

январь
февраль
2024

Турбины и Дизели

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№1 (112)



**ГА-32 «Ладога»
работают на Амурском ГПЗ**

16+



Генерация на базе отечественных газовых турбин. Новый энергетический стандарт – комплексная услуга энергоснабжения

Газоперекачивающие агрегаты ООО «ИНГК» с центробежными компрессорами

Термоустойчивые материалы в опорах стационарных газотурбинных установок. Модернизация опор ГТУ Т32

Н. Ю. Овчаренко¹ – зам. генерального директора, td@npk-promtech.ru

М. Ю. Егорушков² – руководитель проектов, m.egorushkov@gehia.ru

П. Г. Романенков³ – зам. генерального директора по производству, info@ufa-tr.gazprom.ru

А. Е. Константинов³ – начальник ПОЭКС, akonstantinov@ufa-tr.gazprom.ru

¹АО «НПК» «Промышленные технологии»

²ООО «Газпром энергохолдинг индустриальные активы»

³ООО «Газпром трансгаз Уфа»

Ключевые слова:

высокомолекулярные полимеры, баббиты, опоры ГТУ, энергоэффективность, потери энергии в подшипниках, расход масла ГТУ, повышение КПД ГТУ Т32

Аннотация

Рассмотрены недостатки классических баббитовых антифрикционных материалов в опорных конструкциях ГТУ и преимущества применения высокомолекулярных полимеров взамен баббитовых. Отмечены ограничения в эволюции баббитов для получения более высоких технических и эксплуатационных характеристик, необходимых для расширения эксплуатационных диапазонов и повышения энергоэффективности ГТУ.

Показаны положительные результаты ресурсных испытаний опорно-упорных конструкций опор ГТК-10, разработки Невского

завода им. В. И. Ленина (сейчас АО «НЗЛ»), с применением полимерного антифрикционного сплава К30ПТ разработки и производства АО «НПК «Промышленные технологии».

Рассмотрены возможности масштабирования технических решений по применению полимерных антифрикционных сплавов в опорно-упорных конструкциях газотурбинной установки ГТУ Т32 производства АО «НЗЛ» с целью повышения энергоэффективности, расширения эксплуатационного диапазона и снижения себестоимости ГТУ в целом.

Heat-resistant materials in the supports of stationary gas turbine plants. Modernization of T32 gas turbine plant supports

N. Yu. Ovcharenko¹ – Deputy General Director, td@npk-promtech.ru

M. Yu. Egorushkov² – Project Manager, m.egorushkov@gehia.ru

P. G. Romanenkov³ – Deputy General Director for Production, info@ufa-tr.gazprom.ru

A. E. Konstantinov³ – Head of Operation, akonstantinov@ufa-tr.gazprom.ru

¹NPK Industrial technologies, JSC

²Gazprom energoholding industrial assets, LLC

³Gazprom transgas Ufa LLC

Key words:

high-molecular polymer, babbitts, gas turbine supports, energy efficiency, power losses in bearings, oil consumption in gas turbine, efficiency upgrading of T32 gas turbine plant

Abstract

The disadvantages of classical babbitt of antifriction materials in GTP support structures and the advantages of using high-molecular polymers instead of babbite ones are considered. Limitations in the evolution of babbitts are noted in order to obtain higher technical and operational characteristics necessary to expand the operational ranges and increase the energy efficiency of GTP.

The positive results of endurance tests of the thrust bearing structures of the GTK-10 supports, developed by the Nevsky Plant named after V.I. Lenin (now NZL JSC) using a polymer

antifriction alloy K30PT developed and manufactured by NPK Industrial Technologies JSC are shown. The issues of the possibility of scaling technical solutions for the use of polymer antifriction alloys in the thrust structures of the T32 gas turbine plant of NZL JSC in order to increase energy efficiency, expand the operational range and reduce the cost of GTP as a whole are considered. The effectiveness of the use of antifriction materials based on high molecular polymers in GTK-10 gas pumping unit bearings has been confirmed.

В 1950-х годах на Невском заводе им. В.И. Ленина (сегодня АО «НЗЛ») была создана газотурбинная установка ГТК-10 (рис. 1), на которой проводились различные усовершенствования по повышению параметров рабочего цикла и технико-экономических показателей с учетом требований газотранспортных компаний РФ по энергоэффективности и производительности работы. Энергоэффективность ГТК-10 зависит не только от оптимизации газодинамических процессов и связанных с ними решений (конструкция лопаточных аппаратов компрессора, турбины, управление процессами в камере сгорания и др.), но и от стабильности и устойчивости к процессам разрушения внутри опорных силовых компонентов роторов и статора ГТУ, воспринимающих динамическую нагрузку подшипников скольжения и других узлов трения.

Как правило, основными современными ключевыми показателями энергоэффективности (КПЭ) подшипников скольжения являются:

- высокая термостабильность, выражающаяся в устойчивости к повышенным температурам;
- пониженное трение и, соответственно, уменьшение тепловыделения и снижение потерь энергии вследствие трения;
- повышенная износостойчивость и связанная с ней стабильность геометрии конструкции;
- поддержание устойчивости смазки и связанная с этим повышенная несущая способность подшипника.

В ГТУ стационарного типа опоры выполняются в виде подшипников скольжения, где основным смазывающим элементом является турбинное масло, а сами опорные ложементы изготавливаются из классических баббитов Б16 ГОСТ 1320–74 или Б83 ГОСТ 1320–74 способом центробежной заливки в стальные корпуса.

Однако уже становится очевидным, что баббитовые материалы не способны удовлетворить современные требования по энергоэффективности подшипников. Причины этого хорошо известны техническим специалистам:

- низкая термоустойчивость и сопротивляемость усталости;
- необходимость поддерживать температурный режим в узком диапазоне 50...80 °С, что требует наличия маслосистемы большой производительности, принудительного охлаждения и, соответственно, дополнительных затрат энергии и эксплуатационных расходов;
- недостаточная твердость баббитовых материалов, низкая сопротивляемость к наличию посторонних включений на рабочей



Рис. 1.
Газотурбинная установка ГТК-10

поверхности приводит к повышенному износу поверхности цапфы и шеек вала, а в случае перегрева – к аварийному повреждению и дорогостоящему ремонту;

- низкая коррозионная устойчивость ограничивает применение современных смазочных материалов.

Усилия технических специалистов направлены на совершенствование баббитовых сплавов, и здесь достигнуты определенные успехи: применяются тонкие слои баббита, увеличивающие сопротивление усталости; новые составы, несколько увеличивающие (макс. до 130 °С) температурные режимы работы подшипников. Совершенствуются методы нанесения баббитов, в т.ч. на промежуточные слои, используются методы напыления частиц сплавов.

Однако невозможно пока преодолеть главные ограничители в развитии баббитов:

- баббит остается гетерогенным сплавом, причем нужные свойства придают ему не олово или свинец, являющиеся лишь связующими элементами, а легирующие примеси меди, сурьмы, никеля, мышьяка, кадмия, цинка (рис. 2) и др. (Поскольку за прошедший период уже найдены лучшие составы, то прорыва в совершенствовании сплавов не ожидается.)
- механические свойства баббитов полностью зависят от правильности кристаллической решетки связующих элементов и расположения легирующих примесей

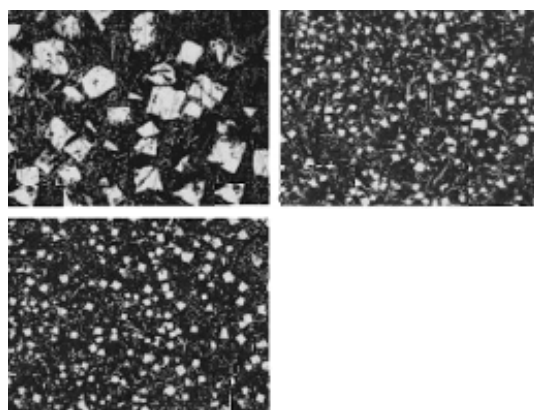


Рис. 2.
Структура баббита под микроскопом:
кристаллы сурьмы в матрице из олова или свинца

Материал	Нагрузка	Температура	Усталость	Трение	Коррозия	Вибрация	Простота технологии	Электроизоляция	Стоимость
Баббитовые сплавы, алюминий-оловянные сплавы	+	-	-	+/-	-	+/-	+	-	+
Бронза, латунь	+	+	+	-	-	-	+	-	+
Графиты, в т.ч. композиты	-	+	+	-	+	-	+	-	+
Монополимеры, простые композиции (фторопласт, полиамиды, полиимиды, графито-фторопласты), в т.ч. многослойные	-	-	+	+	+	+	+/-	+	-
Карбиды, металлокерамические, алмазные поверхности	+	+	+	+/-	+	-	-	+	-

Табл. 1.

Качественное сравнение свойств антифрикционных материалов по отношению к основным параметрам работы изделий:

- + преимущество материала;
- +/- нейтральная характеристика;
- недостаток материала

в ней – разрушение, нарушение идеальности кристаллической решетки как в процессе изготовления, так и при эксплуатации ведет к широкому ряду повреждений подшипников;

- связующие элементы, являясь легкоплавкими металлами, становятся сильно текучими выше точки плавления, температуру которой не изменить. Это приводит к значительным повреждениям подшипников и шеек валов в аварийных ситуациях, расплавлению подшипникового слоя, к

	Баббит	К30ПТ
Коррозия и воздействие агрессивных сред	Подвержен	Нет
Усталость	Сильно подвержен	Нет
Термическое фасетирование поверхности	Наблюдается	Нет
Межзерновое растрескивание	Наблюдается	Нет
Кавитационные повреждения	Наблюдается	Нет
Повреждения от индукционных токов	Наблюдается	Нет
Потеря смазки	Критична	Некритична
Задиры шейки ротора	Наблюдаются	Нет
Следствия перегрева, °С	Коксование, фасетирование, коррозия, выплавка	Нет. Выдерживает кратковременные перегревы до 300
Температура изгиба под нагрузкой 1,8 МПа, °С	240	343
Рабочая температура, max, °С	70	250
Удельное рабочее давление, МПа	10...15	20...30
Предел текучести при сжатии, МПа	78...79	370
Предел прочности при сжатии, МПа	102...105	230
Предел прочности при изгибе, МПа		290
Твердость по Шору		85
Плотность, кг/см ³	7,35	1,44
Коэффициенты теплопроводности, вдоль потока/средний, Вт/(м·К)	33,6	2,2/1,3
Удельное электросопротивление, Ом·м	10 ⁻⁷	10 ⁸
Коэффициенты линейного расширения вдоль потока/средний (α, 1/°С), 10 ⁻⁶	16-31	9/35
Износ при сухом трении по стали, мм ³ /км	1 084...1 355	30...50
Коэффициенты трения покоя	0,24...0,38	0,09
Коэффициенты трения скольжения без смазки	0,28	0,04

Табл. 2. Сравнительные характеристики материалов баббит (Б-83) и К30ПТ

существенным ограничениям температурных режимов работы;

- техническая сложность и высокие затраты ресурсов при разработке новых баббитовых сплавов. Так, в РФ продолжают использоваться в основном марки баббитов пятидесятилетней давности (ГОСТ 1320–74 «Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия»). Современные баббитовые сплавы и методы их заливки не находят широкого применения.

Возможной альтернативой могли бы стать другие многочисленные антифрикционные материалы с отдельными улучшенными свойствами: графиты, сплавы алюминия, пластмассы (тефлон, фторопласт), карбид вольфрама, металлокерамика, алмазные поверхности. Однако все они, кроме самых узкоспециализированных, также применяются на основе технологий 50...100-летней давности и не дают существенных преимуществ по энергоэффективности (табл. 1).

Поэтому конструкторы АО «НЗЛ» обратились к мировому опыту применения новых антифрикционных материалов [1] на основе специализированных композиционных высокомолекулярных полимеров, обеспечивающих высокие трибологические характеристики подшипников благодаря низкому коэффициенту трения и износу полимера. Использование полимеров позволяет получать более простые и надежные конструкции пар трения, гибко менять режимы трения, применять необслуживаемые подшипники, работающие без смазки при высоких нагрузках [2].

В кооперации с АО «НПК «Промышленные технологии» (г. Тула) были проведены стендовые и натурные испытания модернизированных подшипников (ПСКМ) с применением антифрикционного материала К30ПТ на следующем оборудовании:

- ГПА ГТК-10М, эксплуатирующихся в ООО «Газпром трансгаз Уфа»;
- ЦБК 220-8,42/183-5300/18С, эксплуатирующихся на ГТЭС ООО «ЯрГео»;
- ГПА «Ладога-32» – ООО «Газпром трансгаз Краснодар».

Сравнительные характеристики материала К30ПТ приведены в табл. 2.

Основные результаты проведенных работ

Подтверждена эффективность применения антифрикционных материалов на базе высокомолекулярных полимеров в подшипниках ГПА ГТК-10М, находящегося в эксплуатации в ООО «Газпром трансгаз Уфа».

Замена баббитовых вкладышей опор вкладышами с антифрикционным сплавом К30ПТ

выполнялась при очередном ремонте. Основной целью испытаний было подтверждение технико-экономических показателей применения сплава К30ПТ [3, 4] компании «Промышленные технологии» на базе высокомолекулярных полимеров. Исследовалась также возможность расширения эксплуатационного диапазона в части сокращения количества потребляемого масла, возможность работы опор ГТУ при более высоких, чем для баббита, температурах и увеличение ресурсных показателей опор.

Длительные испытания в ходе опытной эксплуатации комплекта опорных/упорных вкладышей подшипников ГПА типа ГТК-10М с ЦБК-370-18-1 с вкладышами антифрикционного сплава К30ПТ разработки и производства НПК «Промышленные технологии» проводились в два этапа согласно утвержденной программе и методике.

На первом этапе опытной эксплуатации после наработки 3000 часов проведено ступенчатое снижение давления масла в линии подачи смазки за регулятором давления «после себя» с 6,2 до 3,2 кгс/см². Испытания проводились на режиме работы ГПА «Магистраль», частота вращения роторов $N_{ТВД} = 4640...4660$ об/мин, $N_{ТНД} = 3850$ об/мин, температура газов ТПС = 494...500 °С. В результате было выявлено, что снижение подачи масла на подшипники турбины на 51 % от номинального значения при постоянной частоте вращения ротора ОК-ТВД в ГТД не влияет на устойчивость работы подшипниковых опор.

На втором этапе опытной эксплуатации после наработки 3000 часов проведено последовательное повышение температуры масла в маслосистеме с 44,2 до 72,0 °С. Испытания проводились на режиме работы ГПА «Магистраль», частота вращения роторов $N_{ТВД} = 4590...4670$ об/мин, $N_{ТНД} = 3850$ об/мин, температура газов ТПС = 490...500 °С, температура наружного воздуха до +20...29 °С. В результате выявлено, что повышение температуры масла не приводит к повышению уровня вибрации подшипниковых узлов ГПА.

После наработки 6284 часов выполнен разбор агрегата, произведены замеры геометрических зазоров подшипниковых узлов и шеек роторов ОК-ТВД, ТНД, ЦБК.

По результатам испытаний установлено следующее:

1. На всех режимах работы ГПА уровень вибрации подшипниковых узлов не превышает установленных инструкцией по эксплуатации.

2. При уменьшении подачи масла на подшипники турбины до 51 % от номинального

при постоянной частоте вращения ротора ОК-ТВД уровень вибрации остается постоянным.

3. При увеличении температуры масла в маслосистеме ГПА с 44,2 до 72,0 °С уровень вибрации остается постоянным.

4. После проведенных длительных испытаний в течение 6284 часов отсутствуют существенные дефекты на поверхностях антифрикционного полимерного материала К30ПТ комплекта опорных/упорных вкладышей.

5. Как показали геометрические замеры подшипниковых узлов после наработки 6284 часов, отсутствует износ шеек роторов и антифрикционного полимерного материала К30ПТ.

Результаты испытаний подтверждают, что применение в конструкции ГТУ подшипников скольжения с вкладышами из высокомолекулярных полимеров позволяет не только расширить на 40 % температурный диапазон в опорах турбины, но и снизить на 50 % количество потребляемого для смазки опор масла; получить стабильность геометрии опорных поверхностей под роторы ГТУ и ЦБК, а также снизить величину потерь энергии в подшипниках. Аналогичные результаты были получены при испытаниях подшипников НЦ-16/76-1,44 ГПА-Ц-16 в ООО «Газпром трансгаз Москва» [5], где удалость снизить подачу масла на 90 %.

Таким образом, в данных испытаниях подтверждены три из четырех более высоких коэффициентов показателей эффективности (см. выше) для ПСКМ. Остальные показатели также были подтверждены в других испытаниях, о чем будет изложено в последующих публикациях.

Полученные результаты планируется использовать при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и снижению себестоимости следующего поколения ГТУ Т32 производства АО «НЗЛ» (рис. 3).

Рис. 3. Газотурбинная установка ГТУ Т32

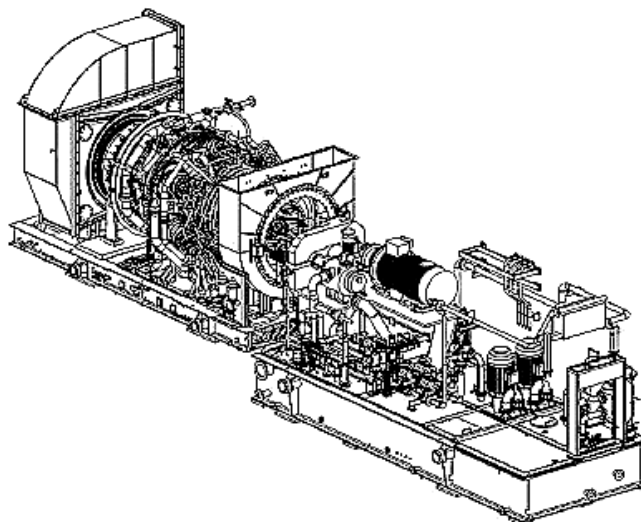
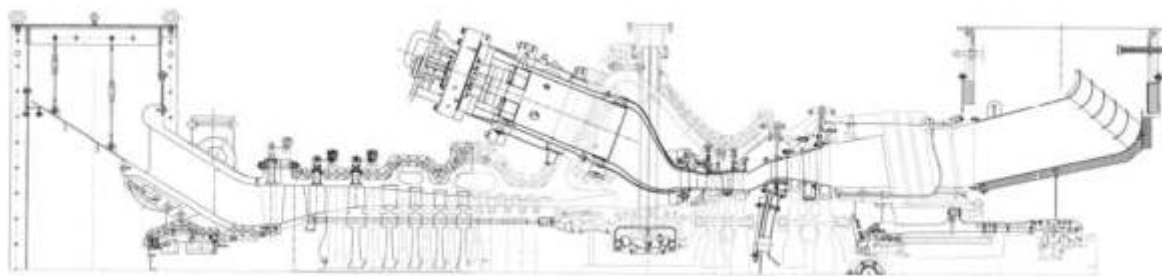


Рис. 4.
Силовая установка ГТУ Т32



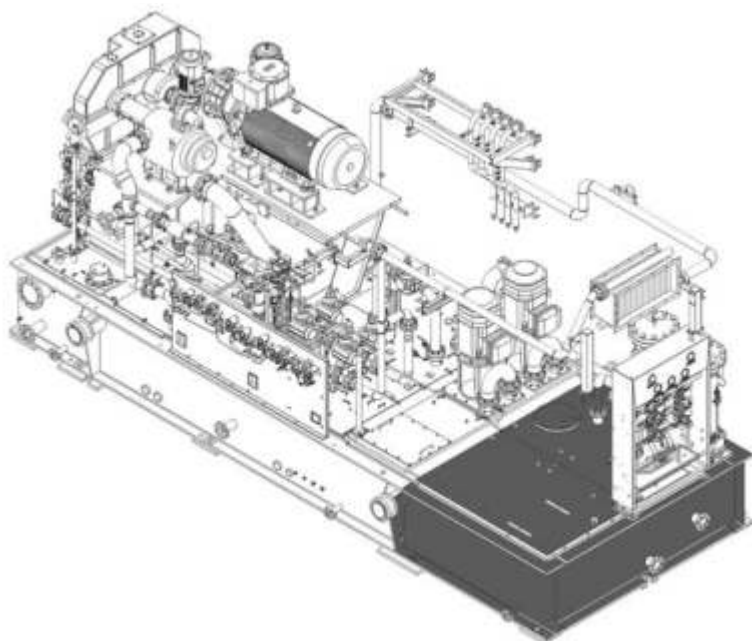
Замена баббита в узлах трения (рис. 4) позволит:

- сократить количество потребляемого масла;
- сократить объем маслосистемы и отказаться от аварийного маслобака;
- снизить нагрузку и уменьшить потребляемую мощность принудительной системы охлаждения масла.

Ключевые показатели эффективности энергоустановки повысятся за счет снижения себестоимости производства и обслуживания ГТУ Т32, сокращения объема маслобака рамы вспомогательных устройств (РВУ) и сокращения площади застройки вследствие уменьшения габаритов агрегата (рис. 5).

Применение ПСКМ в газотурбинных установках ГТУ Т32 может положительно влиять не только на снижение себестоимости ГТУ в целом, но также на ее энергоэффективность за счет увеличения и других ключевых показателей. Это снижение потерь энергии в подшипниках, сохранение геометрии формы опор и повышение КПД, увеличение производительности, межремонтного периода и др. Подробные результаты эксплуатации, аналитика, исследования и технические решения будут опубликованы в последующих выпусках журнала.

Рис. 5.
Сокращение объема
маслобака РВУ



Выводы

1. Рассмотрены недостатки баббитовых сплавов и преимущества применения полимерных сплавов взамен баббитовых в опорно-упорных конструкциях ГТУ.

2. Представлены результаты ресурсных испытаний опорно-упорных подшипниковых узлов с полимерными сплавами в составе ГТК-10.

3. По результатам ресурсных испытаний определены показатели энергоэффективности применения полимерных сплавов взамен баббитовых.

4. Показаны направления масштабирования результатов испытаний опорно-упорных подшипниковых узлов с полимерными сплавами в составе ГТК-10 для газотурбинной установки Т32. ▢

Список литературы

1. К. Friedrich / *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – № 1. – pp. 3-39.
2. Овчаренко Н.Ю., Егорушков М.Ю. *Технический прогресс в разработке новых подшипниковых материалов узлов трения // Турбины и дизели*. – 2023 г. – № 4.
3. Патент 2691356, Российская федерация, МПК C23C28/00. Способ нанесения антифрикционного слоя на металлическую деталь. – № 2018129167. Заявл. 09.08.2018; опубл.: 11.06.2019 Бюл. 17. / Ю.Г. Кузьмин. // Приобретатель исключительного права АО «НПК «Промышленные технологии».
4. Патент 2671779, Российская федерация, МПК C23C28/00. Способ нанесения антифрикционного слоя (варианты). – № 201803777. Заявл. 31.01.2018; опубл.: 06.11.2018. Бюл. 31. / Ю.Г. Кузьмин // Приобретатель исключительного права АО «НПК «Промышленные технологии».
5. Смирнов Е.А. Применение антифрикционных материалов в подшипниках скольжения центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов / Е.А. Смирнов, Ю.Ю. Толстихин, А.В. Шишов [и др.] // *Газовая промышленность*. – 2023 г. – № 4.