

УДК 62-294.4

УСТАНОВКА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО  
ПРОФИЛЯ ГАЗОВЫХ ОПОР

С.А. Родинков

Рассмотрен гиросприбор с бесконтактным подвесом чувствительного элемента на базе аэродинамических опор, имеющих специальный аэродинамический профиль, наносимый методом механической обработки. Существующая установка для формирования профиля имеет ряд серьезных недостатков, отрицательно влияющих на профиль опор. Для их устранения предложена новая конструкция установки формирования профиля опор. Проведены исследования, которые позволили внести дополнительные изменения в конструкцию, выбрать материал притира. Изготовлен комплект опор с аэродинамическим профилем, соответствующим всем геометрическим требованиям для чувствительного элемента гиросприбора.

**Ключевые слова:** аэродинамическая опора, установка для формирования профиля, механическая обработка, абразивный износ.

## Введение

Впервые идея использования газа в качестве смазочного вещества была высказана в работе Хирна опубликованной в Париже в 1854 г. Однако планомерные исследования в области газовой смазки начались в СССР и США в 1930-е г.г. в связи с проблемами в станкостроении. Первые лабораторные испытания технического устройства (гироскопа) с газовыми подшипниками были проведены в США в 1932 г., но основы газодинамической теории были сформулированы в начале 1950-х г.г., причем основополагающей можно считать работу советского ученого С.А. Шейнберга. Разработка основ аэродинамической теории подвесов с внешним наддувом была завершена к концу 1950-х г.г., и основной вклад был внесен отечественными учеными профессорами Л.Г. Лойтянским и Л.Г. Степанянцем. В теории вибронесущих газовых опор основная заслуга принадлежит зарубежным ученым, таким как Тэйлор, Сэффмен, Ланглуа, Салблю. Также быстрые и практические успехи в применении подшипников были бы невозможны без углубленных теоретических исследований течений вязкого газа в тонком слое, приведенных в трудах В.Н. Константинеску и В.Н. Дроздовича [1, 2].

Среди газовых подшипников сложной микрогеометрии наиболее широкое применение нашли подшипники со спиральными канавками. Именно такие подшипники (опоры) используются «НИИ командных приборов» в комплексах командных приборов для навигации и управления движением ракет.

Аэродинамическая опора (рис. 1) в данных приборах является особо ответственной деталью, к которой предъявляются очень высокие требования по геометрии: некруглость сферической поверхности не больше 0,2 мкм, шероховатость рабочих поверхностей не хуже 0,1 мкм, необходимый для распространения воздушного потока профиль спиральных канавок, а также их глубина. Эти канавки имеют переменную глубину, которая в зоне вершины составляет 0,003 мм, а у основания увеличивается до 0,004 мм. Опоры изготовлены из материала 40ХНЮ-ВИ с покрытием нитридом титана толщиной 15±3 мкм. Особенностью технологии их изготовления является то, что канавки наносятся на опоры с покрытием. При несоответствии полученного профиля требованиям по геометрии покрытие стравливается и наносится заново.

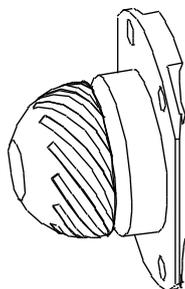


Рис. 1. Аэродинамическая опора

Существующая на предприятии установка для формирования аэродинамического профиля на газовых опорах имеет ряд серьезных недостатков: быстрый износ притира, отсутствие правки кромки притира, большие скорости вращения, делающие процесс формирования профиля сложным в управлении. В связи с некоторыми непродуманными конструкторскими решениями в обеспечении вращения притира возникают погрешности в получаемом профиле, а именно, углубления в крайних

зонах канавок. Все это влияет на качество газовых опор и может привести к снижению точности работы гиросприбора в целом.

Ниже представлены результаты проектирования новой установки для формирования профиля, отвечающей современным требованиям и позволяющей исключить недостатки прежней установки.

### **Преимущества опор с газовой смазкой**

Вязкость газа весьма мала по сравнению с жидкостью, соответственно несущая способность газового слоя и сопротивление его вращению шипа во много раз меньше, чем у смазочного слоя несжимаемой жидкости. Эти особенности обуславливают область применения подшипников с газовой смазкой – в основном для опор быстро вращающихся валов, а также направляющих статического типа различных механизмов и приборов (в том числе направляющих тяжелых станков), работающих при малых скоростях скольжения практически без трения [3].

Газовая смазка исключает проблемы, связанные с граничной смазкой и приработкой подшипников: приработка в том смысле, как она производится при жидкостной смазке в подшипниках качения, не имеет места в опорах с газовой смазкой.

Следует подчеркнуть, что в принципе смазкой для газовых опор может служить любой газ или смеси газов. Они мало отличаются по тем свойствам, которые важны для подшипников, но воздушная смазка более практична и экономична. По этой причине, за исключением частных случаев, в качестве смазки используется воздух.

Применение газовой смазки дает следующие преимущества:

- обеспечивается герметичность системы смазки;
- уменьшается риск загрязнения, засорения и выхода из строя смазочной системы;
- исключается необходимость уплотнений валов и различных сложных лабиринтов;
- исключается громоздкое оборудование для хранения, подогрева и охлаждения, нагнетания и откачки жидкостных смазок (регуляторы давления, специальные фильтры и т.п.);
- упрощается и удешевляется конструкция подшипниковых узлов;
- снижаются вибрация и шумы, производимые охлаждающими устройствами.

Следует отметить, что при этом сокращаются габариты и вес всей аппаратуры, упрощается эксплуатация и надолго обеспечивается ее кондиционность [4].

### **Выбор метода обработки**

Для выполнения всех требований к профилю спиральных канавок необходимо применение специальных методов обработки. На предприятии существует возможность выполнения канавок тремя способами:

1. Электрохимическая обработка. При этом возникают трудности с обеспечением разной глубины по длине канавки; существуют проблемы с достижением необходимого профиля канавки;
2. Нанесение канавок лазером. При экспериментальной отработке этого метода выявлено, что параметры существующего лазера, такие как мощность и диаметр пучка, не позволяют обеспечить необходимую чистоту поверхности дна канавки;
3. Механическая обработка.

Ниже предложена одна из возможных схем получения канавок подшипников с аэродинамическим профилем путем механической обработки.

### **Прототип установки**

Для формирования аэродинамических канавок способом механической обработки на предприятии применяется специальная установка (рис. 2). Установка представляет собой стол, на котором размещен шпиндель 1 с закрепленной на нем опорой и узел притира 7. Вращение притира обеспечивается двигателем с рядом зубчатых колес, передающих вращение и расположенных на узле крепления притира 7. Сам притир 8 подпружинен и прижимается к опоре. Узел притира имеет возможность вертикального перемещения за счет конической передачи 9. Предполагалось предусмотреть возможность регулирования угла расположения опоры 4 относительно основания с целью унификации установки, так как в разных комплексах используются опоры с разным углом наклона профиля канавки, однако позднее было принято решение ограничиться использованием подставок с необходимыми углами наклона.

На шпинделе 1 располагается каретка 3 для регулировки положения опоры по плоскости. Вращение шпинделя осуществляется двигателем 2. Конструкторское решение размещения двигателя и его реверса является одним из самых больших недостатков данной установки. Реверс осуществляется за счет переключателей 5 и установленного на валу двигателя флажка 6. При реверсе происходит удар флажка о переключатель, и возникают ненужные вибрации корпуса. Помимо этого, реверс проходит в течение некоторого времени, создавая простой в работе двигателя, в то время как притир работает. Вследствие этого по краям профиля образуются углубления. Данные отклонения геометрии профиля могут приводить к

образованию воздушных завихрений и нарушению аэродинамических качеств опоры, что, в свою очередь, негативно сказывается на точности работы чувствительного элемента.

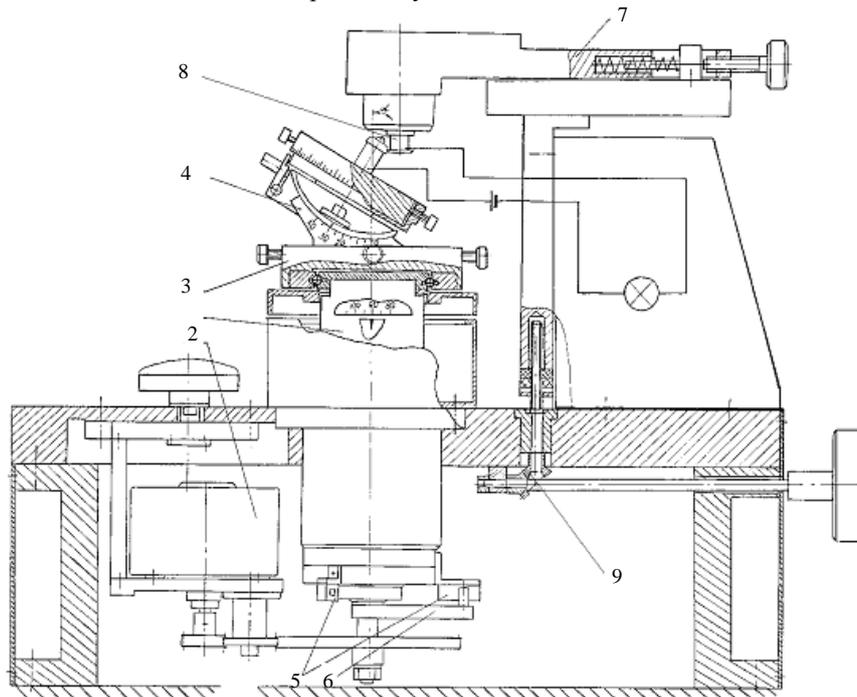


Рис. 2. Установка для формирования профиля: 1 – шпиндель; 2 – двигатель; 3 – каретка; 4 – угловая оправка для опоры; 5 – переключатель; 6 – флажок; 7 – узел притира; 8 – притир; 9 – коническая передача

**Усовершенствованная установка для получения аэродинамического профиля**

На рис. 3 представлено описание установки, подготовленной для внедрения и проходящей технологическую отработку на предприятии.

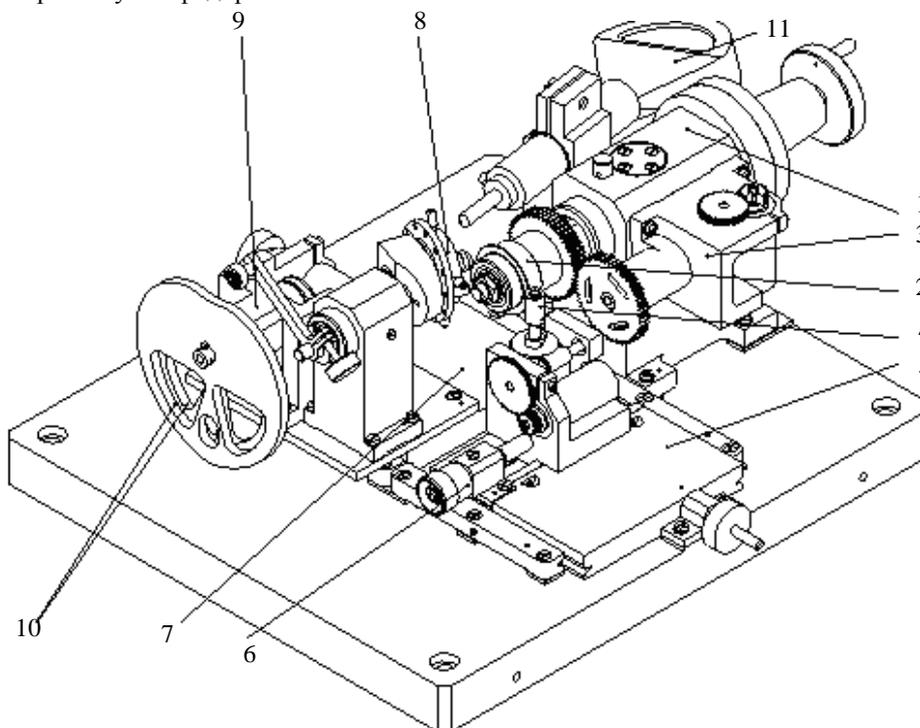


Рис. 3. Модернизированная установка для формирования аэродинамического профиля: 1 – узел крепления притира; 2 – притир; 3 – узел привода притира; 4 – контрпритир; 5 – каретка; 6 – микрометрический винт; 7 – каретка; 8 – узел крепления опоры; 9 – узел возвратно-вращательного вращения опоры; 10 – кулачки; 11 – микрокатор

Установка предназначена для нанесения на сферическую поверхность опоры спиральных канавок глубиной у основания  $0,004 \pm 0,0008$  мм, а в зоне вершины  $0,003 \pm 0,0008$  мм.

Узел 1 отвечает за крепление притира 2 и его перемещение вдоль оси на ширину зацепления зубчатых колес. Узел 3 обеспечивает вращение притира с постоянной скоростью 55 об/мин. Сбоку к притиру прижимается контрпритир 4, расположенный на каретке 5. Контрпритир вращается с постоянной скоростью, немного отличной от скорости вращения самого притира. Разности скоростей вращения обеспечивают взаимодействие разных точек притира и контрпритира и, соответственно, более равномерный износ самого притира. Контрпритир для выставки имеет возможность перемещения за счет вращения микрометрического винта 6.

На нижней каретке 7 располагается узел крепления опоры 8, который обеспечивает ее расположение под необходимым углом, под которым будут наноситься канавки, и соосность центра сферы опоры с осью вращения. Также на нижней каретке располагается узел возвратно-вращательного перемещения 9, обеспечивающего вращение опоры на заданный угол. В этом узле предусмотрены два сменных кулачка 10, обеспечивающих нанесение сначала менее глубокой канавки, а затем более глубокой. Скорость вращения кулачков составляет 15 об/мин. Обе каретки с размещенными на них узлами ходят по направляющим и подпружинены для обеспечения контакта притира, с одной стороны, с контрпритиром, а с другой – с опорой. Для обеспечения возможности проведения замеров глубины канавки установлено крепление для микрокатера 11.

Профиль канавки образуется за счет абразивного износа между притиром и опорой, контрпритир с обратной стороны выполняет постоянную правку кромки притира. Для нанесения на опоре канавок по всему диаметру в узле предусмотрен делительный диск с фиксатором. После нанесения профиля каждой канавки опору поворачивают на одно деление диска, пока не будут нанесены все 12 канавок.

В установке можно выделить 6 основных узлов (рис. 4):

1. узел крепления и перемещения притира;
2. узел вращения притира;
3. узел правки кромки притира (контрпритир);
4. узел крепления опоры;
5. узел возвратно-вращательного движения опоры;
6. узел снятия заусенцев и наплывов с притира.

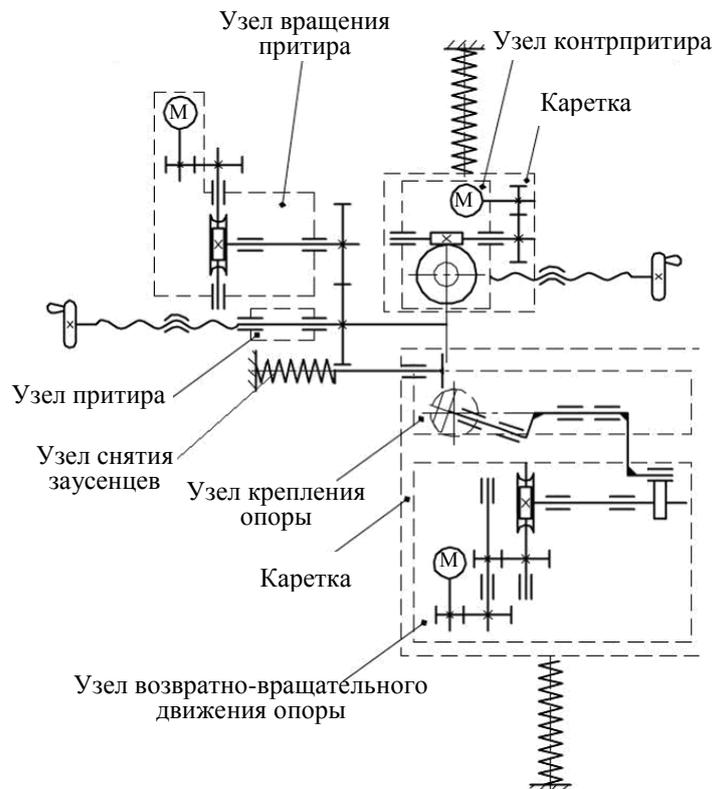


Рис. 4. Кинематическая схема установки

**Отличительные особенности модернизированной установки**

В предлагаемой конструкции было решено уйти от реверса двигателя. Для решения данной проблемы использована кулачковая передача, которая обеспечивает постоянное вращение двигателя. За счет правильного выбора профиля кулачка задается необходимый угол поворота опоры, причем, так как профиль имеет перепад глубин, необходимо использовать два сменных кулачка. Первым наносится профиль глубиной 3 мкм, затем, после переустановки коромысла, наносится более короткая часть канавки глубиной 4 мкм. Кулачки имеют вырезы с целью облегчения конструкции, а также приближения центра тяжести к оси для более плавного вращения.

Важной отличительной особенностью установки является использование узла контрпритира. Он используется для правки кромки вращающегося притира, что позволяет увеличить срок службы притира и стабильность наносимого профиля.

Было изготовлено и опробовано несколько притиров из разных материалов, таких как сталь 20, латунь ЛС59-1 и чугун СЧ15. В результате проведенных испытаний наилучшее качество канавок получено при формировании их чугунным притиром.

В процессе обработки детали на самом притире по краям могут образовываться наплывы и оставаться заусенцы. Для их устранения введен дополнительный узел, представляющий собой свободно вращающийся на подшипнике круглый закаленный нож с острой кромкой, который придвинут вплотную к торцу притира, сохраняя его свободное вращение, и расположен под притиром.

Общим недостатком существующей и модернизированной установок является сложность позиционирования детали относительно притира. В новой установке это усложняется необходимостью выставки контрпритира, который при неправильном расположении будет задавать другой профиль самого притира и соответственно канавки на опоре. В связи с этим предложено на притире сделать дополнительный буртик, относительно которого и производится выставка.

**Заключение**

Исходя из возможностей предприятия, наилучшим методом для формирования аэродинамического профиля опор газового подшипника, применяемого в гироскопе с бесконтактным подвесом чувствительного элемента, является метод механической обработки. Основываясь на недостатках в конструкции существующей установки, негативно влияющих на получаемый профиль, предложена кинематическая схема, разработана и изготовлена новая установка для формирования аэродинамического профиля опор. В процессе обработки выявлена необходимость введения дополнительного узла для снятия заусенцев в связи с добавлением в установку контрпритира. Проведено экспериментальное исследование притиров из разных материалов. Выявлено, что лучшие результаты показывает чугунный притир. Изготовлен комплект опор, полностью соответствующий всем геометрическим требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам гироскопа.

Новая конструкция установки позволяет устранить дефекты профиля, получаемые при использовании реверсивного двигателя (углубления в крайних зонах канавок). Таким образом, обеспечивается профиль, максимально приближенный к прямоугольному, заданному конструкторской документацией на опору. Повышено качество профиля, чистота поверхности достигает 0,1 мкм. Уменьшается износ основных узлов, в первую очередь – притира.

**Литература**

1. Константинову В.Н. Газовая смазка. – М.: Машиностроение, 1968. – 709 с.
2. Дроздович В.Н. Газодинамические подшипники. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. – 208 с.
3. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. – М.: Машгиз, 1963. – 244 с.
4. Фролов К.В. Современная трибология. Итоги и перспективы. – М.: ЛКИ, 2008. – 408 с.

*Родников Сергей Александрович* – НИИ командных приборов, начальник сектора, roguHkoB@mail.ru