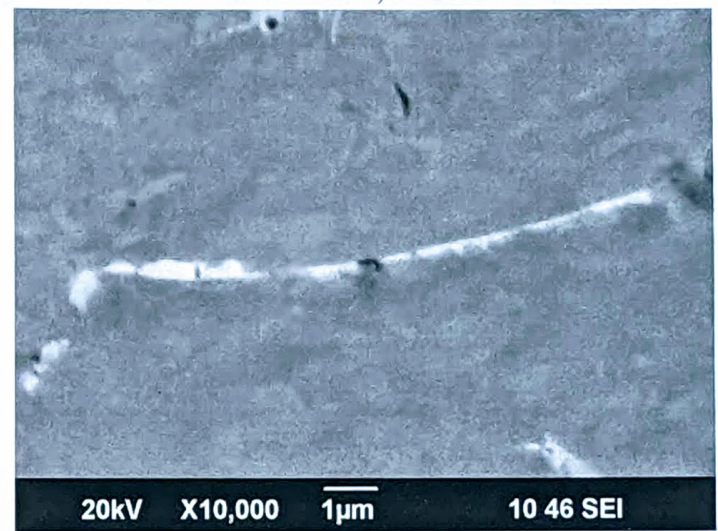
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Микроструктура разработанного металлокерамического композиционного материала

мы и множественные протяжённые зернограничные поры (рис. 2, а, б). Прослеживаемый по характерному декорированию границ размер зёрен (составляет 10 – 60 мкм) соответствует гранулометрическому составу использованного металлического порошка ПХ13М2. При этом детальные исследования границ зёрен методом растровой электронной микроскопии (рис. 2, в, г) выявили наличие тонких, толщиной 0,1 – 0,7 мкм, дисперсных прослоек нитрида бора BN, располагающихся по границам зёрен.

Исследования формы и размеров крупных несплошностей в совокупности с известными данными по химической инертности частиц нитрида бора [19] позволяют предположить, что наблюдаемые протяжённые зернограничные поры являются областями с повышенной концентрацией BN, которые в процессе подготовки образца к металлографическому анализу удалились вместе с абразивом.

Подтверждением этого предположения является тот факт, что вследствие различной насыпной плотности металлического порошка ПХ13М2 и нитрида бора BN, объём замешиваемых компонен-

тов сопоставим, а в наблюдаемой структуре отсутствует должное количество нитрида бора. По результатам проведённого металлографического исследования можно заключить, что разработанный композиционный металлокерамический материал по структуре полностью соответствует выдвинутой модели (рис. 1).

Порядок внедрения новых конструкций и материалов уплотнений проточной части паровых турбин, в частности разработанного металлокерами-

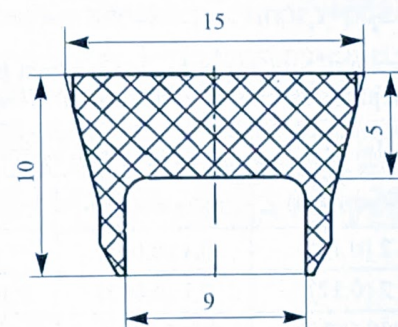


Рис. 3. Профиль уплотнительных вставок из разработанного металлокерамического композиционного материала (пробная партия)

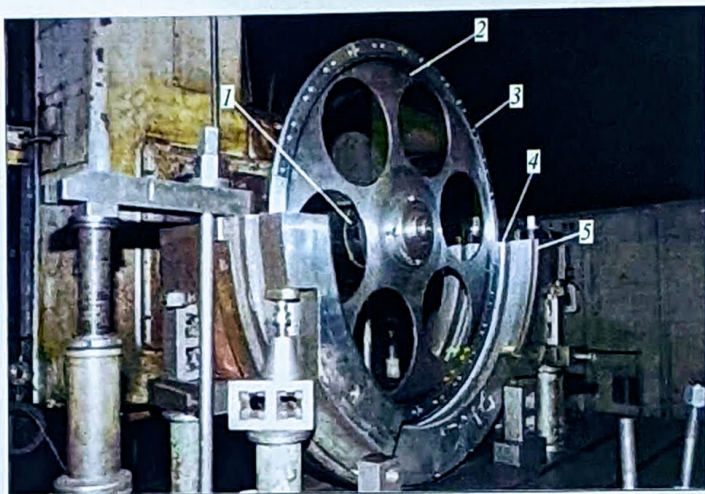


Рис. 4. Общий вид экспериментального стенда для исследования процесса врезания имитатора ротора в металлокерамический композиционный материал уплотнительных вставок:

1 – шпindelь станка; 2 – имитатор ротора; 3 – усик бандажа; 4 – металлокерамические вставки; 5 – обойма

ческого композиционного материала, требует проведения экспериментальных исследований надёжности и безопасности при задевании о ротор. С целью проверки работоспособности разработанного металлокерамического композиционного материала в составе опытной турбины была изготовлена пробная партия уплотнительных вставок (профиль вставок представлен на рис. 3).

Испытания проводились в два этапа. Первый этап исследований выполнен в механообрабатывающем цехе ПАО «Силовые машины» на специальном стенде, общий вид которого представлен на рис. 4. Конструкция стенда позволяет моделировать процесс врезания гребней рабочих лопаток (ротора) в материал уплотнений при окружных скоростях до 20 м/с и скоростях радиальных перемещений до 0,01 м/с. Врезание имитатора ротора проводилось в группу из шести зачеканенных металлокерамических композиционных вставок по различным режимам, приведённым в табл. 2.

По результатам испытаний установлено, что при соприкосновении имитатора гребней рабочих лопаток с металлокерамическим композиционным материалом его истирание происходит в виде мел-

Таблица 2

Режимы испытаний при врезании имитатора ротора в новый металлокерамический композиционный материал

Номер испытания	Частота вращения, об/мин (м/с)	Скорость подачи, мм/об. (мм/с)	
		радиационной	осевой
1	2 (0,12)	0,1 (0,003)	–
2	2 (0,12)	0,1 (0,003)	0,15 (0,0045)
3	300 (17,7)	0,002 (0,01)	–
4	300 (17,7)	0,002 (0,01)	0,003 (0,015)
5	300 (17,7)	–	0,002 (0,01)

кодисперсной пыли; максимальная зафиксированная пирометром температура уплотнения в зоне внедрения составляла 85°C; изменения цвета и видимых повреждений имитатора гребней лопаток не обнаружено. Полученные данные подтверждают правильность выбора компонентного состава материала и разработанной модели истирания композиционного материала при врезании.

Второй этап оценки работоспособности состоял в опытно-промышленной эксплуатации металлокерамических композиционных уплотнений в составе экспериментальной паровой турбины ЭТП-2 первой очереди Выборгской ТЭЦ-17 в условиях, приближенных к реальным по температуре, давлению и среде, с подводом греющего пара в зону опытной обоймы. Конструкция уплотнения турбины с использованием нового металлокерамического материала позволяла принудительно перемещать его в радиальном направлении для врезания гребней рабочих лопаток. Испытания проводились по различным режимам, приведённым в табл. 3.

При этих испытаниях были получены следующие положительные результаты:

обеспечиваются минимальные радиальные зазоры и сохраняются технические показатели турбины на протяжении всего времени работы;

врезание в композиционный материал уплотнений безопасное и сохраняет гребни лопаточного аппарата в случае радиальных и осевых смещений ротора турбины;

при контакте с материалом уплотнений не происходит значительного нагрева гребней лопаток и налипания материала уплотнения на гребни лопаток.

По завершении испытаний из цилиндра турбины ЭТП-2 обойма с металлокерамическими композиционными уплотнениями была извлечена для проведения визуального осмотра. Внешний вид металлокерамической вставки после испытаний показан на рис. 5. Имеются чёткие следы врезания гребней рабочих лопаток в металлокерамический композиционный материал уплотнений. Геометрия повреждения соответствует размерам ради-

Таблица 3

Режимы испытаний металлокерамических композиционных уплотнений в составе экспериментальной паровой турбины ЭТП-2

Номер испытания	Частота вращения ротора, об/мин	Глубина вреза, мм	Скорость вреза, мм/мин
1	3000	1 – 2,5	5 – 10
2	5000	1 – 2,5	5 – 10
3	7000	1 – 2,5	5 – 10
4	9000	1 – 2,5	5 – 10

Таблица 4

Референс-лист по установке металлокерамических композиционных уплотнений

Турбина	Электростанция	Отсек турбины	Год пуска турбины
К-110-140	ТЭС Вояны	ЦВД, ЦСД, ЦНД	2012
К-130-8-8,1	ТЭС Kazakhmys Energy	ЦВД, ЦНД	2012, 2014
К-200-130	Луганская ГРЭС	ЦСД, ЦНД	2012, 2014
К-225-12,8-3М	Беловская ГРЭС	ЦВД, ЦСД, ЦНД	2014
КТ-115-8,8	Томь-Усинская ГРЭС	ЦВД	2014
Т-120/140-12,8-2	Благовещенская ТЭЦ	ЦНД	2015
К-300-23,5-2Р	Рязанская ГРЭС	ЦСД, ЦНД	2015
ПТ-98-130/12-1М	Омская ТЭЦ-5	ЦНД	2015
К-120-8,2	ТЭС Раахе	ЦНД	2016
К-300-240	Ириклинская ГРЭС	ЦСД, ЦНД	2016
К-130-12,8	Верхнетагильская ГРЭС	ЦНД	2017
	Невинномысская ТЭС	ЦНД	2017
К-100	Максимо Гомес ТЭС	ЦВД, ЦНД	2017
К-80-7,4	Таманская ГРЭС	ЦВД, ЦНД	2017
ПТ-80	ТЭС Северсталь (модернизация)	ЦНД	2018
ПТ-80	Кишневская ТЭЦ (модернизация)	ЦНД	2018
Р-50	Казанская ТЭЦ 1	ЦВД	2018
Р-32-130/13	АО "Волга"	ЦВД	2019
ПК-80/130/16	Амурская ТЭС	ЦНД	2019
ПТ-80	Кишневская ТЭЦ	ЦНД	2019

ального и осевого перемещения гребней лопаток. В уплотнении отсутствуют сколы и трещины.

В период с 2012 по 2019 г. металлокерамические композиционные уплотнения производства ООО "НПП "Уралавиаспецтехнология" были установлены на 32 турбины; их референс-лист представлен в табл. 4. На протяжении всего времени эксплуатации турбин с такими надбандажными уплотнениями замечаний по надёжности и эффективности их работы не было.

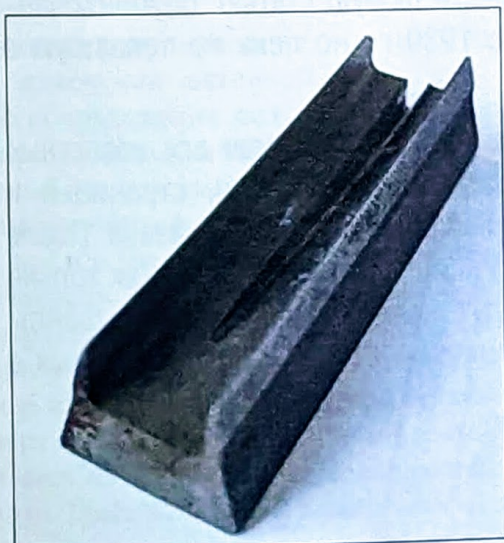


Рис. 5. Внешний вид металлокерамических композиционных уплотнений после испытаний на ЭТП-2

Выводы

1. Применение технологий порошковой металлургии при разработке материалов уплотнений проточной части паровых турбин позволяет достигать сочетания свойств прочности и истираемости.

2. Безопасное врезание гребней лопаточного аппарата в металлокерамический композиционный материал уплотнений ПХ13М (2-BN) обеспечивается за счёт образования тонкодисперсных прослоек нитрида бора между формируемыми в процессе спекания металлическими зёрнами.

3. При истирании металлокерамического композиционного материала образуется мелкодисперсная пыль, не оказывающая влияния на эксплуатационные характеристики турбины.

4. Применение металлокерамического композиционного материала в конструкциях надбандажных уплотнений позволяет повысить эффективность турбин за счёт уменьшения в них радиальных зазоров в течение всего межремонтного интервала.

Список литературы

1. Уплотнения лабиринтовые стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров [Текст]: РТМ 108.020.33 – 86. – Л.: ЦКТИ, 1986. – 73 с.

2. *Mel'nik, V. A.* Complementary products and devices. Classification of contactless slit seals [Text] / V. A. Mel'nik // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – Vol. 45. – No. 3 – 4. – P. 152 – 160.
3. *Qiu, B.* Investigation into the flow behavior of multi-stage rush seals [Text] / B. Qiu, J. Li, X. Yan // Journal of Power and Energy. – 2014. – Vol. 228. – Is. 4. – P. 416 – 428.
4. *Pugachev, A. O.* Calibration of porous medium models for brush seals [Text] / A. O. Pugachev, P. Helm // Journal of Power and Energy. – 2009. – Vol. 223. – Is. 1. – P. 83 – 91.
5. *Урьев, Е. В.* Об использовании сотовых уплотнений в паровых турбинах [Текст] / Е. В. Урьев, С. В. Жуков // Электрические станции. – 2008. – № 9. – С. 40 – 45.
6. *Лисянский, А. С.* Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на блоках сверхкритического давления мощностью 250 – 800 МВт [Текст] / А. С. Лисянский, В. Г. Грибин, Ю. А. Сахнин, О. В. Фатьков, К. В. Горлицын, С. В. Ушинин // Электрические станции. – 2013. – № 10. – С. 8 – 13.
7. *Сахаров, А. М.* Результаты промышленного внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 300 МВт [Текст] / А. М. Сахаров, В. К. Коновалов, С. В. Ушинин // Электрические станции. – 2010. – № 2. – С. 33 – 38.
8. *Zheng, X.* Manufacture and Testing of Variable Bristle Diameter Brush Seals [Text]: paper 2013 – 3859 / X. Zheng, G. Lu, M. D. Mack, D. Trivedi, N. Sarawate, C. Wolfe. – AIAA, 2013.
9. *Trivedi, D.* Experimental Characterization of Variable Bristle Diameter Brush Seal Leakage, Stiffness and Wear [Text]: GT 2013 – 95086 / D. Trivedi, B. Roy, M. Demiroglu, X. Zheng. – ASME Turbo Expo 2013 (San Antonio, Texas, USA), 2013.
10. *Patent 8051563 US.* Systems and methods and apparatus involving fabricating brush seals [Text] / W. E. Adis, B. A. Couture, M. G. Jones, M. D. Mack, D. F. Purdy, 2009.
11. *Bidkar, R.* Stiffness Measurement for PressureLoaded Brush Seals [Text]: GT 2011 – 45399 / R. Bidkar, X. Zheng, M. Demiroglu, N. Turnquist. – ASME Turbo Expo 2011 (Vancouver, Canada), 2011.
12. *Рублевский, Ю. В.* Опыт применения щеточных уплотнений для улучшения параметров авиационных ГТД и стационарных энергоустановок [Текст] / Ю. В. Рублевский, В. Н. Доценко // Энергетические и теплотехнические процессы и установки. – 2012. – № 8. – С. 45 – 49.
13. *Гропянов, А. В.* Порошковые материалы [Текст]: учеб. пособие / А. В. Гропянов, Н. Н. Ситов, М. Н. Жукова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 74 с.
14. *Sutor, P.* Solid lubricants: overview and recent developments [Text] / P. Sutor // MRS Bull. – 1991. – No. 16. – P. 24 – 30.
15. *Clauss, F. J.* Low-Friction Inorganic Solids [Text] / F. J. Clauss // Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids. – Elsevier, 1972. – P. 15 – 41.
16. *Lancaster, J.* Solid Lubricants [Text] / J. Lancaster // CRC Handb. Lubr. – CRC Press, 1988. – P. 269 – 290.
17. *McMurtrey, E. L.* Lubrication Handbook for the Space Industry. Part A, Solid Lubricants [Text] / E. L. McMurtrey. – NASA, 1985.
18. *Sliney, H. E.* Solid lubricant materials for high temperatures [Text] / H. E. Sliney // A review, Tribol. – 1982. – Int. 15. – P. 303 – 315.
19. *Kostoglou, N.* Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets [Text] / N. Kostoglou, K. Polychronopoulou, C. Rebholz // Vacuum. – 2015. – No. 112. – P. 42 – 45.

Уважаемые читатели!

На сайте журнала www.elst.energy-journals.ru в разделе «Подписки» вы можете приобрести статьи, уже хранящиеся в базе данных журнала (база будет пополняться), оплатив их через систему PayPal.

Кроме этого, здесь же вы можете заказать и приобрести любую статью, опубликованную в журнале «Электрические станции», начиная с 1930 г., но пока не попавшую в базу данных.

Для этого необходимо сообщить в редакцию el.st.podpiska@gmail.com все известные вам данные о статье (номер журнала, год, автора, название статьи, страницы) и дождаться ответа с подтверждением о возможности выполнения вашего заказа. После этого вы сможете оплатить статью через систему PayPal или запросить счёт. Как только редакция получит уведомление об оплате, вам будут направлены либо pdf-файлы статей, опубликованных в 2001 – 2013 гг., либо сканкопии статей, опубликованных в 1930 – 2000 гг.