

УДК 62-762.001

ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ИЗ ПОРИСТОГО ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА «МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕЗИНА»

© 2014 А.М. Жижкин, В.А. Зрелов, В.В. Зрелов, А.Ю. Ардаков, А.А. Осипов

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

В статье исследуется возможность применения упругих пористых элементов, изготовленных из материала «металлическая резина» (МР), в качестве уплотнений роторных систем. Технология изготовления таких элементов разработана для систем механического демпфирования колебаний, где они широко используются. Проведён сравнительный анализ расходных характеристик лабиринтных, сотовых, щёточных уплотнений и уплотнений из предлагаемых пористых элементов. Сравнение показало, что уплотнения с применением материала МР имеют расходные характеристики лучше, чем у лабиринтных и сотовых уплотнений, но несколько хуже, чем у щёточных конструкций. Поэтому применение пористого материала МР перспективно для изготовления деталей уплотнений, герметизирующих газовые или масляные полости роторов. Уплотнения из материала МР могут применяться в конструкции изделий аэрокосмической техники, где реализуются высокие скорости и вибрация и где имеются осевые перемещения вала. Для исследований уплотнений с применением элементов из материала МР спроектирована установка, имитирующая условия эксплуатации роторных уплотнений.

Материал «МР», уплотнение, технология, эксперимент, установка.

В настоящее время активно исследуются щёточные уплотнения (ЩУ), которые являются перспективной альтернативой лабиринтным и сотовым уплотнениям. Из анализа литературных источников известно, что при применении ЩУ можно уменьшить утечки в 7 – 10 раз по сравнению с лабиринтными уплотнениями [1 – 6]. Конструктивные особенности щёточных уплотнений позволяют их применять в конструкциях, имеющих значительные радиальные перемещения роторов, что обеспечивает существенное преимущество ЩУ перед другими типами уплотнений.

Щёточные уплотнения фактически являются контактными расходными уплотнениями с пористой волокнистой анизотропной структурой и обладают сложной технологией изготовления.

К недостаткам таких уплотнений следует отнести технологическую сложность и высокую стоимость. Кроме того, щёточные уплотнения не работают при реверсивном движении ротора.

В качестве альтернативы технологически сложным и дорогим щёточным уплотнениям предлагается применить в ка-

честве герметизирующего элемента упругий материал «металлическая резина» (МР) [7].

При создании таких уплотнений может быть использована отработанная технология проектирования и изготовления упругодемпфирующих конструкций из этого материала, описанная в работах [7, 8].

Схема такого уплотнения приведена на рис. 1.

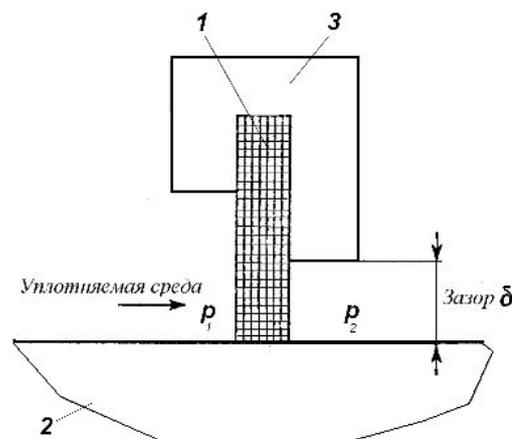


Рис. 1. Схема уплотнения с упругим элементом из материала МР:
1 — упругий пористый элемент из МР;
2 — вал; 3 — корпус; P_1 , P_2 — давление на входе и выходе из уплотнения

Целью проведённого исследования является экспериментальное определение возможности применения упругого демпфирующего материала МР в конструкции уплотнений турбомашин, включающее проверку его работоспособности как элемента уплотнения.

Уплотнение с применением пористого упругого элемента из материала МР может быть спроектировано для работы в опорах роторов турбомашин как в контактном, так и в бесконтактном режиме.

Примером применения пористого герметизирующего элемента в конструкции щелевого уплотнения компрессора ГТД является уплотнение, схема которого показана на рис. 2 [9].

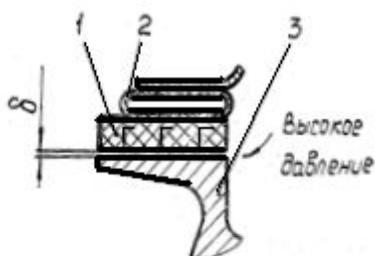


Рис. 2. Пористое уплотнение:
1 – пористая вставка;
2 – упругий элемент; 3 – ротор

Гидравлическое сопротивление в радиальном зазоре δ между пористой вставкой 1 и цилиндрической поверхностью ротора 3 обеспечивается за счёт дросселирования газа в детали 1. Упругий элемент 2 служит для компенсаций радиальных перемещений ротора.

Эффективность уплотнений оценивается величиной утечки уплотняемой среды через них. Чем меньше утечки при прочих равных условиях, тем эффективней уплотнение. Абсолютный расход через уплотнение может быть оценён как в массовых ($кг/с$), так и в объёмных единицах ($м^3/с$).

При создании новых конструкций уплотнений целесообразно провести сравнительный анализ возможностей обеспечения расходных характеристик разрабатываемых и существующих уплотнений. Поскольку наибольшее распространение в настоящее время имеют ла-

биринтные и сотовые уплотнения, проведём сравнение с такими конструкциями.

Сотовая конструкция уплотнений имеет высокую жёсткость, что позволяет выполнять стенки толщиной до 0,05 мм. В результате этого возможна практически беззоровая сборка уплотнения, так как поверхность контакта между стенками сот и ротором значительно меньше, чем в обычном лабиринтном уплотнении. По герметичности лабиринтные уплотнения уступают сотовым.

Проанализируем выражения для вычисления расходных характеристик уплотнений. Принимаем режим течения турбулентным и докритическим.

Утечки через лабиринтные уплотнения можно оценить по формуле Стодолы:

$$M = k \cdot S \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{z R_1 T_1}} = S \frac{k}{\sqrt{z}} \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{R_1 T_1}},$$

где M – массовый секундный расход через уплотнение;

S – площадь сечения щели под гребнем лабиринта;

k / \sqrt{z} – коэффициент, учитывающий влияние конструктивного фактора и числа гребней z ;

p_1 и p_2 – давление на входе и выходе уплотнения;

R_1 – значение газовой постоянной;

T_1 – температура на входе в уплотнение

Для щёточного уплотнения и упругопористого элемента утечки можно оценить, используя зависимость А.И. Белюсова и Е.А. Изжеурова, приведенную, например, в работах [10, 11] виде

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1,42(1 - \Pi)}{2\Pi^3 d_n \rho} V_m^2,$$

где V_m – массовая скорость ($V_m = V \cdot \rho$).

Преобразовав предыдущую зависимость относительно V_m и учитывая, что массовый расход равен

$$M = V_m F_n,$$

получим зависимость для вычисления утечек через щёточную конструкцию и

пористый элемент уплотнения из материала МР:

$$M = F_n \cdot \sqrt{\frac{\Pi^3 d_{np}}{1,42(1-\Pi)\delta_y}} \cdot \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{R_1 T_1}}$$

или в виде

$$M = F_n \cdot k_{\text{ЩМР}} \cdot \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{R_1 T_1}},$$

где F_n – площадь выходного сечения щётки и упруго пористого элемента;

$$k_{\text{ЩМР}} = \sqrt{\frac{\Pi^3 d_{np}}{1,42(1-\Pi)\delta_y}} - \text{коэффициент,}$$

учитывающий влияние конструктивных факторов щёточного и упруго пористого уплотнений;

Π – пористость щёточного и упруго пористого элементов;

δ_y – толщина пористого элемента в направлении течения уплотняемой среды;

d_{np} – диаметр проволоки, из которой изготовлен пористый элемент.

Сравнение эффективности уплотнений по конструктивному фактору проведём при одинаковых параметрах газа и одинаковых площадях выходного сечения F_n и S .

Для наиболее эффективных лабиринтных и сотовых уплотнений $k/\sqrt{z} = 0,7/1,73 = 0,4$ (при минимальном количестве гребней $z=3$).

Для уплотнения с применением материала МР при $\Pi = 0,7$, $d_{np} = 1,5\text{мм}$, а $\delta_y = 4\text{мм}$ имеем

$$\begin{aligned} k_{\text{ЩМР}} &= \sqrt{\frac{\Pi^3 d_{np}}{1,42(1-\Pi)\delta_y}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,7^3 \cdot 0,15}{1,42 \cdot 0,3 \cdot 4}} = \sqrt{0,03019} = 0,174. \end{aligned}$$

Для щёточного уплотнения при $\Pi = 0,7$, $d_{np} = 1,5\text{мм}$ имеем

$$\begin{aligned} k_{\text{ЩМР}} &= \sqrt{\frac{\Pi^3 d_{np}}{1,42(1-\Pi)\delta_y}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,5^3 \cdot 0,15}{1,42 \cdot 0,5 \cdot 4}} = \sqrt{0,0066} = 0,081. \end{aligned}$$

Уплотнения с применением МР, изготовленные по технологиям [7], по эффективности находятся между сотовыми и щёточными конструкциями. Это можно объяснить наибольшей реальной плотностью щёточного уплотнения за счёт упорядоченной укладки волокон в его конструкции [10].

Существуют технологические и конструктивные возможности повышения гидравлической эффективности уплотнений с применением материала МР. Это, в первую очередь, реализация упорядоченной укладки проволочной спирали, а также введение элементов, повышающих её гидравлическое сопротивление и при этом мало влияющих на упругодемпфирующие характеристики уплотнения [11].

Статическая расходная характеристика уплотнения вычисляется при отсутствии вращения вала и определяется его конструкцией, а динамическая расходная характеристика определяется системой «уплотнение – ротор – корпус» и частотой вращения ротора.

Для проведения исследований спроектирована установка для имитации условий работы уплотнений. Система измерений стенда построена на использовании стандартных измерительных средств с метрологическим обеспечением. Установка позволяет определять статические и динамические расходные характеристики уплотнений, а также проводить ресурсные и другие виды испытания.

Принципиальная схема стенда приведена на рис. 3.

Исследуемое уплотнение закрепляется в установке 1, вал которой приводится во вращение с помощью асинхронного электродвигателя 2, обеспечивающего рабочие обороты установки. Его включение производится кнопкой пуска 5 с помощью пускателя 4.

Передача вращения от вала двигателя 2 на вал установки 1 осуществляется через шкив или с помощью шлицевой втулки.

Установка 1 закреплена на основании 10 с помощью двух кронштейнов.

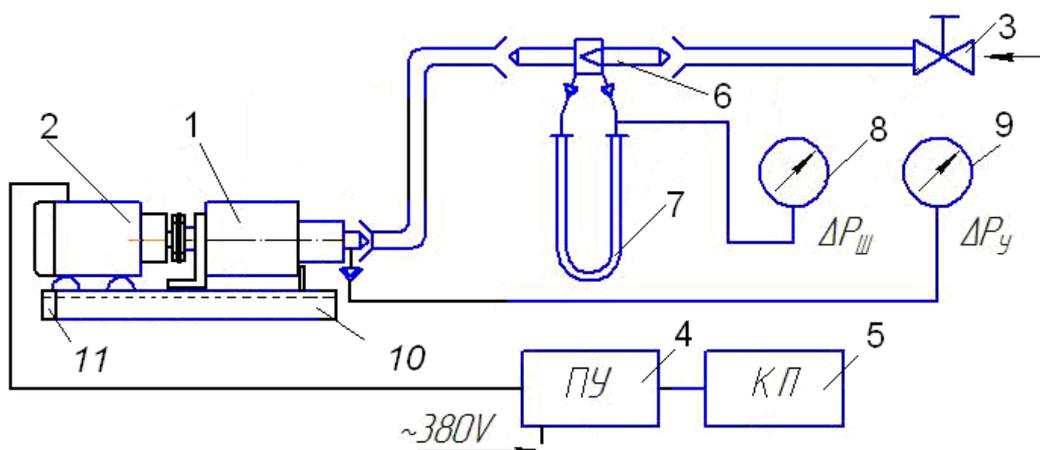


Рис. 3. Схема стенда для исследования уплотнений:
 1 – установка; 2 – электродвигатель; 3 – вентиль; 4 – пускатель; 5 – пусковая кнопка;
 6 – расходная шайба; 7 – пьезометр; 8, 9 – манометры; 10, 11 – основания

Изменение оборотов осуществляется путём изменения соотношения диаметров передаточных шкивов от двигателя 2.

Электродвигатель 2 закреплён на основании 11 четырьмя болтами. Оба основания 10 и 11 жёстко крепятся болтами между собой и образуют жёсткую раму.

Для обеспечения более высоких оборотов предполагается использовать высокооборотный электродвигатель (до 25000 об/мин) или микротурбину, которые устанавливаются на основание 10 и передают вращение на установку 1 с помощью рессоры. При это можно регулировать обороты и обеспечивать окружную скорость до 115 м/с.

Через вентиль 3 в рабочую полость установки 1 подаётся воздух от пневмосистемы. Воздух в установку подаётся через расходную шайбу 6, перепад давления на которой измеряется с помощью пьезометра 7, а давление на входе в него – манометром 8. Давление на входе в установку 1 измеряется манометром 9.

Схема установки 1 для имитации условий работы уплотнения приведена на рис. 4. Установка выполнена на базе серийного авиационного агрегата ДЦН-64А, в котором выполнены следующие доработки.

Крыльчатка насоса заменена имитатором вала 7. Во внутреннюю полость насоса вставлен корпус 1, который закрывается крышкой 2 и крепится восемью винтами 9. Вал 7 вращается на двух подшип-

никах агрегата 10 и закрепляется гайкой 11.

Исследуемое уплотнение устанавливается в корпусе 1 и поджимается по боковым поверхностям крышкой 2 и кольцами 3, 4, 5.

Посадка уплотнения или упругого пористого элемента в корпусе 1 выполнена по наружной поверхности.

Для устранения проворота уплотнение поджато крышкой 2 с помощью восьми винтов 9.

Через входной штуцер, установленный на входе и полость А, осуществляется подача воздуха под давлением в уплотнение.

Полость А образована корпусом 1, крышкой 2, уплотнением 12 и валом 7. Крепление крышки 2 осуществляется винтами 9 (8 шт.).

Проток воздуха через полость А осуществляются только через исследуемое уплотнение 12 в полость Б, которая соединяется с атмосферой.

Подача воздуха и замер давления в полости А производится через входной штуцер.

Фиксация камеры 1 от проворота осуществляется с помощью двух стопоров 6, закреплённых гайками 14 и болтами 15.

Съёмная крышка 13 закрепляется на корпусе 10 гайками 17. Остальные составные элементы стенда являются стандартными или покупными изделиями.

Измерения частоты вращения вала 7 установки 1 производится с помощью стробоскопа.

Замер давления в полостях производится манометрами класса точности 0,5.

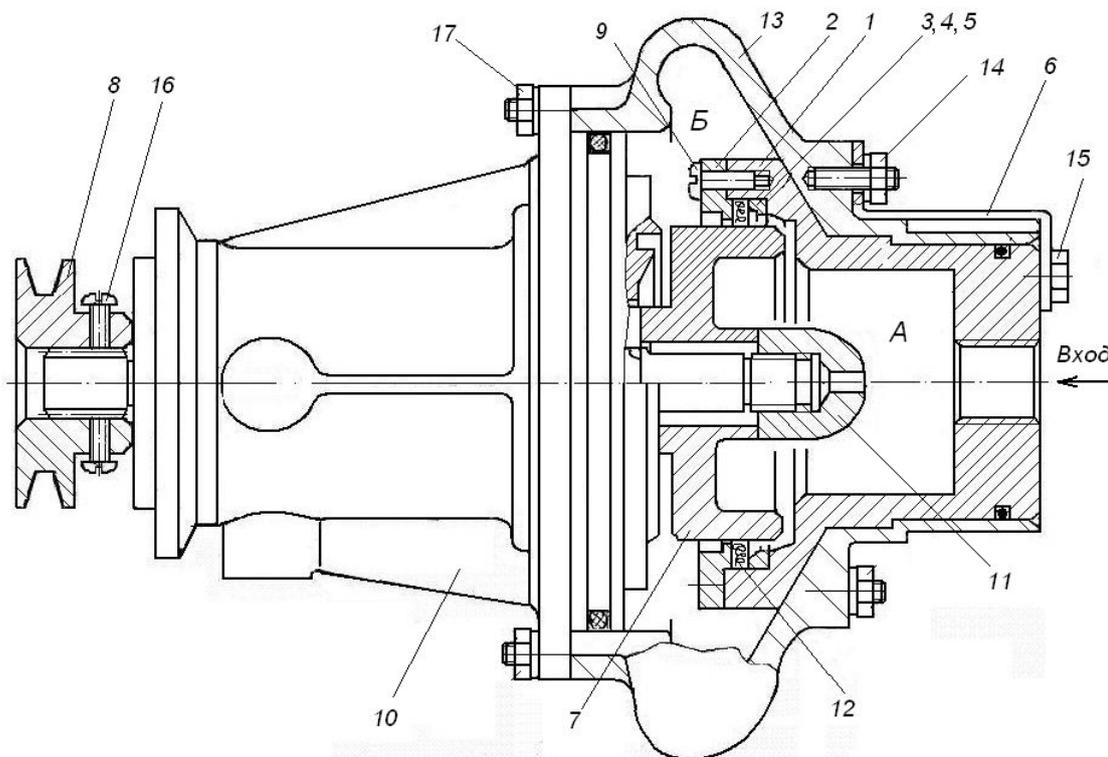


Рис. 4. Схема установки для имитации работы:

1 – корпус; 2 – крышка; 3,4,5 – кольцо; 6 – стопор (3 шт.); 7 – вал; 8 – шкив; 9 – винт (8 шт.); 10 – агрегат ДЦН-64А; 11 – гайка; 12 – кольцо из МР; 13 – крышка; 14 – гайка (3 шт.); 15 – винт (3 шт.); 16 – винт (2 шт.); 17 – гайка (12 шт.)

Расход воздуха осуществляется с помощью расходной шайбы диаметром 50 мм, выполненной по рекомендации [12].

Для проведения испытаний был использован элемент из материала МР в виде кольца (рис. 5). Структура внутренней поверхности кольца обращена к вращающемуся во время испытаний валу.

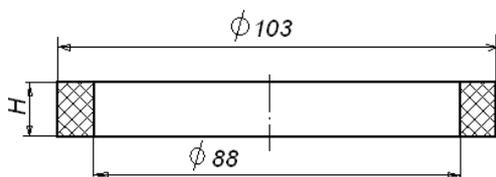


Рис. 5. Элемент из материала МР

Исходная пористость испытываемого образца $\Pi = 80\%$, 70% и 60% . Пористые элементы при установке поджимаются крышкой 2.

Выводы

1. Результаты анализа показали, что применение пористого материала МР перспективно для изготовления деталей уплотнений, герметизирующих газовые или масляные полости роторов.

2. Расходные характеристики уплотнений зависят от величины коэффициента расхода, определяемого формой структурными и геометрическими параметрами уплотнения.

3. Уплотнения с применением материала МР по разработанным технологиям [7] имеют расходные характеристики лучше, чем у лабиринтных и сотовых уплотнений, но хуже, чем у щёточных конструкций. Этот факт объясняется наибольшей реальной плотностью щёточного уплотнения за счёт упорядоченной укладки волокон в его конструкции.

4. Существуют технологические и конструктивные возможности повышения гидравлической эффективности уплотнений с применением материала МР. Это, в первую очередь, упорядоченная укладка проволоочной спирали, а также введение элементов, повышающих их гидравлическое сопротивление и при этом мало влияющих на упругодемпфирующие характеристики уплотнения.

5. Для проведения исследований спроектирована установка для имитации условий работы уплотнений. Система измерений стенда построена на использовании стандартных измерительных средств с метрологическим обеспечением. Установка позволяет определять статические, динамические и расходные характеристики уплотнений, а также проводить ресурсные и другие виды испытания.

Библиографический список

1. Brush seals // MTU Aero Engines. http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing_processes/brush_seals/technology/configurations/index.html.

2. Brush seal upgrades for GE gas turbines. <http://www.powmat.com/brush.html>.

3. Зрелов В.В., Крашеников К.П. Технология щёточных уплотнений // Совершенствование технологии изготовления деталей в авиастроении. 1996. С. 65–74.

4. Антонов А.Н., Аксёнов Н.К., Струков А.А. Разработка щёточных уплотнений для малоразмерных ГТД и ВСУ. В кн. Надёжный вклад в создание авиационных двигателей. Кн. 1. ЦИАМ. М.: Машиностроение. 2000. 725 с.

5. Горелов Г.М., Резник В.Е., Цибизов В.И. Экспериментальное исследование характеристик щёточных уплотнений // Авиационная техника. 1988. № 4. С. 43-46.

6. Филимонова Л.Л. Модель работы щёточного уплотнения ГТД // Вестник двигателестроения. 2011. № 1. С. 50 – 57.

7. Бузицкий В.Н., Сойфер А.М. Цельнометаллические упруго-демпфирующие элементы, их изготовление и применение. // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппара-

тов. Науч. тр. Вып. 19. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1965. С. 259–266.

8. Тройников А.А., Пичугин А.Д. Вопросы технологии изготовления упругодемпфирующих элементов из материала МР // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов. Вып. 8. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1981. С. 101-112.

9. Stein P. S. Circumferential seals for use as oil seals // ASLE Preprint N0 78-AM-3D-2. 1978. V. 1. P. XI.

10. Белоусов А.И., Изжеуров Е.А., Сетин А.Д. Гидравлические и фильтровальные характеристики материала МР // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев, 1975. Вып. 73. С. 70-79.

11. Изжеуров Е.А. Основы расчёта и проектирование изделий из материала МР для гидрогазосистем энергетических установок. М.: Машиностроение, 2001. 286 с.

12. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

Информация об авторах

Жижкин Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Об-

ласть научных интересов: виброизоляторы и уплотнения на основе материала МР.

Зрелов Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (на-

циональный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: конструирование аэрокосмических двигателей; история развития авиационного двигателестроения.

Зрелов Вадим Владимирович, аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: уплотнения роторов ГТД.

Ардаков Алексей Юрьевич, аспирант кафедры конструкции и проектиро-

вания двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipdla@ssau.ru. Область научных интересов: уплотнения роторов ГТД.

Осипов Андрей Александрович, аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kipdla@ssau.ru. Область научных интересов: уплотнения роторов ГТД.

RESEARCH OF SHAFT SEALS MADE OF POROUS WIRE "METAL RUBBER" MATERIAL

© 2014 A.M. Zhizhkin, V.A. Zrelov, V.V. Zrelov, A.Yu. Ardakov, A.A. Osipov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The possibility of using elastic porous elements made of "metallic rubber" (MR) as rotor seals is discussed in the paper. The technology of manufacturing of such elements is developed for the mechanical damping of vibration in mechanical systems where they are widely used. Comparative analysis of rating curves of labyrinth, honeycomb, brush seals and seals made of MR material has shown that seals made of MR material have better rating curves than labyrinth and honeycomb seals, but slightly worse ones than those of the brush design. Therefore, the use of porous MR material shows promise for making parts of the seals for gas or oil cavities of rotors. Seals made of MR material are designed for optimum performance in the most demanding aerospace sealing applications where high speed and vibration are the norm, and where axial shaft movement takes place. An installation imitating conditions of using rotor seals is designed for the purpose of analyzing seals made with the use of MR material.

"Metallic rubber", sealing, labyrinth, technology.

References

1. Brush seals // MTU Aero Engines. http://www.mtu.de/en/technologies/manufacturing_processes/brush_seals/technology/configurations/index.html.
2. Brush seal upgrades for GE gas turbines. <http://www.powmat.com/brush.html>.
3. Zrelov V.V., Krashennikov K.P. Technology of brush seals // Improving the technology of manufacturing aircraft parts. 1996. P. 65-74. (In Russ.)
4. Antonov A.N., Aksenov N.K., Strukov A.A. Razrabotka shchetochnykh uplotneniy dlya malorazmernykh GTD i VSU. V kn. Nadezhnyy vklad v sozдание aviatsionnykh dvigateley. Kn. 1. TsIAM [Development of small brush seals for gas turbine engines and APU. In the book Reliable contribution to the creation of aircraft engines. Book 1. CIAM]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2000. 725 p.
5. Gorelov G.M., Resnick V.E., Tsibizov V.I. Experimental study of brush seal characteristics // Aeronautical engineering. 1988. No. 4. P. 43-46. (In Russ.)

6. Filimonov L.L. Model of operation of a GTE brush seal // Vestnik dvigatelestroeniya. 2011. No. 1. P. 50-57. (In Russ.)

7. Buzitsky V.N., Soifer A.M. All-metal elastic-damping elements, their manufacture and use. Collection of research papers work. Vibration strength and reliability of engines and aircraft systems. V. 19. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute, 1965. P. 259-266. (In Russ.)

8. Troynikov A.A., Pichugin A.D. Issues of manufacturing technology of elastic-damping elements made of MR material // Vibration strength and reliability of engines and aircraft systems. V. 8. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute, 1981. P. 101-112. (In Russ.)

9. Stein PS Circumferential seals for use as oil seals // ASLE Preprint N0 78-AM-ZD-2. 1978. V. 1. P. XI.

10. Belousov A.I., Izzheurov E.A., Setin A.D. Hydraulic and filter characteristics of MR material // Vibration strength and reliability of engines and aircraft systems. Issue 73. Kuibyshev: Kuibyshev Aviation Institute, 1975. P. 70-79. (In Russ.)

11. Izzheurov E.A. Osnovy rascheta i proektirovanie izdeliy iz materiala MR dlya gidrogazosistem energeticheskikh ustanovok [Basics of calculation and design of MR products for hydraulic gas systems of power plants]. Mashinostroyeniye Publ., 2001. 286 p.

12. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik [Seals and sealing equipment: Reference guide / Edited by A.I. Golubeva, L.A. Kondakova]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 464 p.

About the authors

Zhizhkin Alexander Mikhailovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Aircraft Engines Design and Construction Department, Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of Research: sealing made of MR material.

Zrelov Vladimir Andreevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of Aerospace Engines Department, Samara State Aerospace University. Area of Research: Design of aerospace engines; history of aviation engines.

Zrelov Vadim Vladimirovich, postgraduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of Research: GTE sealing.

Ardakov Alexey Yurievich, postgraduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: kipdla@ssau.ru. Area of Research: Gas turbine engine seals.

Osipov Andrey Alexandrovich, postgraduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: kipdla@ssau.ru. Area of Research: Gas turbine engine seals.