

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ТИП ОПОР ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДВС

А.В. Смирнов, к.т.н., доцент

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Одним из перспективных направлений повышения эффективности двигателей является совершенствование системы наддува и конструкции турбокомпрессора. Применяемые в турбокомпрессорах традиционные опоры качения и скольжения имеют ряд недостатков, связанных в том числе с надежностью режимов смазки. Для повышения надежности и эффективности турбокомпрессоров предлагается использование в их конструкции бесконтактных опор — комбинированных газоманнитных подшипников.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) как дизельные, так и бензиновые продолжают доминировать в качестве автономных источников энергии для привода различных видов транспорта. Кроме автомобильного транспорта, ДВС используются на железнодорожном, морском, речном транспорте, в малой авиации, стационарных генераторных, насосных, газоперекачивающих станциях и остаются основным видом привода [1–3].

В связи с этим продолжается совершенствование систем и агрегатов ДВС, в том числе систем турбонаддува, для повышения экономичности и улучшения экологических показателей.

К основным направлениями развития систем турбонаддува можно отнести разработку двухступенчатых систем наддува, применение турбин с изменяемой геометрией, использование различных систем регулирования турбокомпрессоров, использование новых материалов рабочих колес и роторов. Практически все перечисленные направления развития ТК связаны с улучшением их динамических характеристик и надежности.

Как надежность турбокомпрессора, так и инерция его вращающихся частей во многом зависят от характеристик узлов трения, типа опор, надежности и эффективности их работы, поскольку выход из строя подшипниковых узлов является одной из проблем, возникающих при эксплуатации турбокомпрессоров.

Так, по данным Регистра Ллойда [4] общая тенденция надежности судовых дизелей характеризуется следующим соотношением количества отказов турбокомпрессора к общему количеству

отказов двигателя: 22 % — для малооборотных, 11 % — для среднеоборотных и 4 % — для высокооборотных дизелей соответственно. При этом в самом турбокомпрессоре отказы по подшипникам турбины и компрессора составили 12 и 11 % соответственно. По данным другого источника [5] отказы и повреждения турбокомпрессоров, связанные с работой подшипников турбины и компрессора, составили соответственно 23 % и 20 %.

Анализ исследований, выполненных в России примерно с 2000 г. и связанных, так или иначе, с надежностью работы турбокомпрессоров автомобильных, тепловозных и судовых ДВС, показал, что нарушения в работе подшипниковых узлов — одна из основных причин нарушений и отказов в работе турбокомпрессоров.

Основными типами опор турбокомпрессоров являются подшипники качения и скольжения.

Подшипники качения имеют меньшие механические потери и обеспечивают лучшие динамические характеристики турбокомпрессора. К недостаткам этих подшипников относится высокая стоимость, меньшая долговечность, большая сложность подшипникового узла, необходимость индивидуальной системы смазки [6]. Подшипники скольжения более просты по конструкции и дешевле, имеют большую долговечность и могут работать на масле, используемом в системе смазки двигателя [6]. К недостаткам подшипников скольжения можно отнести появление перекосов, большой расход масла, необходимость предварительной смазки после остановки ротора.

Рассмотрим основные недостатки конструкции на примере подшипников скольжения, получивших наибольшее распространение в турбокомпрессорах.

1. Загрязненное масло. Причинами загрязнения масла могут быть засоренный или некачественный масляный фильтр (с плохим качеством фильтрации); износ поршневой группы двигателя; масло низкого качества (неоригинальное масло) и т. д. Загрязненное масло приводит к абразивному износу подшипников скольжения, динамических уплотнений и поверхности ротора, что характеризуется наличием неравномерных задиров и царапин на сопрягаемых поверхностях трения. В дальнейшем износ может привести к увели-

ченным радиальному и осевым люфтам ротора, что приводит к касанию колесами ротора корпусных деталей и отказу турбокомпрессора.

2. Недостаточная смазка. Длительный процесс нарушения режима смазки, называемый масляным голоданием, приводит к тому, что на подшипнике скольжения и опорных шейках ротора турбокомпрессора образуются как следы износа, так и характерные следы перегрева на поверхностях. Это проявляется в характерном изменении цвета опорной поверхности вала. На роторе турбокомпрессора появляются следы побежалости и налет бронзы от подшипников скольжения, так как недостаток смазывающего масла в паре трения ротор–подшипник приводит к соприкосновению трущихся поверхностей. Как следствие, происходит увеличение зазоров в паре трения и касание лопаток рабочих колес и корпуса.

Масляное голодание может быть вызвано следующими причинами:

- нарушением режима подвода/отвода масла;
- низким давлением масла из-за сбоя в системе системы смазки;
- низким уровнем масла в двигателе;
- использованием герметика в качестве прокладочного материала в соединениях маслопроводов;
- попаданием воздуха в систему смазки.

Полное отсутствие смазки очень быстро приводит к поломке турбины.

3. Перегрев пар трения турбокомпрессора. Чаще всего система смазки турбокомпрессора совмещена с системой смазки двигателя. Масло используется для смазки и охлаждения узла трения. Перегрев может случиться по разным причинам, например, когда двигатель остановили после работы под нагрузкой. В остановленном двигателе циркуляция масла прекращается, что приводит к возможности коксования масла в подшипнике.

При перегрузке двигателя высокие температуры отработавших газов также создают условия для закоксовывания масла, что в результате может привести к масляному голоданию.

При этом возникают значительные повреждения вала, его уплотнений и подшипников. На опорной шейке вала образуется масляный нагар, появляются следы «воронения» металла (цвета побежалости).

При перегреве увеличивается износ уплотнения турбинной части и упорных подшипников, могут появляться сквозные трещины в корпусе турбинного колеса.

Причины, вызывающие перегрев следующие:

- забившийся воздушный фильтр, или чрезмерное сопротивление впуску;

- низкое качество масла, нестойкость его к коксованию;

- нерегулярная замена масла;

- чрезмерные нагрузки и предельные режимы эксплуатации двигателя.

4. Химическое загрязнение и окисление масла.

Химическое загрязнение — частая причина износа ротора и подшипников, а также перегрева. Визуальные признаки почти такие же, как и при недостаточной подаче масла. Обычно причиной химического загрязнения может стать попадание в масло топлива, что приводит к снижению смазывающих свойств масла.

Характерные для современных дизельных двигателей высокие температуры могут вызвать деструкцию и окисление масла. В результате этих процессов образуются сажистые, смолистые материалы, которые налипают на детали движения двигателя и вызывают другие проблемы. Окисление вызывается тем, что углеводороды в масле смешиваются с кислородом, в результате чего образуются органические кислоты. Если кислоты достигают высокой концентрации, то на деталях движения возможна точечная коррозия. Сильное окисление масла приводит к появлению нагара и ускоряют процессы коксования. Кроме этого, в процессе окисления масла участвуют агрессивные продукты сгорания топлива, а также сажа, негоревшие остатки топлива и вода.

5. Выброс масла в компрессор или турбину. При разряжении на впуске более 450 мм вод. ст. (засоренный воздушный фильтр, замерзание воздушного фильтра — покрытие ледяной коркой и др.), приводит к выдавливанию масла из подшипников турбокомпрессора на колесо и во впускной коллектор двигателя.

При затрудненном сливе масла из ТК вследствие повреждения или засорения сливной трубки, а также при повышенном давлении в камере двигателя появляется выброс масла из подшипников на лопатки колеса турбины. При коксовании масла на лопатках возможна разбалансировка ротора и выход турбокомпрессора из строя.

Также протечка масла возможна при нарушении герметичности уплотнений в месте соприкосновения их с ротором и масло из корпуса подшипников начинает протекать в проточные части турбокомпрессора.

Таким образом, рассмотренные выше недостатки конструкции системы смазки подшипников красноречиво указывают на проблемы в эксплуатации турбокомпрессоров, приводящие к отказам в их работе.

Перспективный тип опор. Для устранения указанных недостатков, а также повышения надежности и эффективности работы турбокомпресс-

соров предлагается использовать в качестве опор ротора бесконтактные подшипники. К таковым можно отнести газовые (воздушные) и электромагнитные опоры.

Эти опоры давно известны и применяются в различных областях техники: машиностроении, точном приборостроении, вычислительной технике, ядерной энергетике, криогенной технике и т. д.

Применение газовой смазки позволяет упростить конструкцию устройства за счет исключения масляной системы смазки. Отсутствие металлического или жидкостного контакта в газовом подшипнике исключает износ поверхностей, значительно снижает тепловыделение. Подшипники с газовой смазкой, не теряя своих эксплуатационных качеств, могут работать при температурах до 1000 °С и высоком давлении, обеспечивают низкие вибрационные и шумовые характеристики.

При оценке и использовании опор с газовой смазкой следует учитывать и их недостатки, которые заключаются в сравнительно невысокой несущей и демпфирующей способности смазочного слоя.

В электромагнитных подшипниках свободное взвешивание в электромагнитном поле обеспечивает работу опоры при высоких скоростях и крайне малых возмущающих моментах. Срок службы таких опор определяется ресурсом работы электронной аппаратуры, надежность которой в настоящее время высока. Отсутствие износа, шума и вибраций, возможность работы в агрессивных средах, в широком температурном диапазоне делают такие опоры перспективными. К недостаткам электромагнитных опор следует отнести сложные системы управления, невысокую несущую способность и большие затраты энергии.

Тем не менее, несмотря на недостатки бесконтактных подшипников, как в отечественной, так и в зарубежной технической литературе говорится о перспективах применения таких опор в конструкции турбокомпрессоров. Примером могут служить исследования турбокомпрессоров на газостатических подшипниках, выполненных в 1980–1990 гг. в НАМИ. Экспериментальные исследования показали увеличение КПД турбокомпрессора на 6–9 %. Однако, несмотря на такие результаты, работ, выполненных в области исследования бесконтактных подшипников турбокомпрессоров, немного, что говорит о недостаточной изученности проблемных вопросов в этой области.

Также примером, характеризующим реальность и эффективность применения бесконтактных опор в газотурбинных агрегатах, является опыт их применения в конструкциях газотурбинных

двигателей (ММПП «Салют»), турбогенераторов (ОАО «ГТ-ТЭЦ Энерго») [7–9].

Таким образом, для повышения эффективности работы систем наддува ДВС, предлагается использовать в качестве опор турбокомпрессоров бесконтактные подшипники. При этом для получения наилучшего эффекта целесообразно рассматривать не чисто газовые или магнитные опоры, а их комбинацию — газоманитный подшипник. Комбинированный газоманитный подшипник позволит частично устранить недостатки, присущие каждому типу опор, при сохранении тех положительных качеств, которыми они обладают.

В целом применение бесконтактных опор позволит не только упростить конструкцию турбокомпрессора и повысить надежность их работы, но и уменьшить время реагирования на изменяющиеся условия работы.

Исследования газоманитных опор и устройств с такими опорами проводятся в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете. В настоящее время исследование турбокомпрессора с газоманитными опорами находится на стадии подготовки экспериментальных исследований.

Литература

1. Жуков В.А. Поршневые двигатели внутреннего сгорания: перспективы использования и совершенствования / В.А. Жуков // Справ. инж. ж. — 2010. — № 11. — С. 46–50.
2. Наддув бензиновых и дизельных ДВС // Vor dem Elektroantrieb kommt die Aufladung von Benzin- und Dieselmotoren. VDI-Nachr. — 2011. — № 30–31. — С. 19.
3. Кусака Дзин. Прогноз развития ДВС / Кусака Дзин // Meiden jiho=Meiden Rept. — 2007. — № 316. — С. 2–5.
4. Ципленкин Г.Е. Данные Регистра Ллойда по отказам турбокомпрессоров на дизелях морского флота / Г.Е. Ципленкин, В.И. Иовлев // Двигателестроение. — 2012. — № 1. — С. 27–29.
5. Николаев Н.И. Повышение эффективности и надежности турбокомпрессоров судовых двигателей в эксплуатации: монография / Н.И. Николаев СПб. : Судостроение, 2009. — 230 с.
6. Байков Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей: справочное пособие / Б.П. Байков, В.Т. Бордуков, П.В. Иванов, Р.С. Дейч. — Л. : Машиностроение, 1975. — 200 с.
7. Бесчастных В.Н. Проектирование и экспериментальное исследование гибридных газовых подшипников тяжелого многоопорного ротора ГТД: Докл. [Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самара, 24–26 июня, 2009] / В.Н. Бесчастных // Вестник СГАУ. — 2009. — № 3. — Ч. 3. — С. 118–126.
8. Бесчастных В.Н. Газовые подшипники для турбогенераторов. Перспективы внедрения / В.Н. Бесчастных // Газотурбинные технологии. — 2010. — № 9. — С. 10–14.
9. Ануров Ю.М. Разработка и эксплуатация серийных энергетических ГТУ на магнитных подшипниках / Ю.М. Ануров, Е.В. Литвинов // Газотурбинные технологии. — 2010. — № 5. — С. 16–20.