

УДК 621.22-762 +531.43

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© 2013 О.В. Кропотин

Омский государственный технический университет

Поступила в редакцию 28.03.2013

Рассматривается процедура оптимизации конструктивных параметров герметизирующего устройства в соединении, передающем вращательное движение.

Ключевые слова: *оптимизация, герметизирующее устройство, формоизмерение*

Разработка герметизирующих устройств (ГУ) различных типов связана с анализом параметров напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и параметров контактного взаимодействия «уплотняющий элемент – уплотняемая поверхность». Значения указанных параметров непосредственно влияют на работоспособность и срок службы ГУ, поэтому адекватная оценка данных параметров на этапе проектирования изделия и оптимизация конструкции по критериям обеспечения требуемой степени герметичности определяют надежность и ресурс машин, в которых применяются герметизирующие устройства [1-4]. Обеспечение длительной работоспособности металлополимерных ГУ возможно путем формирования уровня контактного давления на уплотняемой поверхности, необходимого для заданной степени негерметичности, а также уровня напряжений в объеме элементов ГУ, не превышающего предел прочности материалов, используемых для изготовления элементов ГУ. При выборе конструктивных параметров конструкции ГУ подвижных соединений на этапе проектирования необходимо учитывать изменение герметичности, формы и напряженно-деформированного состояния элементов устройства в процессе эксплуатации. Указанные принципы использованы в работе при проектировании конструкции радиального уплотнения (ГУ) с вращательным движением уплотняемой поверхности, которое защищает полость с рабочей жидкостью от попадания пыли, грязи и воды из окружающей среды.

Объект и методика исследования. В качестве прототипа для разрабатываемой конструкции ГУ выбрана конструкция, примененная в

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

объекте, принадлежащем классу многоцелевых гусеничных и колесных машин [5, 6], и модернизированная по критерию равномерности распределения контактного давления по уплотняемой поверхности [2, 7]. В данной работе рассматривается конструкция ГУ (рис. 1), в которой конструктивные параметры изменены относительно прототипа: обеспечивается опирание силового элемента в радиальном направлении (эпюра P_C на рис. 1) только на поверхность уплотняющего элемента и исключено частичное опирание на поверхность корпуса ГУ.

При разработке конструкции ГУ исследовалось пространство параметров, набор пробных точек для которого был сформирован с применением ЛП_τ-последовательностей [8, 9]. Метод оптимизации, основанный на применении таких последовательностей, может применяться к исследованию кусочно-непрерывных в пространстве параметров функций. В качестве варьируемых были выбраны параметры $a_1 - a_6$ (указаны на рис. 1), определяющие эпюру распределения контактных напряжений по уплотняемой поверхности в зоне контакта и уровень внутренних напряжений в силовом и уплотняющем элементах. В качестве параметра a_2 использовался тангенс угла, задающего коническую форму контактной площадки 4 (рис. 1). Знак параметра a_2 задавали в соответствии с рис. 2. Допустимые пределы варьирования параметров (параметрические ограничения): $0,14 \text{ мм} < a_1 < 0,6 \text{ мм}$, $-0,08 < a_2 < +0,08$, $0,6 \text{ мм} < a_3 < 1,6 \text{ мм}$, $0,6 \text{ мм} < a_4 < 1,6 \text{ мм}$, $2,0 \text{ мм} < a_5 < 5,0 \text{ мм}$, $1,2 \text{ мм} < a_6 < 2,4 \text{ мм}$.

Выбранные критерии качества, по которым осуществлялся выбор конструктивных параметров на этапе начального деформирования и начального этапа эксплуатации:

- Δm – массовый износ уплотняющего элемента;

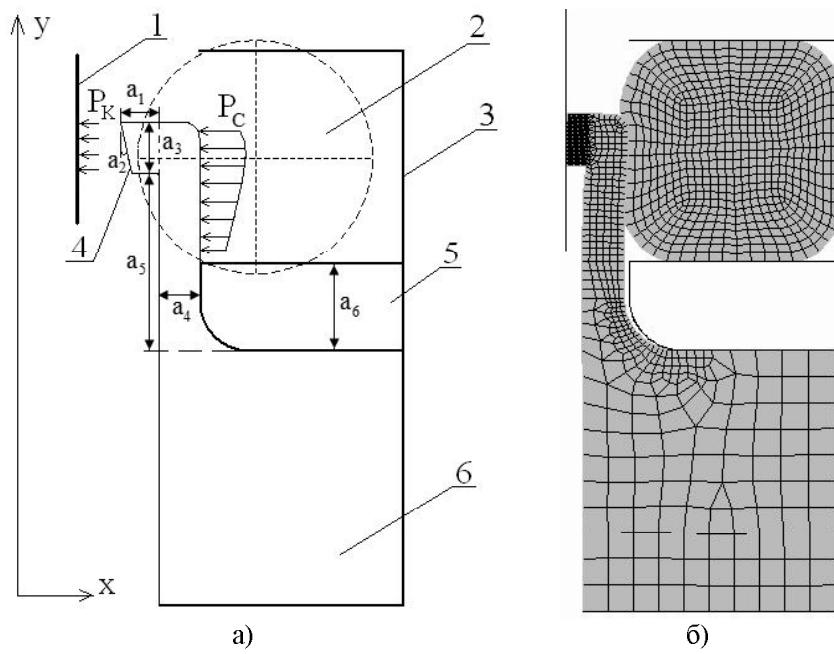


Рис. 1. Фрагмент геометрической модели ГУ:

а) геометрическая модель, б) сетка конечных элементов после нагружения:

1 – уплотняемая поверхность, 2 – силовой элемент (резиновое кольцо), 3 – внутренняя поверхность корпуса герметизирующего устройства, 4 – поверхность контактной площадки, 5 – регулировочное кольцо, 6 – уплотняющий элемент; P_K – давление на контактной поверхности, создаваемое уплотняющим элементом, P_C – давление на поверхности уплотняющего элемента, создаваемое силовым элементом; a_1 – a_6 – варьируемые параметры (a_2 – тангенс угла, задающего коническую форму контактной площадки 4)

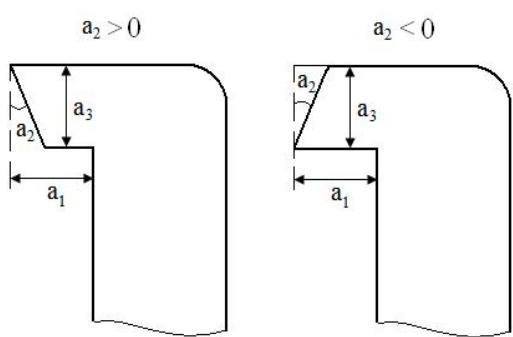


Рис. 2. Схема определения знака параметра a_2 (тангенс угла, задающего коническую форму контактной площадки)

- P_{min}/P_{max} – отношение минимального и максимального значения контактного давления на уплотняемой поверхности;

- $PL = \int P dl$ – интеграл по уплотняемой по-

верхности от контактного давления на участках уплотняемой поверхности, на которых значение контактного давления превышает минимальное (по условиям герметизации);

- $\Delta l/a_3$ – отношение суммарной длины участков уплотняемой поверхности, на которых значение контактного давления превышает минимальное, к длине уплотняемой поверхности.

Последние три критерия из перечисленных характеризуют уровень и эпюру распределения контактного давления по уплотняемой поверхности и определяют герметизирующие свойства уплотнения, которые тем выше, чем больше значения указанных критериев. Следует отметить, что высокий уровень контактных напряжений и, соответственно, высокие значения критерия PL приводят к большому износу уплотняющего элемента и снижению герметизирующих свойств устройства в процессе эксплуатации.

Критериальные ограничения выбраны с учетом устоявшихся представлений о механизмах герметизации [1, 10] и имеющихся экспериментальных данных, в том числе по конструкции-прототипу [1, 2, 4-6, 10]: $\Delta m < 30$ мг (для назначенного времени эксплуатации 390 часов); $P_{min}/P_{max} \geq 0,7$; $PL \geq 4 \cdot 10^3$ Па·м; $\Delta l/a_3 = 1$. В процессе моделирования контролировались значения главных σ_1 и эквивалентных σ_e (по Мизесу) напряжений в силовом и уплотняющем элементах, а также визуально по конечно-элементной сетке контролировались степень деформации в процессе формоизменения уплотняющего элемента и степень скручивания силового элемента.

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. В качестве

материала для изготовления уплотняющего элемента был выбран полимерный композиционный материал (ПКМ), разработанный под руководством профессора Ю.К. Машкова, на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) следующего состава: 84% ПТФЭ, 6% углеродного волокна, 8% скрытокристаллического графита, 2% дисульфида молибдена. Полимерный композиционный материал считали нелинейно-упругим (без остаточных неупругих деформаций). Для силового элемента, выполненного из резины, использовали конечные элементы, для которых реализована функция плотности энергии деформации Муни-Ривлина. Поверхности корпуса герметизирующего устройства, регулировочного кольца и уплотняемой поверхности определялись как абсолютно жесткие.

На каждом этапе расчетов, который характеризуется соответствующим значением пути трения (интервала времени эксплуатации), решали задачу напряженно-деформированного состояния уплотняющего и силового элементов, получали распределение контактного давления по уплотняемой поверхности, выполняли расчет массового износа и параметров формоизменения уплотняющего элемента. Учет формоизменения и массового износа в процессе фрикционного взаимодействия проводили по схеме, приведенной в [11, 4]: после определенного количества циклов вращательного движения (интервала времени эксплуатации) уплотняемой поверхности вала изменяли геометрические параметры уплотняющего элемента в соответствии с результатами расчетов линейного износа, полагая величину износа пропорциональной контактному давлению и интенсивности изнашивания на единицу контактного давления I ($1/\text{Па}$). В соответствии с результатами стендовых испытаний, приведенных в работе [5], интенсивность изнашивания изменяли от значения $I_1 = 0,49 \cdot 10^{-17} 1/\text{Па}$ (процесс приработки) до $I_2 = 0,22 \cdot 10^{-17} 1/\text{Па}$ (стационарный режим трения) по достижении массового износа $\Delta m = 5 \text{ мг}$.

Результаты исследования. В соответствии с выбранным алгоритмом были определены пробные точки (16 точек) в пространстве параметров и составлена таблица испытаний. В результате проведенного имитационного моделирования на разработанной конечно-элементной модели определено следующее:

1) критерии PL , P_{\min}/P_{\max} и $\Delta l/a_3$ на этапе начального деформирования принимают значения, лежащие в следующих диапазонах: $1,0 \cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{м} \leq PL \leq 11,5 \cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{м}$; $0 \leq P_{\min}/P_{\max} \leq 0,76$; $0,09 \leq \Delta l/a_3 \leq 1$;

2) критерий Δm на начальном этапе эксплуатации (время фрикционного взаимодействия

равно 1,7 часа) принимает значения, лежащие в диапазоне: $3,1 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \leq \Delta m \leq 40,4 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$;

3) на этапе начального деформирования для всех пробных точек $4,4 \text{ МПа} \leq \sigma_1 \leq 24,4 \text{ МПа}$ (условный предел прочности при растяжении для выбранного материала составляет 25 МПа), $4,4 \text{ МПа} \leq \sigma_e \leq 24,4 \text{ МПа}$;

4) в ряде случаев (7 точек) наблюдается высокая степень деформации в процессе формоизменения уплотняющего элемента и (или) высокая степень скручивания силового элемента.

Критериальному ограничению $PL \geq 4 \cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{м}$ удовлетворяет 10 из 16-ти точек; критериальному ограничению $\Delta l/a_3=1$ удовлетворяет 5 точек. Критериальному ограничению $P_{\min}/P_{\max} \geq 0,7$ удовлетворяет одна точка, которая одновременно удовлетворяет всем критериальным ограничениям, определяемым на этапе начального деформирования. Для данной точки: $PL=6,2 \cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{м}$, $\Delta l/a_3=1$, $P_{\min}/P_{\max}=0,76$. Значения напряжений для этой точки равны: $\sigma_1 = 4,8 \text{ МПа}$ $\sigma_e = 8,1 \text{ МПа}$, деформации в процессе формоизменения уплотняющего элемента и степень скручивания силового элемента незначительны. Данная точка была признана оптимальной по результатам первой итерации оптимизационной процедуры. Для указанной точки значения параметров равны: $a_1 = 0,284 \text{ мм}$, $a_2 = +0,05$, $a_3 = 1,538 \text{ мм}$, $a_4 = 1,163 \text{ мм}$, $a_5 = 3,313 \text{ мм}$, $a_6 = 2,175 \text{ мм}$. Поскольку значения параметров a_3 и a_7 для оптимальной точки близки к максимальным значениям этих параметров в соответствующих диапазонах варьирования параметров, было проведено исследование трех дополнительных точек, для которых значения указанных параметров выбирались (поочередно и совместно) равными $a_{3\max}$ и $a_{7\max}$ соответственно. Во всех случаях значения критериев остались прежними или ухудшились.

Для проведения локального поиска (второй итерационной процедуры) вблизи оптимальной точки был сгенерирован набор из 8 точек, для которых были выбраны следующие диапазоны варьируемых параметров: $0,234 \text{ мм} < a_1 < 0,324 \text{ мм}$, $+0,045 < a_2 < +0,055$, $1,488 \text{ мм} < a_3 < 1,588 \text{ мм}$, $1,113 \text{ мм} < a_4 < 1,213 \text{ мм}$, $3,263 \text{ мм} < a_5 < 3,363 \text{ мм}$, $2,125 \text{ мм} < a_6 < 2,225 \text{ мм}$. Для выбранных точек значения критериев в большинстве случаев остались неизменными или незначительно ухудшились. Исключение составили 2 точки, для которых $P_{\min}/P_{\max} = 0,34$.

Таким образом, точка, выбранная после первой итерационной процедуры, признана оптимальной и для нее проведено имитационное моделирование в соответствии с методикой, описанной выше. Время фрикционного взаимодействия, принятое при моделировании, равно 390 часов, что соответствует пути трения 2800 км, а эквивалентное значение пробега машины

превышает заданный ресурс в 1,4 раза. Шаг, с которым проводили расчеты на имитационной модели и изменяли профиль уплотняющего элемента в зоне контакта, варьировался от 4 до 60 часов. Некоторые результаты, полученные в ходе имитационного моделирования, представлены на рис. 3-5. Для сравнения на рис. 3 приведена зависимость $\Delta m(t)$ не только для оптимальной конструкции, но и для конструкции с высоким значением критерия $PL=8,2 \cdot 10^3$ Па·м и низким значением критерия $P_{min}/P_{max}=0,04$.

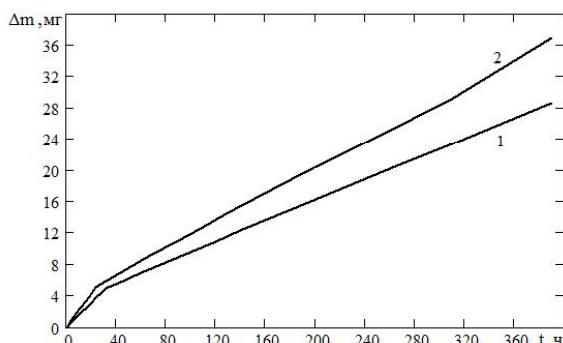


Рис. 3. Зависимость массового износа уплотняющего элемента от времени фрикционного взаимодействия: 1 – оптимальная конструкция; 2 – конструкция со значениями критериев $PL=8,2 \cdot 10^3$ Па·м, $P_{min}/P_{max}=0,04$

Как следует из полученных в ходе имитационного моделирования данных, для оптимальной точки наблюдается закономерное (вследствие массового износа и формоизменения на контактной поверхности) снижение значения контактных давлений, что отражается в снижении значений критериев PL до $5,6 \cdot 10^3$ Па·м и P_{min}/P_{max} до 0,67. Эпюра распределения контактного давления на уплотняемой поверхности (рис. 4) в целом сохраняет свой вид, так же как и профиль контактной поверхности уплотняющего элемента (рис. 5).

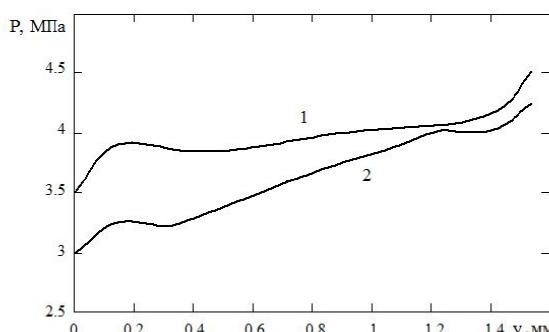


Рис. 4. Зависимость контактного давления на уплотняемой поверхности от осевой координаты у для оптимальной конструкции: 1 – на этапе начального деформирования; 2 – через 390 часов эксплуатации (фрикционного взаимодействия)

Значения напряжений закономерно уменьшились и равны: $\sigma_1=5,7$ МПа $\sigma_e=6,3$ МПа, деформации в процессе формоизменения уплотняющего элемента и степень скручивания силового элемента незначительны. Массовый износ в отличие от конструкции со значениями критериев $PL=8,2 \cdot 10^3$ Па·м и $P_{min}/P_{max}=0,04$ соответствует критериальному ограничению.

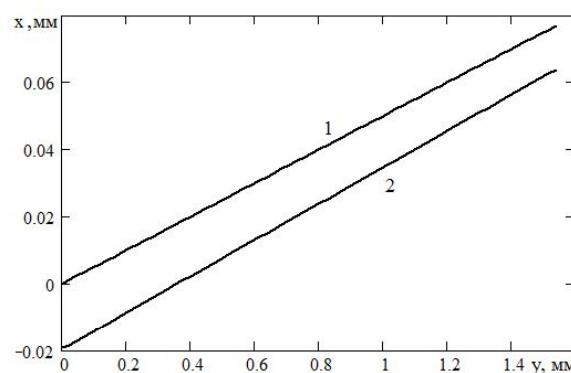


Рис. 5. Зависимость радиальной координаты x от осевой координаты y (профиль контактной поверхности уплотняющего элемента) для оптимальной конструкции: 1 – в начале эксплуатации; 2 – через 390 часов эксплуатации (фрикционного взаимодействия)

Выводы: использование методики оптимизации конструкции ГУ с применением метода имитационного моделирования, учетом формоизменения уплотняющего элемента в процессе трения, а также с применением критериев оптимизации, характеризующих контактное взаимодействие, позволило осуществить разработку конструкции герметизирующего устройства, обеспечивающего увеличение назначенного ресурса в 1,4 раза. Представленная методика оптимизации конструкционных параметров ГУ может быть использована при разработке аналогичных устройств (уплотнений).

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

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. Мамаев, О.А. Разработка и анализ напряженно-деформированного состояния элементов герметизирующих устройств с использованием метода конечных элементов / О.А. Мамаев, О.В. Кропотин, А.А. Байбарацкий // Омский научный вестник. 2010. № 3(93). С. 31-35.
3. Кропотин, О.В. Разработка элементов герметизирующих устройств трибосистем и анализ их напряженно-деформированного состояния с использованием метода конечных элементов / О.В. Кропотин, Ю.К. Мацков, В.П. Пивоваров // Трение и износ. 2004. Т. 25, № 5. С. 461-465.

4. Кропотин, О.В. Методика прогнозирования надежности и ресурса подвижных герметизирующих устройств с учетом формоизменения элементов в процессе трения // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14, № 4(5). С. 1253-1256.
5. Мамаев, О.А. Повышение надежности герметизирующих устройств ходовой части многоцелевых гусеничных и колесных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04, 05.02.01 / Мамаев Олег Алексеевич. – Омск, 2000. 137 с.
6. Машков, Ю.К. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 262 с.
7. Патент 2440527 Российской Федерации, МПК F16J 15/00. Герметизирующее устройство / Машков Ю.К., Мамаев О.А., Кропотин О.В., Байбарацкая А.А.; заявитель и патентообладатель СибАДИ. № 2010119762/06; заявл. 17.05.2010; опубл. 20.01.12, Бюл. № 2.
8. Соболь, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников. – М.: Наука, 1981. 110 с.
9. Statnikov, R. A. The Parameter Space Investigation Method Toolkit / R. Statnikov, A. Statnikov. – Artech House, Inc. 2011. 214 p.
10. Кондаков, Л.А. Уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1972. 240 с.
11. 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.

DEVELOPMENT THE CONSTRUCTION OF SEAL HERMETICALLY DEVICE WITH OPTIMIZATION THE CONTACT INTERACTION PARAMETERS

© 2013 O.V. Kropotin

Omsk State Technical University

Procedure of optimization of constructive parameters of seal hermetically device in the connection, transferring a rotary motion, is considered.

Key words: *optimization, seal hermetically device, forming*