

УДК 621.165

## **История создания и перспективы применения твердосмазочных покрытий для лепестковых газодинамических опор высокоскоростных электротурбомашин**

Г. Е. Андрейчикова, Н. Е. Захарова, М. Ю. Румянцев\*,  
С. И. Сигачев, И. В. Станкевич

Высокоскоростные электротурбомашин (ЭТМ) с частотой вращения ротора в десятки-сотни тысяч оборотов в минуту являются в настоящее время основным функциональным элементом перспективных микротурбинных энергоустановок для систем малой распределенной энергетики и автономных систем электропитания, высокоскоростных центробежных компрессоров и воздуходувок. Практическая реализация данных ЭТМ стала возможной благодаря разработке бесконтактных опор с газовой смазкой — лепестковых газодинамических подшипников (ЛПП), исключающих применение систем масляной смазки и охлаждения, работоспособных в условиях значительных перепадов температур и внешних теплопритоков, обладающих высокими демпфирующими свойствами и вибростойкостью.

Требуемый ресурс и надежность ЛПП обеспечиваются свойствами и работоспособностью твердых смазочных покрытий (ТСП), наносимых на несущие поверхности лепестков. Основное назначение ТСП — «смазка» подшипника на этапах контактной работы пар трения при пусках, остановках в переходных и аварийных режимах работы ЭТМ. ТСП должны иметь высокие адгезию к металлической подложке, термо- и теплостойкости, малые износ и коэффициент трения, а также обладать прирабатываемостью.

Рассмотрена история создания ТСП для ЛПП в СССР. Особое внимание уделено работам по освоению состава АИС-2 на основе фторопласта и полиимида, разработанному в 90-х гг. XX в. на Новочеркасском заводе синтетических продуктов под руководством к.х.н. Г.Е. Андрейчиковой. Описан подход к конструированию, выбору компонентов, толщин и режимов термообработки при формировании покрытия АИС-2. Рабочая температура эксплуатации такого покрытия не превышает 300 °С, чего в настоящее время явно недостаточно. Приведены планы работ созданной в 2015 г. в НИУ «МЭИ» на кафедре ЭКАО и ЭТ лаборатории по разработке новых высокотемпературных ТСП типа АИС-3 и АИС-4 с рабочей температурой до 500 °С.

Ключевые слова: высокоскоростная электротурбомашин, микротурбина, лепестковые газодинамические подшипники, твердосмазочные покрытия, низкий коэффициент трения, прирабатываемость, высокая рабочая температура.

---

\* Rumyantsev.m@gmail.com

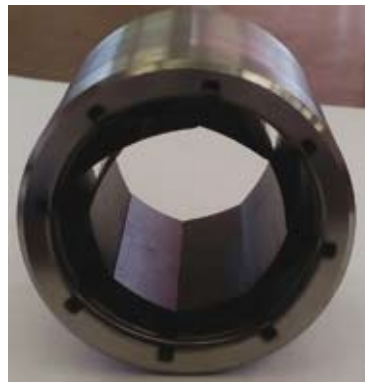
В истории техники нередки случаи, когда наиболее перспективные решения, новые устройства, машины и агрегаты рождаются на стыке решений разных отраслей технической мысли. И хотя исходные составляющие таких решений сами по себе достаточно хорошо исследованы, их взаимное объединение приводит к появлению новых свойств и качеств у вновь образованной системы. Ярким примером подобного утверждения являются новейшие разработки индустриально-развитых стран мира в области высокоскоростных и сверхвысокоскоростных электротурбомашин (ЭТМ) с частотой вращения ротора, измеряемой десятками-сотнями тысяч об/мин. ЭТМ выполняются по агрегатному принципу, когда на одном валу располагаются рабочие колеса турбины и компрессора, а также индуктор (как правило, на основе постоянных магнитов) электрической машины. Высокоскоростные ЭТМ — основа, с одной стороны, низконапорных центробежных компрессоров и воздуходувок и, с другой стороны, микротурбинных энергоустановок. Характерной особенностью этих агрегатов считается небольшая (единицы–сотни кВт) мощность электрической части, определяющая относительно небольшую массу ротора. Практическая реализация подобных ЭТМ стала возможной благодаря развитию и совершенствованию особого вида высокоскоростных опор с газовой смазкой — лепестковых газодинамических подшипников (ЛГП) [1].

ЛГП были впервые предложены около 50 лет назад для использования в турбогенераторных источниках электроэнергии космических аппаратов, позднее они получили распространение в турбохолодильниках систем жизнеобеспечения, во вспомогательных силовых установках самолетов и вертолетов гражданского и военного назначения [2]. С тех пор ЛГП находятся в регулярной и надежной эксплуатации этих систем и агрегатов, а также в микротурбинных энергоустановках, в центробежных высокоскоростных безмасляных компрессорах систем водоочистки и др.

Уникальные свойства ЛГП: отсутствие систем масляной смазки и охлаждения, высокие демпфирующие свойства, способность работать в условиях значительных перепадов температур и внешних теплопотоков, высокая надежность и ресурс, — обеспечили этому типу опор главенствующее применение в высокоскоростных машинах малой и средней мощности (до 200 кВт). Прогнозируемые сроки службы турбомашин с лепестковыми газодинамическими подшипниками приближаются к 300 тысячам часов.

Несущую поверхность подшипника образуют тонкие упругие металлические пластины, которые принято называть лепестками [3]. Податливая многоклиновая поверхность лепесткового подшипника (рисунок) при работе деформируется, образуя рабочие зазоры между валом и лепестками величиной примерно 0,01 мм. Задача конструктора заключается в том, чтобы при этом геометрия рабочих зазоров оставалась в оптимальной

зоне для обеспечения требуемых несущей и демпфирующей способностей опоры.



Радиальный лепестковый подшипник

Компании, изготавливающие лепестковые газодинамические подшипники, охраняют их конструкцию как коммерческую тайну.

Скорость всплытия ротора (скорость, при которой образуется разделительный газовый слой) в зависимости от нагрузки меняется в пределах 2 — 15 м/с. Вплоть до этих скоростей вал контактирует с лепестками при пуске и останове. Кроме того, не исключены кратковременные фрикционные контакты на рабочих скоростях, составляющих 120 — 150 м/с — для подшипников и 300 — 400 м/с — для подпятников. Поэтому, одним из главных факторов, обеспечивающих высокую надежность и большой ресурс машин с газовыми подшипниками, является работоспособность твердых смазочных покрытий (ТСП), наносимых на рабочие поверхности лепестков.

К материалам и ТСП пар трения лепестковых опор предъявляются следующие требования: высокая износостойкость при пусках, остановах и кратковременных высокоскоростных контактах; отсутствие задиров, схватывания, вырывов и залипания; способность к «самозалечиванию» дефектов; длительная теплостойкость; стабильность в условиях тепловых всплесков на микровыступах; коррозионная стойкость; адгезионная прочность к основе; отсутствие набухания; технологичность при нанесении композиции; экологическая безопасность.

Определяющими требованиями считаются:

- высокая адгезия к металлической подложке;
- малый износ и малый коэффициент трения;
- высокая термо- и теплостойкость;
- прирабатываемость.

Основное назначение ТСП — обеспечение «смазки» подшипника на этапах контактной работы пар трения при пусках, остановах, в переходных и аварийных режимах работы ЭТМ.

Первоначально в СССР в качестве антифрикционного покрытия на газодинамические опоры использовали систему ВАП-2, состоящую из эпоксидного

лака ЭП-074, наполненного дисульфитом молибдена высокой чистоты, и органического растворителя. Покрытие предназначалось для повышения антифрикционных свойств деталей трения из бронзы, сталей, ряда сплавов на подшипниках скольжения. Однако система ВАП-2 экологически небезопасна, покрытие на ее основе имеет недостаточную износостойкость и ограниченный эксплуатационный ресурс.

С 1994 г. по настоящее время в качестве ТСП для лепестковых газодинамических опор турбомашин (турбокомпрессоров, турбогенераторов) в России используется единственный, разработанный с учетом требований, предъявляемых к материалам для ТСП газовых опор, фторопластсодержащий антифрикционный износостойкий состав АИС-2. Данный состав был разработан и производится на Новочеркасском заводе синтетических продуктов (НЗСП) под руководством заслуженного изобретателя России Г. Е. Андрейчиковой.

Композиционный материал АИС-2 — жидкая тонкодисперсная система с условной вязкостью 15–25 с (для сравнения, вода имеет условную вязкость 10 с). Композицию наносят на предварительно подготовленные поверхности лепестков методом пневматического распыления при нормальных условиях. Получаемое после термообработки покрытие имеет рабочую толщину 25 — 30 мкм.

Основой создания материала АИС-2 явились разработанные также на НЗСП и промышленно выпускаемые (до 14 тонн в месяц) материалы на основе фторопласта различного эксплуатационного назначения под товарным знаком «Адгеласт», в частности, антипригарного, коррозионно-, термо- и износостойкого назначения (для посуды, термопар, прессформ, и т.д.).

Уровень требований к антипригарным и износостойким антифрикционным твердосмазочным покрытиям отличается на несколько порядков и разработанная серия композиционных материалов для покрытий при различных эксплуатационных условиях не может быть применена в качестве композиционных материалов для покрытий твердосмазочного назначения лепестковых газовых опор.

Однако очень заманчиво и интересно было изучить возможности, в частности, фторопласта, в этих экстремальных условиях эксплуатации, расширить области его применения в системе тонкослойных покрытий.

В августе 1990 г. в ЦЗЛ НЗСП сделали первые четыре варианта смоделированных композиций, нанесли их на подготовленные лепестки и образцы-свидетели, интуитивно подобрали режимы термообработки полученного покрытия. На образцах-свидетелях проверили ряд испытаний по методикам для ранее разработанных покрытий. Лепестки и часть образцов-свидетелей отправили для испытаний, недоступных в условиях ЦЗЛ НЗСП (износ, шероховатость, трибологические свойства покрытия и др.), в НПО «Наука», г. Москва.

Композиция и покрытие на основе фторопласта и полиимида дали обнадеживающие результаты, которые, оказалось, существенно превзошли трибологические, износостойкие и теплостойкие свойства покрытия ВАП-2 на основе эпоксидного лака. По износостойкости покрытие АИС-2 оказалось в 3 раза эффективнее покрытия ВАП-2.

При работе над совершенствованием и доработкой композиции стало ясно, что для этого необходима принципиально новая система покрытий, новый подход к конструированию самой системы.

Опыт подсказывал, что для сохранности полимерной матрицы необходимы модификаторы, которые в экстремальных условиях работы подшипника препятствовали бы деструкции фторопласта, сохраняя адгезионные свойства. При выборе наполнителей требуется учитывать их способность выдерживать контактные давления более 300 кг/мм<sup>2</sup>, не окисляться при рабочей температуре (до +300 °С), сохранять износостойкость покрытия. С учетом требований на толщину покрытия на опорах (17 — 20 мкм), нужна не двусоставляющая система покрытия: грунт + облицовка, как в разработанных ранее, а моносистема, сочетающая адгезионные свойства грунта и антифрикционные, износостойкие свойства облицовки.

В твердосмазочных покрытиях необходимо сочетание теплостойкой полимерной матрицы с высокоизносостойкими, антифрикционными составляющими.

Обеспечение равномерности толщины слоев ТСП покрытия по всей поверхности лепестка возможно только при аэрозольном нанесении композиции. Поэтому необходим комплексный подход к разработке композиций, начиная от выбора компонентов и оптимизации рецептур жидких составов и заканчивая вопросами технологий приготовления и нанесения составов их на лепестковые опоры, включая подбор режимов отверждения покрытия.

Разработанная композиция АИС-2 для ТСП образована жесткой полимерной матрицей и мелкодисперсными, износостойкими, антифрикционными и армирующими наполнителями. Компоненты ТСП способны выполнять несколько функций: повышать жесткость слоя, увеличивать теплостойкость, обеспечивать сплошность и самозалечивание покрытия и т.д.

В состав АИС-2 входят мелкодисперсные минеральные наполнители, органические пленкообразующие, органические растворители, поверхностно-активное вещество (ПАВ), вода, фторопласт. Каждый компонент выполняет определенную роль, как в композиции, так и в покрытии. Например, антифрикционную функцию в покрытии взял на себя фторопласт (политетрафторэтилен, ПТФЭ) [4].

В таблице представлены результаты испытаний трех вариантов ТСП для газодинамических опор.

С 1993 г. ТСП АИС-2 принято в серию для покрытия лепестковых газодинамических подшипников, используе-

## Сравнительные испытания ТСП типовых АИС-1, АИС-2 и перспективных АИС-3

Наименование испытаний (нагрузка 6,7 кг)	АИС-1	АИС-2	АИС-3
Статический коэффициент трения	0,221	0,135-0,10	0,119-0,08
Динамический коэффициент трения (после испытаний)	0,228	0,218	0,216
Адгезия, баллы	1	1	1
Прочность на отрыв, кг/см <sup>2</sup>	не отделяется от подложки образца		
Прочность на удар, кг	50	50	50
Прочность на изгиб, мм	1	1	1
Прочность при вытяжке	дефекты на покрытии отсутствуют		
Шероховатость	0,65 — 0,85	0,33 — 0,45	0,34 — 0,45
Линейный износ, мм/км	1,5 — 3,0	1,0	0,75
Прочность при истирании (нагрузка 2,5 кг), циклы	не испытаны	7000	10000
Температура отверждения, °С	380	420	440

мых в турбомашинах, выпускаемых на НПО «Наука», г. Москва. Это же покрытие применяли в разработках ЛПП, проводившихся в подразделениях МЭИ, МАИ и других организаций. Однако, оно классифицируется как покрытие для температур эксплуатации до 300 °С, что в настоящее время считается недостаточным, современные и перспективные ЭТМ требуют более высокотемпературных ТСП.

Следует отметить активную работу зарубежных ученых в создании и использовании высокотемпературных антифрикционных покрытий для пар трения, подшипников скольжения с температурой эксплуатации 450 — 700 °С. Ведущая фирма США, разработчик и изготовитель подшипников и высокоскоростных турбомашин, Hamilton Sundstrand поставляет свою продукцию для самолетов Boeing 777 предлагает:

самосмазывающиеся покрытия, содержащие смеси серебра, платины, дисульфида молибдена, диоксида кремния; пористый никель-хромовый сплав (покрытие SLIney); более износостойкую смесь связанного никель-кобальтовым сплавом карбида хрома с фторидом металла и серебром (покрытие PS\PM200), работающие до 700°С;

антифрикционный и износостойкий композитный материал, работающий в широком интервале температур от криогенных (– 185 °С) до высоких (+ 900 °С), представляющий собой цементированный металлом оксид хрома и один из металлов — никель или кобальт, или их смесь, а также золото, серебро, платину и другие низкотемпературные, стойкие к окислению. Данный композит рекомендуется в качестве покрытия для пневматических и других подшипников, устойчивого к истиранию и окислению. Наносится композит на субстрат плазменным напылением (воздушным или вакуумным).

На Мировом конгрессе Трибологии, проходившем в Вашингтоне в сентябре 2005 г., была представлена серия из четырех покрытий «Kogolon TM». Для опреде-

ления значения рабочих характеристик и выбора лучшего варианта покрытия, содержащие диоксид хрома и показавшие максимальный коэффициент трения меньше 0,1, были установлены в турбореактивный двигатель. При 54000 оборотов в минуту и для более чем 70 циклов «старт-стоп», указанное покрытие обладало незначительным износом, являлось самосмазывающимся с рабочей температурой до + 700°С и могло быть рекомендовано для высокоскоростных лепестковых подшипников.

Зарубежные разработки высокотемпературных антифрикционных самосмазывающихся покрытий требуют высочайшего уровня техники, оборудования (газопламенных установок для нанесения покрытий), приборов для исследований и контроля параметров.

В 2015 г. в НИУ «МЭИ» на кафедре ЭКАО и ЭТ была создана научно-исследовательская лаборатория по ТСП, основной задачей которой на ближайшее время стала разработка покрытий АИС-Т для лепестковых газодинамических подшипников с температурой эксплуатации до +500 °С. Отправной точкой для выполнения этой задачи являются, разработанные в этой лаборатории композитные материалы типа АИС-3.

Покрытие состава АИС-3 имеет температуру отверждения 440°С; другой состав АИС-4 требует более высокой температуры отверждения. Составы находятся в разработке и есть надежда достичь цель. Самое главное, для проведения этой работы созданы все условия. Лаборатория оснащена современным оборудованием и приборами, подключены к освоению навыков работы с тонкими органическими системами сотрудники и аспиранты кафедры, а возглавляет эту лабораторию к.х.н. Г. Е. Андрейчикова — разработчик многих антифрикционных ТСП, включая АИС-2.

Создание высокоскоростных ЭТМ на ЛПП было начато на кафедре ЭКАО в 1992 г. под руководством к.т.н. В. А. Морозова, чему в немалой степени способствовал приход на кафедру группы разработчиков этих

подшипников во главе с к.т.н. Н. Е. Захаровой. При этом композицию АИС-2 специалисты кафедры стали использовать в разработках с 1994 г., с этого времени накопился опыт использования ЛГП с этим покрытием.

Модельный ряд радиальных ЛГП, разработанных в МЭИ, содержит 14 типоразмеров с диаметром цапф ротора от 11 до 108 мм и несущей способностью, соответственно от 0,2 до 38 кг. Ряд осевых ЛГП состоит из 9 моделей с наружным диаметром пяты от 37 до 225 мм и несущей способностью от 10 до 330 кг. Подобные характеристики ЛГП позволяют разрабатывать ЭТМ с массой роторов от 0,1 до 60 кг, частотой вращения, соответственно 360 — 16000 об/мин и мощностью электрической машины 0,3 — 240 кВт.

Выполнены ускоренные ресурсные испытания радиальных ЛГП с диаметром цапфы 40; 50; 67 мм с покрытием АИС-2, показавшие работоспособность покрытия соответственно после 50; 30; и 10 тысяч циклов «пуск-останов».

С покрытием АИС-2 удалось достичь максимального удельного значения статической нагрузки в 30 кПа.

По результатам испытаний Южно-Корейской фирмой Aentl Co, Ltd. электрокомпрессор со сконструированными и изготовленными в МЭИ опорами с покрытием АИС-2 выдержал 50000 циклов «пуск-останов».

После открытия в 2015 г. новой научной лаборатории по твердосмазочным покрытиям на кафедре ЭКАО и ЭТ сложилась уникальная ситуация, когда в одном коллективе разрабатываются и электромеханические преобразователи для высокоскоростных ЭТМ и ле-

пестковые газодинамические подшипники для этих машин и оригинальные покрытия для этих подшипников. Успешное выполнение поставленной перед лабораторией цели по разработке нового высокотемпературного покрытия АИС-Т с температурой эксплуатации 480 — 500 °С позволит существенно расширить области применения высокоскоростных электротурбомашин на ЛГП в автономных системах энергоснабжения малой мощности как общепромышленного, так и специального назначения.

---

## Литература

---

1. **Пешти Ю.В.** Газовая смазка. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1993.
2. **Захарова Н.Е. и др.** Применение высокоскоростных электротурбомашин малой мощности на летательных аппаратах // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. М.: Издательский дом Академии им. Н. Е. Жуковского.
3. **Захарова Н.Е. и др.** Безмасляный турбодетендер с лепесковыми газодинамическими подшипниками // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. М., 2000;
4. **Брагин А.Н., Ефремов Н.Ф., Андрейчикова Г.Е.** Испытания твердосмазочных покрытий для лепестковых газовых опор // Авиационная промышленность. 1995. № 9 — 10. С. 28.

*Статья поступила в редакцию 06.06.2016*