

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТА МАССИВНОГО СЕПАРАТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ ДЛА И АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЕГО РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

© 2014 Б.М. Силаев, П.А. Даниленко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 07.04.2014

Рассмотрены условия применения и работы высокоскоростных подшипников качения, применяемых в двигателях летательных аппаратов (ДЛА). В качестве объекта аналитического анализа принята одна из самых сложных в расчётном плане широко применяемая конструкция массивного сепаратора, выполняемая из полимерного материала и усиленная присоединением боковых металлических шайб, связанных заклёпками. К рассмотрению приняты также наиболее сложные условия работы высокоскоростных подшипников качения и их сепараторов, а именно, функционирование со смазкой и охлаждением криогенными жидкостями. Установлены и систематизированы все факторы, воздействующие на массивный сепаратор при работе в указанных условиях и результаты их влияние на его работоспособность. На основе всестороннего анализа обозначенных условий работы высокоскоростных подшипников качения ДЛА разработана и представлена структурно-функциональная схема сепаратора, отражающая всю систему воздействующих на него факторов. Установлены расчётные зависимости, позволяющие определять как внешние силы, воздействующие на сепаратор при работе, так и усилия взаимодействия между его конструктивными элементами, выполняемыми из разнородных материалов, обладающих различными физико-механическими характеристиками. Показано, что наиболее нагруженным элементом сепаратора являются заклёпки. Разработана методика и алгоритм решения поставленной задачи, которые позволяют оценить как деформационное, так и напряжённое состояние элементов конструкции сепаратора, а предлагаемый системный подход обеспечивает обоснованный выбор параметров сепаратора как одного из важнейших элементов конструкции высокоскоростного подшипника качения ДЛА, обуславливающего его работоспособность. Ключевые слова: высокоскоростной подшипник качения, массивный сепаратор, заклёпка, перемычка, структурно-функциональная схема, воздействующие факторы, алгоритм расчёта.

### ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью работы и конструкции подшипниковых узлов современных двигателей летательных аппаратов (ДЛА) являются высокие частоты вращения подшипников, сложное комбинированное их нагружение, зачастую экстремальные температуры - от повышенных плюсовых, до глубоких низких, при этом охлаждение и смазывание подшипников производятся маловязкими рабочими средами, что создает условия их функционирования при резко выраженном граничном трении или даже трении в контакте без смазки [1]. Таким образом можно видеть, что подшипники качения являются одним из важнейших элементов конструкции, существенно определяющих надежность и ресурс работы современных двигателей летательных аппаратов. Что же касается конструкции самих подшипников качения, особенно высокоскоростных,

то одним из элементов, определяющих их надежную и долговечную работу, является сепаратор. Сепараторы современных высокоскоростных подшипников качения ДЛА обычно выполняют массивными из таких материалов как антифрикционные бронзы, латуни, алюминиевые сплавы и пластмассы - текстолит, полиамид, фторопласт-4 и их композиции с наполнителями [1 - 3].

В научно-технической литературе можно найти достаточно большое количество рекомендаций по выбору подшипников качения с соответствующими массивными сепараторами для работы в экстремальных условиях. Однако, расчетных методик массивных сепараторов, которые бы отражали всю специфику их работы и учитывали бы всю систему рассматриваемых воздействующих факторов, авторам найти не удалось.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сложность выбора рационального решения конструкции, размеров и материала сепаратора высокоскоростного подшипника качения предопределяет необходимость комплексного системного подхода к проблеме обеспечения работоспо-

*Силаев Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры основ конструирования машин. E-mail: okm@ssau.ru*

*Даниленко Павел Александрович, аспирант кафедры основ конструирования машин. E-mail: p.a.danilenko@list.ru*

способности как самого сепаратора, так и опоры качения ДЛА в целом, функционирующей в среде рабочей жидкости. Конкретную реализацию системного подхода к решению проблемы рассмотрим при анализе всех воздействующих на массивный сепаратор факторов и результатов их влияния на его работоспособность. В качестве объекта аналитического анализа примем широко применяемую и одну из самых сложных в расчетном плане конструкцию массивного сепаратора подшипника качения, выполняемую из полимерного материала и усиленную присоединением боковых металлических шайб, связанных заклепками (рис.1). Наиболее широко используемым полимерным материалом сепаратора, например для криогенных сред, обычно является фторопласт-4 или его композиции с наполнителями [2, 3].

Задача исследования состоит в том, чтобы определить всю систему внешних воздействующих на сепаратор нагрузок, возникающих при его работе; оценить силы взаимодействия между элементами его конструкции и рассчитать деформацию и прочность его звеньев.

#### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Как известно, наиболее сложными условиями работы высокоскоростных подшипников качения и их сепараторов являются условия функционирования со смазкой и охлаждением криогенными жидкостями, обуславливающими дополнительное нагружение сепаратора за счет

глубокого перепада температур. На основе всестороннего анализа обозначенных условий работы высокоскоростных подшипников качения ДЛА разработана и представлена на рис. 1 структурно-функциональная схема сепаратора, отражающая всю систему воздействующих на него факторов.

При работе в среде криогенных топливных компонентов на сепаратор подшипника действует следующая система усилий:

- центробежная сила инерции, вызываемая вращением ротора узла с частотой вращения  $n$ ;
- термическая сила от перепада температур  $\Delta T$ , связанная с различием коэффициентов линейного расширения полимера и металла;
- сила от перепада давления  $\Delta p$  на сепараторе в результате прокачки смазочно-охлаждающей среды через него;
- комплексная сила сопротивления вращению сепаратора, как диска в жидкостной среде и от надавливания тел качения на перемычки сепаратора.

Поскольку сепаратор представляет собой сложную конструкцию из разнородных материалов (см. рис. 1), при захолаживании в криогенной среде имеет место разнонаправленная деформация его элементов. При совместном деформировании металлические шайбы 2 сжимаются усилиями взаимодействия  $F_B$ , а полимерное кольцо 1 растягивается ими. Схема взаимодействия этих элементов конструкции сепаратора показаны на рис. 2.

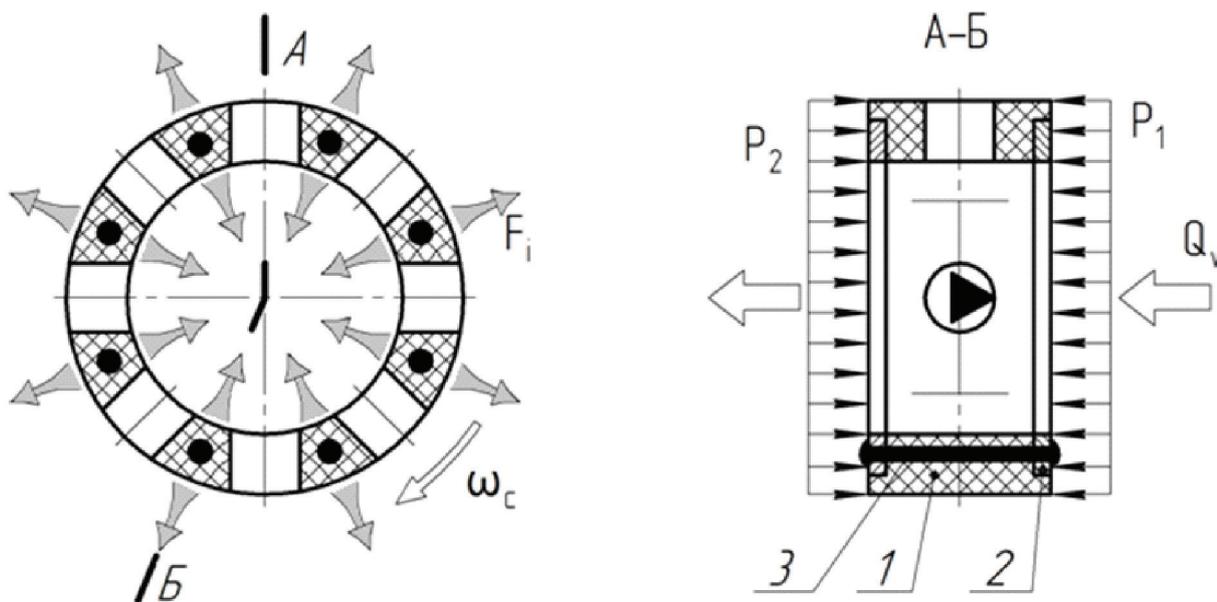


Рис. 1. Структурно-функциональная схема сепаратора высокоскоростного подшипника качения ДЛА:

1 – полимерное кольцо; 2 – боковые металлические шайбы;

3 – заклепки;  $\omega_c = f(n)$  – угловая скорость вращения сепаратора;

$Q_v = f(n, F_i)$  – прокачка рабочей среды;  $F_i = f(n, \Delta P, \Delta T, \dots)$  – воздействующие силы различной природы

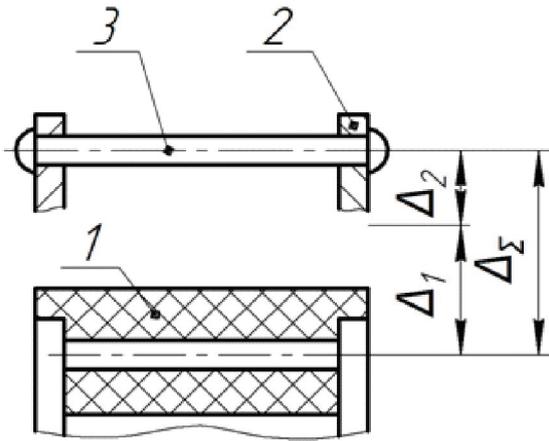


Рис. 2. Схема перемещений элементов конструкции сепаратора при захолаживании

Для определения усилия взаимодействия  $F_B$  между полимерным кольцом 1 и металлическими шайбами 2 воспользуемся условием совместности их деформаций

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta_3. \quad (1)$$

Деформации  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  выразим через закон Гука и усилие взаимодействия  $F_B$  в виде

$$\Delta_1 = \frac{F_B d_m^2}{4E_1 A_1}, \quad \Delta_2 = \frac{F_B d_m^2}{4E_2 A_2}, \quad (2)$$

где  $d_m$  – средний диаметр сепаратора,  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости полимера и металла,  $A_1$  и  $A_2$  – площади поперечного сечения полимерного кольца и шайб, соответственно.

Из решения уравнения совместности деформаций (1) с учетом соотношений (2) получаем зависимость для определения усилия взаимодействия  $F_B$

$$F_B = \frac{4\Delta_\Sigma E_1 A_1 E_2 A_2}{d_m^2 (E_1 A_1 + E_2 A_2)}. \quad (3)$$

По известному усилию взаимодействия (3) с учетом зависимостей (2) выразим перемещения полимерного кольца 1 и шайб 2 (см. рис. 2)

$$\Delta_1 = \frac{\Delta_\Sigma E_2 A_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2}, \quad \Delta_2 = \frac{\Delta_\Sigma E_1 A_1}{E_1 A_1 + E_2 A_2}.$$

Для определения перемещения  $\Delta_y$  рассмотрим перемещения полимерного кольца и металлических шайб от действия центробежных сил инерции и термической силы.

Радиальное перемещение полимерного кольца от действия центробежных сил инерции

$$\delta_{1\omega} = \frac{\gamma_1 \omega_c^2 d_m^3}{16gE_1},$$

где  $\omega_c = \frac{\pi n}{60} \left(1 - \frac{D_w \cos \alpha}{d_m}\right)$  – угловая скорость вращения сепаратора,  $n$  – заданная частота вращения вала,  $D_w$  и  $d_m$  – диаметр тела качения и средний диаметр сепаратора,  $\alpha$  – угол контакта,  $\gamma$  – удельный вес полимера,  $g$  – ускорение свободного падения.

Радиальное перемещение металлических шайб 2 от действия собственных центробежных сил инерции и центробежных сил заклепок 3 (см. рис. 1)

$$\delta_{2\omega} = \frac{\gamma_2 \omega_c^2 d_m^2}{16gE_2}, \quad \delta'_{2\omega} = \frac{F_3 d_m^2}{4E_2 A_2};$$

здесь  $F_3 = \frac{F_{c3} z}{\pi d_m}$  – сила на единицу длины,

$F_{c3} = \frac{\gamma_2 \omega_c^2}{2g} V_3 d_m$  – центробежная сила одной заклепки;  $z$  – количество заклепок;  $V_3$  – объем одной заклепки;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – удельный вес материала шайбы и заклепки, соответственно;  $A_2$  – площадь поперечного сечения двух шайб.

Далее найдем радиальные перемещения полимерного кольца 1 и металлических шайб 2 от действия термических сил. Температурные перемещения на радиус полимерного кольца  $\delta_{1t}$  и металлических шайб  $\delta_{2t}$  будут составлять величины

$$\delta_{1t} = \frac{1}{2} d_m \alpha_{1cp} (T_1 - T_2);$$

$$\delta_{2t} = \frac{1}{2} d_m \alpha_{2cp} (T_1 - T_2).$$

Здесь  $\alpha_{1cp}$  и  $\alpha_{2cp}$  – средние коэффициенты линейного расширения соответственно для полимера и металла при изменении температуры от  $T_1 = 20^\circ$  (температура окружающей среды) до рабочей температуры  $T_2$ .

Суммарные перемещения полимерного кольца и металлических шайб сепаратора при раздельном деформировании определяются как суммы перемещений от действий термической и центробежных сил, т.е.

- для полимерного кольца

$$\delta_{1\Sigma} = -\delta_{1t} + \delta_{1\omega};$$

- для металлических шайб

$$\delta_{2\Sigma} = -\delta_{2t} + \delta_{2\omega} + \delta'_{2\omega}.$$

Разность суммарных перемещений полимера и шайб в первом приближении можно принять за искомую величину  $\Delta_\Sigma$ , т.е.

$$\Delta_\Sigma = \delta_{1\Sigma} - \delta_{2\Sigma}.$$

Полное перемещение на радиус каждого элемента конструкции сепаратора будет составлять:

- для полимерного кольца

$$\Delta_{1\Sigma} = \delta_{1\Sigma} + \Delta_1,$$

- для металлических шайб

$$\Delta_{2\Sigma} = \delta_{2\Sigma} + \Delta_1.$$

Рассмотренная неравномерность деформирования элементов конструкции сепаратора вызывает в них неравномерность напряженного состояния. Оценку уровня напряжений произведем с учетом найденной ранее по зависимости (3) силы взаимодействия  $F_B$ :

- напряжения растяжения в полимерном кольце

$$\sigma_{1p} = F_s d_m / (2A_1);$$

- напряжения сжатия в металлических шайбах

$$\sigma_{2p} = F_s d_m / (2A_2);$$

Напряженное состояние заклепок поперечных перемычек полимера оценим, учитывая, что в результате силового взаимодействия металлических шайб и полимерного кольца при захлаживании, перемычки изгибаются. Кроме того, составная перемычка будет воспринимать воздействие сил трения  $F_f$ , возникающих при вращении сепаратора как диска в жидкостной среде [4]. Таким образом, на поперечную перемычку будет действовать суммарное усилие, состоящее из нагрузок от воздействий силы  $F_B$  и силы  $F_f$ , т.е.

$$F_n = \sqrt{F_n' + F_f}, \text{ где } F_n' = F_B \pi d_m / z.$$

Изгибаемую перемычку будем рассматривать как составную балку, состоящую из заклепки и полимерного участка. Изгиб этой составной балки оценим с учетом схемы, приведенной на рис. 3.

Условия опирания выбраны в связи с тем, что изгибная жесткость составной балки более, чем на порядок выше жесткости шайб.

Полагая, что при совместной изгибной деформации заклепки и полимерной перемычки их жесткости суммируются, а нагрузка, приходящаяся на каждый из этих элементов, пропорциональна их жесткостям, можем записать:

- нагрузка на полимерную перемычку

$$F_{1п} = F_n \frac{E_1 J_1}{E_1 J_1 + E_2 J_2};$$

- нагрузка на заклепку

$$F_{3п} = F_n \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1 + E_2 J_2};$$

здесь  $F_n$  – нагрузка на каждую составную перемычку;  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции поперечных сечений полимерной перемычки и заклепки, соответственно.

Рассматривая перемычку как балку, защемленную с двух сторон, и предполагая, что усилия вдоль балки распределены равномерно, решаем

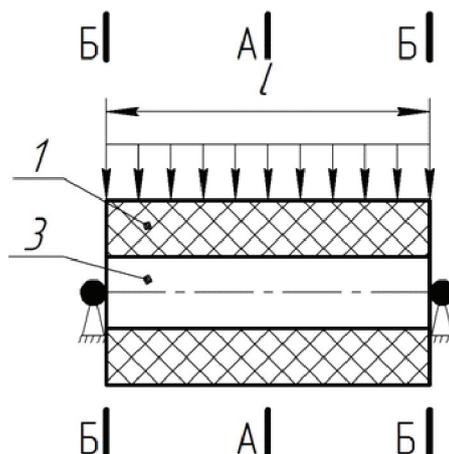


Рис. 3. Схема нагружения поперечной перемычки сепаратора: 1 – полимерная перемычка, 3 – заклепка

её как статически неопределимую систему. Изгибающий момент для такой балки в середине пролета согласно [5] будет равен

$$M_{imax} = F_{is} l / 8,$$

где  $l$  – длина пролета, индекс  $i=1$  или 3 (см. рис. 3).

С учетом этого напряжения в элементах составной балки определяются по соотношению

$$\sigma_{iu} = M_{imax} / W_i,$$

здесь  $W_i$  – момент сопротивления.

Совместно с изгибом в заклепке 3 в сечениях у головок Б-Б (см. рис. 3) возникают напряжения среза

$$\tau_{cp} = F_n / A_3,$$

где  $A_3$  – площадь поперечного сечения заклепки.

Кроме этих напряжений при работе на заклепку действуют усилия растяжения от перепада давления  $\Delta_p$  прокачиваемой через подшипник смазочно-охлаждающей среды (см. рис. 1). Предполагая, что всё осевое усилие  $F_{\Delta p}$  от перепада давления  $\Delta_p$  на сепаратор передается через все заклепки равномерно, напряжения растяжения в каждой из них будут равны

$$\sigma_{3p} = F_{\Delta p} / (z A_3).$$

Оценивая комплексное воздействие на сепаратор системы рассмотренных сил, можно констатировать, что наиболее напряженным элементом конструкции являются заклепки, которые находятся в сложном напряженном состоянии. Так, в сечении А-А заклепки (см. рис. 3) при работе сепаратора возникают напряжения изгиба  $\sigma_{3u}$  и растяжения  $\sigma_{3p}$ , суммарные (расчетные) напряжения будут составлять величину

$$\sigma_{3\Sigma} = \sigma_{3u} + \sigma_{3p}.$$

В сечении Б-Б одновременно действуют напряжения растяжения  $\sigma_{3p}$  и среза  $\tau_{cp}$ . Приве-

денные напряжения по теории максимальной энергии формоизменения определяются как

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_{3p}^2 + 3\tau_{\text{ср}}^2}$$

Для полимерной перемычки наиболее опасным сечением является сечение А-А (посередине пролета - см. рис. 3), где она имеет наименьшие размеры и подвергается изгибу и растяжению. Для данного места расчетные (суммарные) напряжения будут иметь величину

$$\sigma_{1\Sigma} = \sigma_{1u} + \sigma_{1p}$$

Запас прочности в опасных сечениях деталей сепаратора определится по известным соотношениям

$$S_{i(j)} = \sigma_{iB} / \sigma_{iR}$$

где  $i$  - номер детали,  $j$  - номер опасного сечения А-А или Б-Б - см. рис. 1 и 3,  $\sigma_{iB}$  и  $\sigma_{iR}$  - предел прочности и напряжение в опасном сечении, соответственно ( $\sigma_{3\Sigma}$  или  $\sigma_{\text{пр}}$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вся заявленная в постановке задачи система сил, действующих на сепара-

тор высокоскоростного подшипника качения ДЛА, учтена при разработке алгоритма решения задачи. Полученная методика позволяет оценить как деформационное, так и напряженное состояние элементов конструкции сепаратора, а рассмотренный системный подход обеспечит обоснованный расчетно-аналитический выбор параметров сепаратора как одного из важнейших элементов конструкции высокоскоростного подшипника качения ДЛА, обуславливающего его работоспособность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Силаев Б.М.* Трибология деталей машин в маловязких смазочных средствах. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. 264 с.
2. *Опоры осей и валов машин и приборов / Н.А. Спицын, М.М. Машнев, Е.Я. Красковский и др.* [под ред. Н.А. Спицына и М.М. Машнева]. Л.: Машиностроение, 1970. 520 с.
3. *Воронков Б.Д.* Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
4. *Силаев Б.М.* Метод определения составляющих мощности трения подшипников качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. Москва. 1991. №4. С.103-110.
5. *Тимошенко С.П., Гере Дж.* Механика материалов. М.: Мир, 1976. 669 с.

## SYSTEM APPROACH TO THE PROBLEM OF CALCULATION OF THE MASSIVE SEPARATOR OF THE FTE HIGH-SPEED ROLLING BEARING AND ALGORITHM OF THE CHOICE OF ITS RATIONAL PARAMETERS

© 2014 B.M. Silayev, P.A. Danilenko

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

We consider the application conditions and the work of the high-speed rolling bearings used in aircraft engines (FTE). As the object of analytical analysis accepted one of the most difficult in design terms widely used design massive separator performed from a polymeric material and a rigid connection of the side metal washers, rivets related. To consideration taken as the most difficult operating conditions of high-speed rolling bearings and their separators, namely, the operation of lubricated and cooled by cryogenic liquids. Established and systematized all the factors affecting a massive separator when working in these conditions, and the results of their effect on its performance.

Based on a comprehensive analysis of the working conditions of the designated high-speed rolling bearings FTE developed and presented to the structural and functional diagram of the separator, which reflects the whole system of factors affecting it. Set calculated dependences, allowing to determine how external forces acting on the separator at work, and the efforts of the interaction between its structural elements are made of different materials with different physical and mechanical properties. It is shown that the most loaded element separator are rivets. Methods and algorithms to solve this problem, which allow us to estimate how the deformation and stress state of structural elements of the separator, and the proposed systems approach provides a reasonable selection of the parameters of the separator as one of the most important structural elements of high-speed rolling bearing FTE, determine its performance.

*Keywords:* high-speed rolling bearing, a massive separator, rivet, bridge, structural and functional scheme, affecting factors, calculation algorithm.

*Boris Silayev, Doctor of Technics, Professor at the Machines Designing Bases Department. E-mail: okm@ssau.ru*  
*Pavel Danilenko, Graduate Student at the Machines Designing Bases Department. E-mail: p.a.danilenko@list.ru.*