УДК 621.22-762 +531.43

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ПОДВИЖНЫХ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© 2012 О.В. Кропотин

Омский государственный технический университет

Поступила в редакцию 29.11.2012

Рассматриваются основные положения методики прогнозирования надежности и ресурса подвижных герметизирующих устройств и применение методики на примере комбинированного герметизирующего устройства.

Ключевые слова: надежность, ресурс, герметизирующее устройство, трение, износ, формоизменение

Обеспечение требуемых надежности и ресурса герметизирующих устройств (уплотнений) предполагает разработку оптимальной конструкции и оптимальный выбор применяемых материалов. В существующих общих подходах и методиках проектирования подвижных герметизирующих устройств (ГУ) используются комплексные показатели их работы или несколько показателей одновременно [1, 2]. Как правило, эти показатели зависят от начальных значений параметров режима эксплуатации и характеристик материалов или, в лучшем случае, учитывают временную зависимость лишь некоторых из них. Существуют методики прогнозирования ресурса и надежности уплотнений и трибосопряжений по критерию износостойкости [3], а также методики анализа их работы с учетом формоизменения в процессе фрикционного взаимодействия [4, 5]. Указанные подходы не в полной мере учитывают при анализе работы ГУ на этапе проектирования такой важнейший параметр как герметичность устройства и ее изменение в процессе эксплуатации. Известно, что высокая герметичность в начале эксплуатации зачастую не обеспечивает наибольшего ресурса устройства, а формоизменение уплотнительных элементов в процессе изнашивания может привести к существенному изменению параметров, характеризующих герметичность и прогнозируемые надежность и ресурс. Решить эти проблемы, на наш взгляд, позволит методика прогнозирования надежности и ресурса подвижных ГУ на этапе проектирования, в основе которой лежат критерии выбора материалов и параметров конструкции, учитывающие изменение герметичности, формы и напряженнодеформированного состояния элементов устройства в процессе эксплуатации.

Объект и методика исследования. Предлагаемая методика прогнозирования надежности и ресурса ГУ включает следующие этапы анализа работы устройства.

Кропотин Олег Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры физики. E-mail: kropotin@mail.ru

I. Выбор информационного параметра и его предельного значения, определяющего надежность (ресурс) устройства.

При разработке (оптимизации) конструкции и выборе применяемых материалов целесообразно использовать в качестве параметра (критерия), определяемого с учетом формоизменения элементов устройства в процессе трения, такой параметр как наработка (время работы, путь пробега, количество циклов и т.д.). В зависимости от типа устройства, условий эксплуатации и параметров надежности целесообразно использовать следующие предельные значения параметра, зависящие от утечки и определяющие надежность (ресурс) ГУ:

- наработка до достижения критического значения удельной утечки;
- наработка до перехода в следующий класс негерметичности;
- наработка до достижения критического расхода герметизируемой среды.

Приведенные параметры могут служить в качестве критериев качества при реализации оптимизационных алгоритмов.

II. Разработка аналитической (расчетной) модели устройства, позволяющей определить в процессе эксплуатации (в зависимости от наработки) параметры контактного взаимодействия и напряженно-деформированного состояния элементов устройства, по значениям которых контролируется возможность возникновения напряжений и деформаций, превышающих их предельные значения, а также определяется значение утечки.

<u>III. Нахождение зависимости утечки от нара-</u> <u>ботки до выполнения одного из условий:</u>

- возникновение отказа (ресурсного или деградационного) по условию превышения напряжениями или деформациями их предельных значений для данного материала или достижения предельного значения утечки;
- достижение наработкой назначенного ресурса устройства.

IV. Определение по полученной зависимости предельного значения наработки, оценка прогнозируемого ресурса или надежности в пределах назначенного ресурса.

При проведении процедуры оптимизации этапы данной методики повторяются многократно для последующего решения по оптимальной конструкции и (или) оптимальному выбору материалов. Данный подход использован в работе для детального анализа функционирования и условий работы поршневого комбинированного ГУ пневмогидроцилиндра кольцевого типа (рис. 1). Эта конструкция использовалась ранее в работе [6] и содержит уплотнительный элемент в виде кольца полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с тонкой уплотняющей губкой и силовой элемент в виде резинового кольца, поджимающего губку уплотнительного элемента к уплотняемой поверхности. ГУ разделяет полость, заполненную жидкостью, и полость, заполненную газом. Особенностью условий эксплуатации рассматриваемого пневмогидроцилиндра является наличие рабочих периодов, когда цилиндр совершает возвратнопоступательное движение, и периодов длительного хранения с сохранением эксплуатационных параметров нагружения элементов ГУ. Эффективность конструкции герметизирующего устройства определяется его долговечностью и обеспечиваемой степенью герметичности. Эти характеристики взаимосвязаны и во многом зависят от напряженно-деформированного состояния уплотнительного элемента при контактном взаимодействии и трении. В свою очередь, напряженно-деформированное состояние определяется конструктивным решением и свойствами материалов.

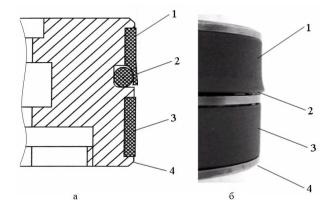


Рис. 1. ГУ пневмогидроцилиндра (а – осевое сечение, 6 – внешний вид):

1 — уплотнительный элемент (кольцо из ПКМ); 2 — силовой элемент (резиновое кольцо); 3 — направляющее кольцо из ПКМ; 4 — корпус поршня

В данной работе после того, как были заданы конструктивные параметры ГУ, производился выбор ПКМ для изготовления уплотнительного элемента. В качестве предельных значений наработки были выбраны:

- наработка до перехода в следующий класс негерметичности;
- наработка до достижения критического расхода герметизируемой среды (экспериментально определенного предельно допустимого объема жидкости, перетекшей в газовую полость).

В качестве расчетного метода при создании модели устройства выбран метод конечных элементов, а в качестве программного средства – комплекс ANSYS. Для расчетов использовали осесимметричную модель ГУ. Для силового элемента, выполненного из резины, использовали конечные элементы, для которых реализована функция плотности энергии деформации Муни-Ривлина, ПКМ считали нелинейно-упругим (без остаточных неупругих деформаций), поверхности поршня и цилиндра (контртела) определялись как абсолютно жесткие.

На каждом этапе расчетов, который характеризуется соответствующими значениями давлений разделяемых сред, решали задачу напряженнодеформированного состояния уплотнительного и силового элементов, получали распределение контактного давления по уплотняемой поверхности, выполняли расчет градиента контактного давления на уплотняемой поверхности. Последний фактор, как известно, определяет объем утечек, связанных с формированием жидкостной пленки, разделяющей поверхности уплотнительного элемента и контртела в условиях возвратно-поступательного движения. Заключение о возможности наступления параметрического отказа устройства в ходе эксплуатации производили на основании данных о его техническом состоянии. Верификацию расчетной модели производили на основании сравнения расчетных данных и данных, полученных в ходе стендовых испытаний устройства. Учет формоизменения уплотнительного элемента в процессе трения производили следующим образом: после определенного количества циклов (ходов) возвратнопоступательного движения цилиндра изменяли геометрические параметры уплотнительного элемента в соответствии с результатами расчетов линейного износа (рис. 2), полагая величину износа пропорциональной контактному давлению. Подобный подход использован в работе [4].

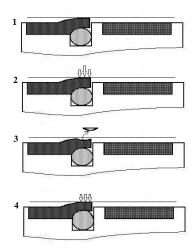


Рис. 2. Схема учета формоизменения уплотнительного элемента в процессе трения

Расчет утечек (перетечек жидкости в полость, заполненную газом) проводили как при возвратно-поступательном движении, так и в статическом состоянии цилиндра в процессе хранения при

эксплуатационных параметрах нагружения. Для обоснования выбора ПКМ использовались различные физико-механические и триботехнические характеристики материалов [1, 7]. При моделировании использовались материалы с различным сочетанием характеристик физико-механических и триботехнических свойств, в том числе материалы, разработанные под руководством профессора Ю.К. Машкова: Ф4УВ6Г8М2 (84% ПТФЭ, 6% углеродного волокна, 8% скрытокристаллического графита, 2% дисульфида молибдена) и Ф4Г10 (90% ПТФЭ, 10% скрытокристаллического графита, спекание в зажимах с ограничением теплового расширения [8]). Утечки в процессе возвратнопоступательного движения цилиндра относительно поршня рассчитывали по формуле [1]:

$$Q = 0.5 \cdot \pi DL (\Psi_2 \delta_2 - \Psi_1 \delta_1), \tag{1}$$

где D — внутренний диаметр цилиндра; L — длина двойного хода цилиндра; Ψ_1 и Ψ_2 — функции, учитывающие различия в режимах трения, а δ_1 и δ_2 — характерные зазоры при прямом и обратном ходе соответственно. δ_1 и δ_2 рассчитывали по формулам [1]:

$$\delta_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{\mu V_1}{p_1'}}, \quad \delta_2 = \alpha_2 \sqrt{\frac{\mu V_2}{p_2'}}, \quad (2)$$

где $p_1',\ p_2'$ - максимальные значения градиентов давления, а V_1 и V_2 - скорости движения цилиндра при прямом и обратном ходе соответственно; μ - динамическая вязкость жидкости; α_1 и α_2 - безразмерные коэффициенты.

Утечки в статическом состоянии рассчитывали по формуле [9]:

$$Q = \Psi_0 \frac{B}{L'} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} R_Z^3 \cdot e^{\frac{-3p_L}{kE}}, \tag{3}$$

где Q — утечки за 1 с; p_k — контактное давление на уплотняемой поверхности; Ψ_0 и k — коэффициенты, зависящие от качества обработки поверхности; B — периметр уплотнения; L' — ширина поверхности уплотнительного элемента, находящегося в контакте с контртелом; ΔP — перепад давлений; μ - динамическая вязкость; R_z — параметр шероховатости; E — модуль Юнга для материала уплотнительного элемента.

Результаты исследования. Проведенная верификация расчетной модели при использовании материала уплотнительного элемента Ф4УВ6Г8М2 показала приемлемые для оценочных расчетов результаты:

- расчетное значение объема перетечек жидкости в газовую полость превышает значение, полученное в ходе стендовых испытаний, в среднем на 50% в зависимости от выбора значения произведения коэффициентов Ψ_2 · α_2 из рассчитанного диапазона;

- расчетное значение массового износа уплотнительного элемента меньше значения, полученного в ходе стендовых испытаний, на 20%.

Проведенный с использованием расчетной анализ напряженно-деформированного состояния элементов устройства и влияния на него характеристик физико-механических свойств материалов показал следующее. В условиях начального деформирования и воздействия давлений разделяемых сред существенное значение для напряженно-деформированного состояния элементов устройства и параметров контактного взаимодействия имеет модуль Юнга ПКМ. В качестве примера на рис. 3 приведены распределения параметров контактного взаимодействия по уплотняемой поверхности для материала Ф4УВ6Г8М2 в статическом состоянии. В процессе перемещения цилиндра и увеличения давлений разделяемых сред для некоторых ПКМ возможно превышение возникающих в материале напряжений и (или) деформаций их предельных значений.

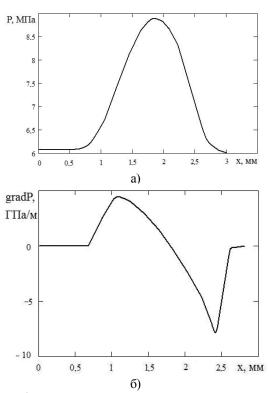


Рис. 3. Распределения параметров контактного взаимодействия по уплотняемой поверхности для материала Ф4УВ6Г8М2 в статическом состоянии: а – контактное давление, б – градиент контактного давления

Данный результат был получен в том числе, например, для таких материалов как Флубон-20 и НАМИ-ФБМ. Непригодность указанных материалов для изготовления уплотнительного элемента обусловлена низкими значениями предела прочности при растяжении (σ_p) и относительного удлинения при разрыве (ε_p), а также в ряде случаев относительно высоким значением коэффициента трения, что приводит к существенным сдвиговым деформациям в зоне контакта уплотнительного

элемента с цилиндром. Расчеты показывают, что в ходе деформирования уплотнительного элемента, выполненного из ПКМ, в нем возникают в зависимости от физико-механических свойств напряжения в среднем до 25-30 МПа и деформации около 0,25. Удельные утечки за 2000 циклов (V), соответствующий класс негерметичности (К1) в соответствии с классификацией [1], массовый износ уплотнительного элемента за 2000 циклов (т), удельные утечки в статическом состоянии (Q) и соответствующий класс негерметичности (К2), определенные по результатам расчетов для некоторых из исследованных материалов, приведены в табл. 1 (данные приводятся для значения вязкости рабочей жидкости, соответствующего температуре t = 20°C). Как следует из приведенных в табл. 1 данных, при работе рассматриваемого уплотнения как уплотнения неподвижного соединения (статическое состояние цилиндра) наименьшие утечки Q возникают при использовании материала Ф4Г10, однако данный материал характеризуется наибольшей интенсивностью изнашивания и, как следствие, значительным массовым износом.

Таблица 1. Параметры, характеризующие износ и класс негерметичности устройства

Материал	$\frac{V}{cm^3/m^2}$	К1	т, мг	Q·10 ⁻⁴ , mm ³ /(m·c)	К2
Криолон-5	0,12	2-2	3,7	1,42	1-1
Ф4УВ6Г8М2	0,21	3-1	7,1	1,31	1-1
Φ4Γ10	0,16	2-2	19,5	1,28	1-1

За расчетное количество циклов удельные утечки V принимают наименьшее значение при использовании материала Криолон-5, однако относительно большое значение модуля Юнга данного материала приводит к наибольшим из рассматриваемых материалов утечкам в статическом состоянии. Тем не менее, достаточно высокая степень герметичности в статическом состоянии позволяет рекомендовать именно этот материал для изготовления уплотнительного элемента. Наработка до перехода в следующий класс негерметичности (из класса 2-2 в класс 3-1), сопровождающегося незначительным изменением удельной утечки, для Ф4УВ6Г8М2 составила примерно 800 циклов. Для материалов Криолон-5 и Ф4Г10 класс негерметичности 2-2 сохраняется в течение 2000 циклов. Следует отметить, что ни для одного из рассмотренных материалов не было превышено значение критического расхода герметизируемой среды.

Выводы. Использование методики выбора материала, основывающейся на прогнозировании параметров напряженно-деформированного состояния, контактного взаимодействия и степени герметичности, определяемых с учетом формоизменения элементов герметизирующих устройств в процессе трения, позволило выбрать материал, рекомендуемый к применению в конструкции ГУ. Созданные конечно-элементные модели открыты для изменений и позволяют проводить анализ работы рассмотренных типов герметизирующих устройств.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-08-98022-р_сибирь_а

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Кондаков, Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
- 2. *Ереско, С.П.* Математическое моделирование, автоматизация проектирования и конструирование уплотнений подвижных соединений механических систем. М.: Изд-во ИАП РАН, 2003. 155 с.
- Анцупов, А.В. Методология вероятностного прогнозирования безотказности и ресурса трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.С. Губин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, №4(3). С. 19-22.
- Weber, D. Wear behaviour of PTFE lip seals with different sealing edge designs, experiments and simulation / D. Weber, W. Haas // Sealing Technology. February 2007. P. 7-12.
- Sui, H. Wear and friction of PTFE seals / H. Sui, H. Pohl, U. Schomburg et al. // Wear. 1999. № 224. P. 175-182.
- Кропотин, О.В. Разработка элементов герметизирующих устройств трибосистем и анализ их напряженно-деформированного состояния с использованием метода конечных элементов / О.В. Кропотин, Ю.К. Машков, В.П. Пивоваров // Трение и износ. 2004. Т. 25, № 5. С. 461-465.
- 7. *Машков, Ю.К.* Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / *Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, В.И. Суриков, Л.Ф. Калистратова.* М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
- Машков, Ю.К. Структурная модификация политетрафторэтилена скрытокристаллическим графитом / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, В.И. Суриков и др. // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, №6. С. 109-114.
- Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1982. 216 с.

METHODOLOGY OF FORECASTING THE RELIABILITY AND RESOURCE OF DYNAMIC SEALS TAKING INTO ACCOUNT THE ELEMENTS FORMING IN PROCESS OF FRICTIONAL INTERACTION

© 2012 O.V. Kropotin Omsk State Technical University

Basic points of methodology of forecasting the reliability and resource of dynamic seals and methodology application on the example of combined seal are considered.

Key words: reliability, resource, seal, friction, wear, forming

Oleg Kropotin, Candidate of Technical Sciences, professor at the Physics Department. E-mail: kropotin@mail.ru