

УДК 621.438

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

А.П. Воловик, М.Е. Коварский, В.А. Зайцев
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассматривается применение подшипников качения с керамическими шарами в высокоскоростном генераторе для газотурбинных установок. Приведено сравнение керамики и подшипниковой стали. Предлагается методика контроля работоспособности высокоскоростного генератора.

Ключевые слова: высокоскоростной генератор, подшипники качения.

Постоянное развитие и совершенствование машиностроения требует значительного повышения мощностей и производительности машин без существенного увеличения их габаритов и массы. В связи с этим возникает необходимость повышения частоты вращения роторов, что сопряжено с проблемами использования стандартных опорных узлов, обусловленными непрерывным ростом линейных и вибрационных нагрузок, а также большими перепадами температур. При этом к агрегатам, как правило, предъявляются требования высокой надёжности. Отсюда появляется необходимость разработки и использования надёжных высокоскоростных опорных узлов.

Известны иностранные производители высокоскоростных генераторов (ВГ) для автономных электростанций с газотурбинными установками [1, 2]. Фирма «Capstone» [1] создала серию установок на мощности до 200 кВт с частотой вращения до 1000 Гц. Фирма «Elliot» [2] выпускает турбогенераторы на 100 кВт с частотой вращения 500 Гц. В качестве опорных узлов фирма «Capstone» применяет газодинамические подшипники, известные как Foil air bearings, фирма «Elliot» – подшипники качения на свободном конце вала и скольжения на промежуточной опоре с масляным смазыванием.

В ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» разработан ВГ мощностью 200 кВт с частотой вращения 1000 Гц. На этапе проектирования рассматривались различные варианты опорных узлов. В результате расчётов было принято решение о создании двух образцов ВГ. Первый образец на подшипниках качения с керамическими шарами для подтверждения результатов электромагнитных и механических расчётов [3]. И второй образец ВГ на газодинамических лепестковых подшипниках, как конечный вариант опорных узлов для исключения использования смазочных материалов, в связи с требованиями заказчика.

Целью работы являлось создание первого образца, представляющего собой ВГ мощностью 100 кВт, 60 000 об/мин [3] (рис. 1).

В качестве опор качения были применены гибридные прецизионные шпиндельные подшипники качения (ПК) с керамическими шарами фирмы ADR (Франция). Подшипники ADR [4] – 4-го класса точности, с массивным сепаратором, предельная частота вращения – 60 000 об/мин.

Гибридные подшипники фирмы ADR – W61905HTG4K5217 – угол контакта 15° , кольца гибридных подшипников изготавливаются из подшипниковой стали, а тела качения из нитрида кремния (Si_3N_4). Плотность нитрида кремния составляет 40% от плотности стали, поэтому тела качения обладают меньшей массой и инерционными нагрузками. Это значительно снижает потери на трение в элементах ПК при больших частотах вращения. Нитрид кремния обладает более высокой



Рис. 1. Первый образец генератора 100 кВт, 60 000 об/мин

Таблица 1

Характеристика	Подшипниковая сталь	Нитрид кремния Si ₃ N ₄
<i>Структурные свойства:</i>		
Плотность, г/см ³	7,8	3,2
Открытая пористость, %	0	0
Размер зерна, мкм	–	1 – 5
<i>Механические свойства:</i>		
Твёрдость	61 HRC	17 000 МПа
Прочность на сжатие, МПа	1 700	3 000
Прочность на изгиб, МПа	2 300	750
Модуль упругости, ГПа	210	320
Коэффициент Пуассона	0,30	0,26
<i>Тепловые свойства:</i>		
Максимальная рабочая температура, °С	120 – 180	1 400
Теплоёмкость при 20°С	480 Дж/кг °С	800 Дж/кг К
Теплопроводность при 100°С	45 Вт/мл °С	40 Вт/мК
Коэффициент теплового расширения в диапазоне 20 – 1000 °С, 10 ⁻⁶ /К	12	3,2
<i>Электрические свойства:</i>		
Удельное сопротивление Ω при 20°С, Ом·см	10 ⁻⁶	10 ¹⁴

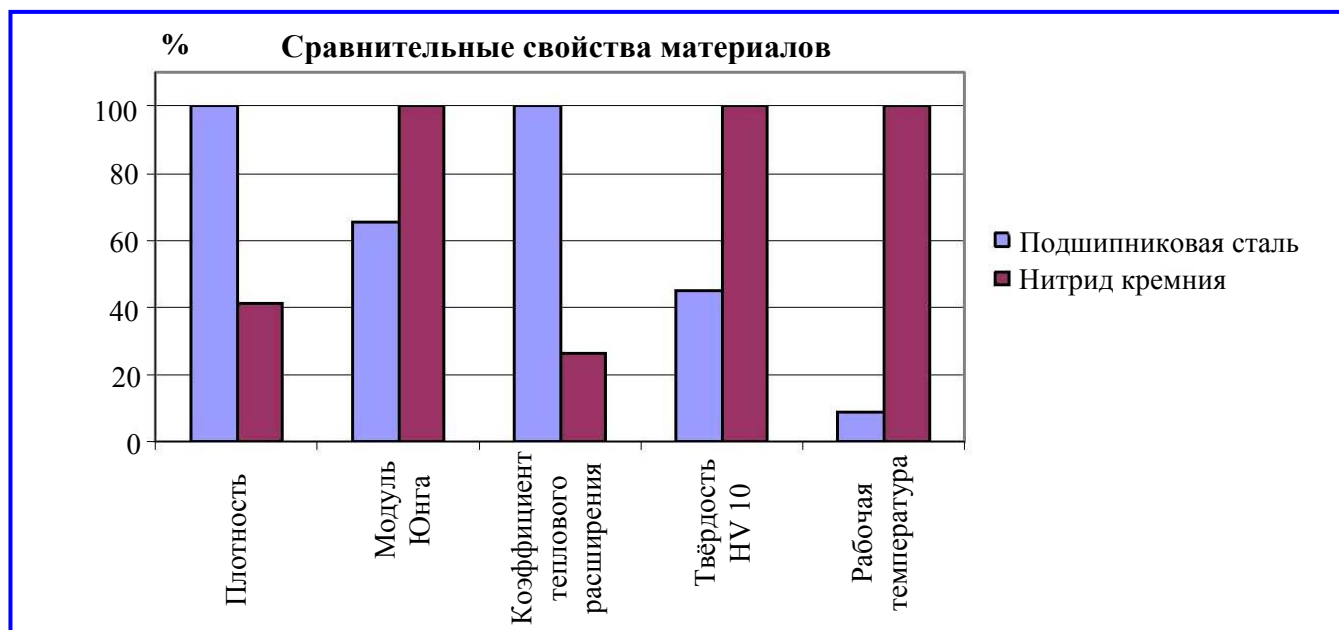


Рис. 2. Сравнительные свойства подшипниковой стали и нитрида кремния

твёрдостью и модулем упругости, чем сталь. Это повышает жёсткость подшипника и увеличивает его ресурс при работе в условиях с повышенной нагрузкой.

Тела качения из нитрида кремния имеют меньшее значение теплового расширения, чем стальные тела качения такого же размера, что означает меньшую чувствительность к изменению температуры внутри подшипника и поддержанию более точной величины преднатяга.

В табл. 1 [5] приведены свойства материалов в

соответствии с требованиями промышленного стандарта DIN 40685. Представленные значения следует использовать только как ориентировочные, поскольку они относятся только к измерениям на контрольном образце.

На диаграмме (рис. 2) представлено сравнение характеристик подшипниковой стали и нитрида кремния в процентном соотношении.

Таким образом, выбранные гибридные подшипники с керамическими шарами являются более перспективным

Таблица 2

Частота вращения, Гц	Уровень виброскорости ВГ, первая гармоника частоты вращения, мм/с	Общий уровень виброскорости ВГ, мм/с
83	0,0074	0,316
163	0,0017	0,389
249	0,0115	0,361
327	0,0269	0,31
411	0,194	0,44
501	0,0145	0,359
879	0,0912	0,73
998	0,408	6,89

Таблица 3

Частота вращения, Гц	Уровень виброскорости ВГ, первая гармоника частоты вращения, мм/с	Общий уровень виброскорости ВГ, мм/с
166	0,012	0,295
334	0,032	0,246
503	0,096	0,895
661	0,889	1,696
733	0,986	2,330

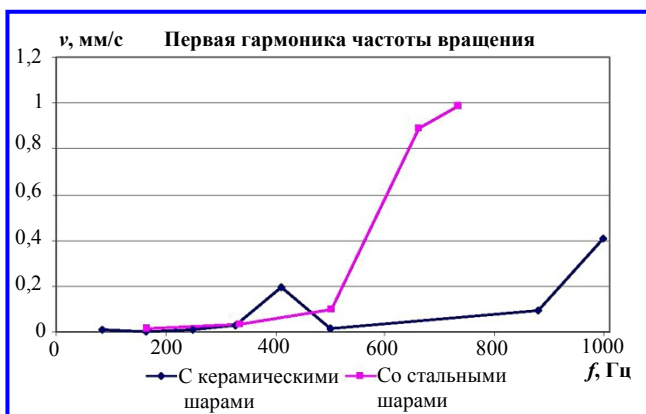


Рис. 3. Сравнение уровней вибрации ВГ на ПК с керамическими и со стальными шарами

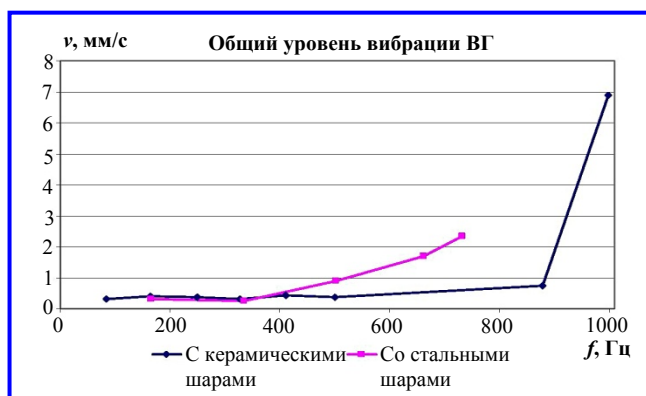


Рис. 4. Сравнение общего уровня вибрации ВГ на ПК с керамическими и со стальными шарами

типом опорных узлов по сравнению со стандартными шпиндельными подшипниками качения для заданных условий.

В качестве смазочного материала использовалась высокоскоростная пластичная смазка Arcanol Speed 2.6, скоростной фактор которой составляет 2 000 000 мм/мин.

Для контроля состояния опорной части и работоспособности ВГ разработана методика, по которой отслеживаются температура опорных узлов, общий уровень вибрации в диапазоне до 10 кГц, первая гармоника частоты вращения, а также насыщенность спектра. Принятые допустимые уровни контролируемых параметров:

- температура опорных узлов до 100°С;
 - общий уровень до 7,1 мм/с (зона В по ГОСТ ИСО 10816-1-97 для машин класса 4);
 - первая гармоника частоты вращения не более 0,5 мм/с.
- Датчики чувствительностью 100 мВ устанавливались на подшипниковых щитах в трёх направлениях.

В результате испытаний ВГ на подшипниках с керамическими шарами на холостом ходу были получены данные, приведённые в табл. 2. Даны максимальные значения по трём направлениям.

При испытаниях ВГ со стандартными шпиндельными подшипниками качения фирмы FAG были получены данные, приведённые в табл. 3.

При достижении 44000 об/мин вибрация ВГ со стандартными шпиндельными ПК (со стальными шарами), резко возросла, появились субгармоники, спектр стал очень насыщенным. Поскольку подшипники данного типоразмера рассчитаны на обороты не более 42 000 об/мин, испытания ВГ с ПК было решено прекратить. При демонтаже было обнаружено начало разрушения сепаратора.

Сравнение вибрации ВГ на ПК с керамическими шарами и ПК со стальными шарами приведены на рис. 3 и 4.

Таким образом, в ходе испытаний ВГ допустимые уровни не были превышены.

Работы по исследованию вибрации ВГ на подшипниках с керамическими шарами продолжаются в составе экспериментальной модели турбокомпрессорной установки.

Выводы

1. Разработан, изготовлен и испытан образец электрогенератора на ПК с керамическими шарами мощностью 100 кВт на 60 000 об/мин.

2. В ходе испытаний подтверждены результаты расчётов. В том числе подтверждена работоспособность опорных узлов на частотах вращения до 60 000 об/мин.

3. Отлажена методика контроля работоспособности

высокоскоростного генератора на ПК.

Литература

1. Micro-turbine generators / edited by M. J. Moore // Professional Engineering. – Printed in the USA, 2002.
2. Elliott energy systems, Inc. TA 100 R CHP. 100 кВт микротурбинная установка для комбинированного производства тепла и электроэнергии : техническое описание. – Киев : НПП «Мадек», 2008.
3. Методы расчёта высокоскоростных генераторов для газотурбинных установок / Д. В. Голованов, М. Е. Коварский, В. В. Магин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 126. – № 1. – С. 3 – 8.
4. Шариковые подшипники высокой точности, каталог ADR, 2011.
5. Подшипники качения и скольжения. Керамика Frialit-Degussit, 2013.

Поступила в редакцию 07.03.2014

*Анна Петровна Воловик, мл. научн. сотрудник, т. (495) 366-33-56.
Михаил Ефимович Коварский, канд. техн. наук, зам. начальника отдела, т. (495) 366-15-61.
Валерий Алексеевич Зайцев, мл. научный сотрудник, т. (495) 366-33-56.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*