

УДК 621.891.031

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛНОВЫХ ПЕРЕДАЧ И ТРЕБОВАНИЯ К СТЕНДОВОЙ ОСНАСТКЕ

Ивашов Е.Н., Рысаков С.В., Панфилова Е.С., Шихов А.И.

ФГАОУ ВПО НИУ «Высшая школа экономики», Москва, e-mail: eivashov@hse.ru

Рассмотрены задачи экспериментальных исследований волновых передач. Установлены факторы, влияющие на кинематические характеристики, работоспособность, ресурс и к.п.д. волновых вакуумных передач, получена информация о наиболее вероятных причинах выхода их из строя, что позволяет рационально подходить к разработке конструкций таких передач и к выбору материалов для их основных элементов.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, волновые передачи

TASKS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF WAVE TRANSMISSION AND REQUIREMENTS FOR POSTER SNAP

Ivashov E.N., Rysakov S.V., Panfilova E.S., Shikhov A.I.

High school of economics, Moscow, e-mail: eivashov@hse.ru

We consider the problem of experimental studies of wave transmission. The factors affecting the kinematic characteristics, efficiency, resource and efficiency vacuum wave transmission, the received information about the most likely causes of failure that provides an efficient approach to the development of structures such transfers and to the selection of materials for their basic elements.

Keywords: experimental studies of wave transmission

Общие цели испытаний и требования к стендовой оснастке

Основная задача экспериментальных исследований заключалась в изучении количественных закономерностей и качественных сторон явлений, сопровождающих работу волновых передач в вакууме. Установление факторов, влияющих на кинематические характеристики, работоспособность, ресурс и к.п.д. волновых вакуумных передач, а также информация о наиболее вероятных причинах выхода их из строя, что позволяет рационально подходить к разработке конструкций передач и к выбору материалов для их основных элементов. Теоретический анализ условий работы опытной передачи, обработка и обобщение экспериментальных данных позволили наметить предпосылки для инженерного расчета маломоментных вакуумных волновых передач.

Условия работы волновых вакуумных передач таковы, что обычные критерии расчета и выбора материалов здесь неприемлемы. В связи с этим возникла необходимость проведения экспериментальных исследований с целью получения следующих данных:

1) Определение показателей износа конструкционных материалов и полимеров, используемых в волновых вакуумных передачах.

2) Определение эффективности смазок и специальных покрытий для повышения работоспособности волновых передач в вакууме.

3) Изучение явлений, происходящих в контактной зоне пар скольжения – качения, с выводом формул для расчета ряда параметров вакуумных волновых передач.

4) Определение кинематических характеристик волновых передач планетарным генератором волн.

5) Определение к.п.д. вакуумной волновой передачи.

6) Определение температурного режима работы передачи.

7) Разработка рекомендаций по подбору материалов и конструирование вакуумных волновых передач.

8) Создание методики ускоренных вакуумных испытаний.

В связи с изложенным, к стендовой оснастке был предъявлен следующий комплекс требований:

1) Точное определение входной и выходной частот вращения передачи.

2) Определение к.п.д. передачи в целом.

3) Измерение температуры зубчатого зацепления передачи непосредственно при ее работе.

4) Легкость монтажа и демонтажа стендовой оснастки.

5) Надежность работы вакуумных вводов.

6) Достаточная быстрота откачки вакуумной камеры.

7) Обеспечение, так называемого, «чистого вакуума».

Ни один из стан­дов, выпускаемых про­мышленностью, не удовлетворяет всем ука­занным условиям, поэтому потребовалось изготовление специальной оснастки.

Следует отметить, что при вакуумных исследованиях диффузионные методы откачки получили наиболее широкое распро­странение. Существенным их недостатком является миграция паров масла и продуктов его крекинга в реципиент. Однако, эта ми­грация может быть уменьшена соответст­вующими ловушками. Для получения сверх­высокого вакуума (до 10^{-6} Па) в установках обычно используют электроразрядные на­сосы. Однако, скорости откачки такими на­сосами в области высокого вакуума невели­ки. Когда газоразделение при испытаниях становится значительным, такие насосы не могут обеспечить необходимого разреже­ния. Помимо этого существует опасность запыления поверхности трения ионами ти­тана, что вызовет и искажение результатов эксперимента. Поэтому в наших исследова­ниях был использован диффузионный ме­тод откачки.

На рис. 1 приведены спектры масс оста­точных газов, полученные с помощью масс­спектрометра МСХ-3А при разных усло­виях откачки. При откачке диффузионным насосом без азотной ловушки и давлении в камере $6,65 \cdot 10^{-4}$ Па в спектре (рис. 1,а) преобладают тяжелые массы – продукт кре­кинга масла. Однако, пики $|\text{O}$ ($M=18$), CO ($M=28$) и C ($M=44$) также велики.

При использовании экранирующей азотной ловушки, при давлении $6,65 \cdot 10^{-4}$ Па, основными остаточными газами явля­ются: H_2 ($M=2$), C ($M=18$), CO^+ ($M=28$) и C ($M=44$). Продуктов крекинга масла в этом случае мало. Для откачки (рис. 1,б) нами были выбраны форвакуумный и диффузи­онный насосы; последний – с азотной ло­вушкой. Масляные диффузионные насосы просты и дешевы в эксплуатации, облада­ют достаточно высокой быстротой откачки и дают предельный вакуум 10^{-4} – 10^{-6} Па. Существенный недостаток их – миграция в рабочий объем паров масла и продуктов его крекинга – устраняется здесь посред­ством азотной ловушки.

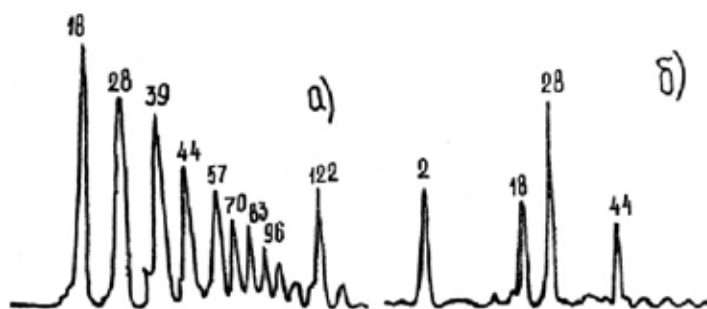


Рис. 1. Спектры масс остаточных газов при различных условиях откачки: а – диффузионным насосом без азотной ловушки; б – диффузионным насосом с азотной ловушкой

Экспериментальная установка для исследования волновых вакуумных передач

Для проведения исследований ваку­умных волновых передач была сконстру­ирована и изготовлена специальная уста­новка, схема которой представлена на рис. 2. Она состоит: из камеры (1), сиф­фонного ввода вращения (2) с максималь­ным передаваемым крутящим моментом $M_{\text{max}} = 800 \text{ Н}\cdot\text{мм}$ и предельной частотой вращения $\nu = 2500 \text{ об/мин}$, допустимой для сиффонного ввода. Привод осуществлен

от электродвигателя типа П-П постоянного тока (4) со стабильно регулируемой частотой вращения вала в пределах 400 – 2500 об/мин (40 – 250 рад/с). К сиффонному вводу (2) вращение передается через ременную передачу (5), а от него к волновой передаче (6), установленной внутри камеры. Нагрузка обеспечивается порошковым тормозом типа ПТ-2,5 с максимальным моментом до 50 Н· м. Контактный вывод (3) выполнен с двумя секциями уплотнений, между которыми обеспечивается разрежение меха­ническим насосом РВН-20, что позволяет

достигнуть остаточного давления в камере не выше $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Частота вращения на входе и выходе измерялась с помощью фотодатчиков (7), состоящих из фотодиодов ФД-2 и лампочек накаливания с последующим преобразованием сигналов по схеме триггера Шмидта с передачей их на частотомер типа Ф-551А, считающий импульсы в течение 10 с. На входе и выходе передачи установлены тахометрические диски диаметром 180 мм с радиальными щелями $0,5 \times 30$ мм. Чтобы показания частотомера отсчитывались непосредственно в числах оборотов в минуту, число щелей на дисках кратно шести. При этом на диске входного вала – шесть щелей, а на выходном – шестьдесят, в связи с малой частотой вращения выходного вала.

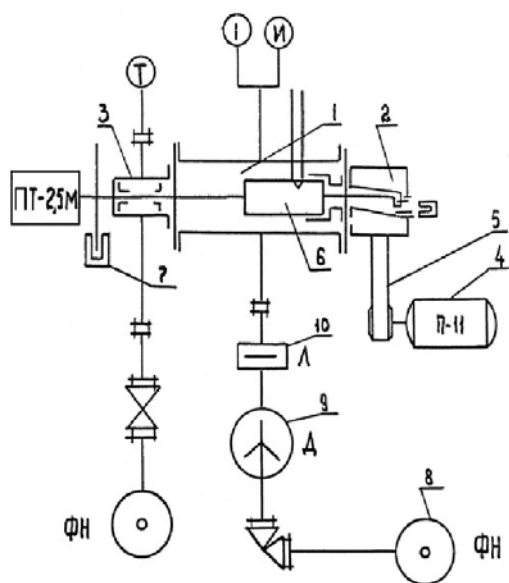


Рис. 2. Вакуумная схема экспериментальной установки

Температура вблизи зоны зацепления измеряется с помощью хромель-копелевой термопары с последующей передачей сигнала на электронный потенциометр типа ЭПВ-2-Г1А.

Средствами откачки являются: механический насос РВН-20 (8) и диффузионный насос Н-500 (9) с азотной ловушкой (10), которая значительно снижает миграцию паров масла в рабочий объем. На установке испытывалась волновая передача со следующими параметрами:

1. Число зубьев жесткого колес $Z_* = 248$.

2. Число зубьев гибкого колеса $Z_f = 246$.

3. Передаточное число передачи $U_{\text{вп}} = 123$.

4. Наружный диаметр планетарного генератора волн $D_H = 72$ мм.

5. Передаточное число генератора $U_{\text{ген}} = 2,21$.

Для повышения срока службы волнового зубчатого зацепления была спроектирована волновая передача МИЭМ ВП-2. Поставленная цель была достигнута тем, что в новой конструкции жесткое колесо выполнено в виде кольца со сквозными радиальными отверстиями, расположенными в шахматном порядке по наружной цилиндрической поверхности жесткого колеса. Внутрь этих отверстий помещались твердосмазочные брикеты, которые были постоянно прижаты к зубчатому венцу гибкого колеса пружинами с регулировкой их винтами. Этим обеспечивалось непрерывное нанесение твердосмазочной пленки к поверхности трения с некоторым экспериментально установленным малым давлением. Это обеспечило рост ресурса передачи и уменьшение износа зубьев жесткого и гибкого колес без значительного усложнения конструкции и технологии изготовления передачи.

Методика проведения экспериментов на высоковакуумной установке МИЭМ ВУ-2

На высоковакуумной установке МИЭМ ВУ-2 необходимо было исследовать различные материалы жестких и гибких колес вакуумных волновых передач с использованием смазок, металлопокрытий и самосмазывающихся материалов, способных работать в вакууме в заданном интервале рабочих нагрузок и температур.

Время проведения комплекса повторных экспериментов составляло $5 \cdot 10^5$ циклами деформации гибкого колеса. После этого жесткое колесо, гибкое колесо и самосмазывающийся сепаратор планетарного генератора волн подвергались промывке в бензине, ацетоне, спирте и взвешиванию на аналитических весах типа ВЛА-200-М с точностью измерения до 0,1 мг. Далее испытания повторялись до полного выхода из строя зацепления волновой вакуумной передачи. Моменты на выходе составляли $M_{\text{вых}} = 10,0$ и $20,0$ Нм. Для отыскания оптимальных материалов жесткого и гибкого колес были использованы следующие пары (таблица).

Исследованные пары материалов жесткого и гибкого колес

	Материалы		Смазка или покрытие
	Жесткого колеса	Гибкого колеса	
1	Сталь 45	X18H10T	Mo
2	Сталь 45	X18H10T	Покрытие серебром
3	Сталь 45	Ф4К15М5	Нет
4	Сталь 45	Ф4 СоСl ₂	Нет

Обоснование выбора материалов жестких и гибких колес вакуумной волновой передачи

При выборе конструкционных материалов для зубчатых пар учитывался комплекс требований, предъявляемых вакуумной технологией, а также фрикционными свойствами материалов в вакууме. Вакуумные требования сводились к обеспечению заданного уровня разрежения в рабочем объеме при условии поддержания определенного состава компонент остаточных газов.

Для получения в откачиваемом объеме заданного предельного вакуума при минимальном времени откачки к конструкционным материалам предъявляют, как известно, следующие требования:

- а) минимальное газоотделение;
- б) высокая коррозионная стойкость;
- в) инертность по отношению к маслам и промывочным жидкостям;
- г) хорошая обрабатываемость;
- д) минимальная упругость собственных паров при рабочей температуре.

Для вакуумной аппаратуры и некоторых функциональных элементов вакуумного оборудования, при разрежении $6 \cdot 10^{-4}$ Па и выше, зарекомендовала себя аустенитная немагнитная нержавеющая сталь X18H10T. Она обладает достаточной упругостью, хорошо сваривается, химически устойчива, жаропрочна, легко обезгаживается, поддается ковке и штамповке. Этим обусловлен ее выбор для изготовления гибких колес волновых передач.

Для жестких колес была выбрана сталь 45, обладающая после закалки мартенситной структурой с высоким пределом упругости кристаллов мартенсита. Эта сталь не корродирует при периодическом соприкосновении с атмосферой, допускает нагрев до температуры 400°C. и легко обезгаживается. Целью экспериментальных исследований выбранных материалов было определение возможности их эксплуатации

в условиях сухого трения, оценка эффективности твердых смазок, металлопокрытий.

Однако, интенсивное испарение смазки, а также истирание твердосмазочных покрытий и металлических пленок создает известные трудности в использовании металлических гибких колес. Поэтому развитие приборных волновых передач идет также в направлении применения самосмазывающихся гибких колес, которые обладают достаточно большим запасом смазки.

Научно-исследовательским институтом пластических масс (НИИПМ) г. Москва разработаны самосмазывающиеся материалы на основе фторопласта-4 ФН-3 (фторопласт-4 с никелем и нитридом бора), МС-13 (фторопласт-4 с медью и дисульфидом молибдена), ФН – 202 – 80% фторопласта – 4, 10% никеля, 10% дисульфида молибдена. Наибольшее распространение получили материалы МС-13 и ФН-202, которые способны сохранять работоспособность до температуры 175°C.

При введении во фторопласт-4 наполнителей получают материалы, обладающие хорошими антифрикционными свойствами и значительной износостойкостью при меньшей пластичности. К настоящему времени разработано и испытано пять новых композиций, имеющих следящий состав:

Ф4К15М5 – 80% фторопласта-4, 15% кокса и 5% дисульфида молибдена;

Ф4К20 – 80% фторопласта-4 и 20% кокса;

Ф4С15 – 85% фторопласта-4 и 15% рубленого стекловолокна;

Ф4С15М5 – 80% фторопласта-4, 15% стекловолокна и 5% дисульфида молибдена;

Ф4М15 – 85% фторопласта-4 и 15% дисульфида молибдена;

Ф4 +Со – 99% фторопласта-4 и 1% синего кобальта.

Особенностью наполненных материалов на основе фторопласта-4 является то, что между частицами наполнителя и связующего нет адгезионной связи. Поэтому

предел прочности при растяжении наполненных фторопластов падает по мере увеличения процентного содержания наполнителя (примерно на 0,5-0,5 МПа на каждый процент, независимо от природы наполнителя). Коэффициент трения наполненных материалов на 20 – 30% выше, чем у чистого фторопласта-4, однако, износостойкость этих материалов резко возрастает.

Нами были взяты для испытания два из них: Ф4К15М5 и композиция фторопласта с синим кобальтом Со, отличающиеся хорошей износостойкостью и антифрикционностью. В состав всех самосмазывающих полимеров входит в качестве твердой смазки Мо. Последний имеет благоприятные вакуумные характеристики по газоотделению и спектральному составу остаточных газов.

Для наружных и внутренних колец генераторов волн была выбрана сталь ШХ15, обладающая высокой контактной и достаточной изгибной прочностью.

Предварительный эксперимент на установке МИЭМ ВУ-2

С целью качественной оценки влияния «масляного» вакуума, полученного механическим форвакуумным насосом типа РВИ-20 и диффузионным насосом типа Н-500 с вымораживающей азотной ловушкой, на износ зацепления волновой вакуумной передачи МИЭМ ВП-2 был выполнен описанный ниже предварительный эксперимент. Волновая вакуумная передача МИЭМ ВП-2 была тщательно промыта в бензине, ацетоне и спирте. Наибольшее внимание уделялось при этом зубчатому зацеплению. Далее передача устанавливалась в высоковакуумную камеру, причем зубчатые венцы жесткого и гибкого колес не смазывались. Выходной вал не нагружался. После 20 часов работы при входной частоте вращения 0- 1000 об/мин были произведе-

ны демонтаж камеры и разборка передачи. Тщательное исследование зубчатых венцов жесткого и гибкого колес под микроскопом с увеличением х5 показало следующее:

1) Зубья гибкого колеса из стали Х18Н10Т имеют незначительный износ.

2) Зубья жесткого колеса из стали 45 (HRC-50 – 52) изношены, что связано с меньшей износостойкостью стали 45 по сравнению со сталью Х18Н10Т.

Далее передача была собрана с новым жестким и гибким колесами и работала при том же режиме, но со смазкой зубчатого зацепления дисульфидом молибдена Мо в течение 20 часов. Исследование венцов жесткого и гибкого колес под микроскопом с увеличением х50 показало, что зубья обоих колес не имеют следов износа, что доказывает эффективность использования Мо в качестве смазки.

Список литературы

1. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Системы приводов для работы в сверхчистой вакуумной технологической среде / Приводная техника. – М. – 2011. - №1. - с. 37-38.
2. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Методы проектирования приводов и функциональных устройств вакуумного модульного оборудования / Приводная техника. – М. – 2011. - №3. - с.23-33.
3. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Проектирование внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий/ Электромагнитные волны и электронные системы. – М. – 2011. - Т.16. - с.49-54.
4. Крагельский И.В. Трение и износ в вакууме.– М.: Машиностроение, 1973.
5. Курилов Г.В., Сентюрихина Л.Н., Южно Т.П., Любарский И.М. Исследование работоспособности твердых смазочных покрытий // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. – Харьков, 1972.
6. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976.
7. Силин А.А. Методы оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износ // Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1972.