

УДК 621.82

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННЫХ УПЛОТНЕНИЙ

А.В. Топоров, Н.А. Кропотова

*Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России*

М.Ю. Колобов

*Ивановский государственный химико-технологический университет*

Существует множество конструкций комбинированных уплотнений, в которых используются магниты, а магнитная жидкость может выполнять функции герметизатора и смазочного материала. Рассмотрено влияние магнитных свойств материалов на магнитные характеристики комбинированных магнитожидкостных уплотнений. Исследования влияния магнитных свойств материалов на характеристики комбинированных уплотнений проводились с использованием метода конечных элементов. В качестве расчетной модели были заданы параметры конструкции комбинированного манжетного магнитожидкостного уплотнения, с установленным, между кромкой манжеты и пыльником радиально намагниченным магнитным элементом. Расчеты проводились для различных материалов магнитов и арматуры. Результаты расчета показали, что в случае, если вал выполнен из магнитного материала, величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения практически не зависит от марки стали. В конструкции с немагнитным валом происходит значительное уменьшение величины индукции. Поэтому в таких конструкциях, чтобы обеспечить достаточное значение индукции, необходимо, в качестве источника магнитного поля, применять магниты с большей намагниченностью.

**Ключевые слова:** магнитные свойства, комбинированные магнитожидкостные уплотнения, магнит, магнитный поток, намагниченность, экспериментальное моделирование.

В комбинированных магнитожидкостных уплотнениях (КМЖУ) могут использоваться магниты, изготовленные из различных материалов и обладающие различными свойствами. Постоянные магниты принято разделять на две группы [3, 7]. Первую группу составляют магниты, которые полностью восстанавливают магнитный поток после отделения от арматуры. Такие магниты называют «закритическими». Во вторую группу входят магниты, значительно снижающие магнитный поток после извлечения из арматуры. Эти магниты называются «докритическими». «Докритические» магниты имеют низкое значение коэрцитивной силы. При разборке уплотнения, смещении магнита, или изменении магнитопроводящих свойств арматуры, происходит снижение остаточной намагниченности. В результате этого происходит уменьшение магнитного потока, и как

следствие – снижение величины магнитной индукции в рабочей области уплотнения. «Закритические» магниты имеют высокое значение коэрцитивной силы. При разборке и ударах, вибрациях и других внешних воздействиях, они сохраняют свои магнитные свойства [4], что гарантирует сохранение постоянной индукции в рабочем зазоре. К этой группе магнитов относятся: самарий-кобальтовые магниты: КС-37 [3] и КС-25 [4], феррит-бариевые магниты: 16БА300, 16БА190, 25БА170, феррит-стронциевые магниты: 24СА200, 27СА220 [4].

Магнитные характеристики некоторых постоянных магнитов приведены в таблице 1 [3, 4]. Наиболее перспективным является применение в КМЖУ редкоземельных магнитов, поскольку они имеют наилучшие магнитные характеристики.

Таблица 1

## Магнитные характеристики постоянных магнитов

Материал постоянных магнитов	Марка магнита	Магнитные свойства			
		Максимальная удельная энергия $W_{\max,}$ , кДж/м	Коэрцитивная сила по намагничению $H_{cm,}$ , кА/м	Коэрцитивная сила по индукции $H_{св,}$ , кА/м	Остаточная индукция $B_r$ , Тл
Самарий-кобальтовые	КС-37	55	1300	540	0.77
	КС-25-1	60	1273	541	0.78
	КС-25-2	72	1273	589	0.85
	КС-25-3	84	1273	637	0.92
Феррит-бариевые	6БИ2400	3	240	125	0.19
	22БА220	11	220	215	0.36
	16БА190	8	190	185	0.3
	25БА170	12.5	170	165	0.38
Феррит-стронциевые	24СА200	12	200	195	0.37
	24СА220	13.5	220	215	0.38

Кроме монолитных постоянных магнитов, источниками магнитного поля в КМЖУ могут являться магнитоэластомеры [6]. Они представляют собой эластомерную основу, содержащую в себе мелкодисперсную фазу магнитного материала. Примером магнитоэластомеров может послужить РМ-37, изготовленный из резины и содержащий самарий-кобальтовый магнитный наполнитель. Достоинством магнитоэластомеров является возможность получения практически любой конфигурации изделий, изготовленных из них.

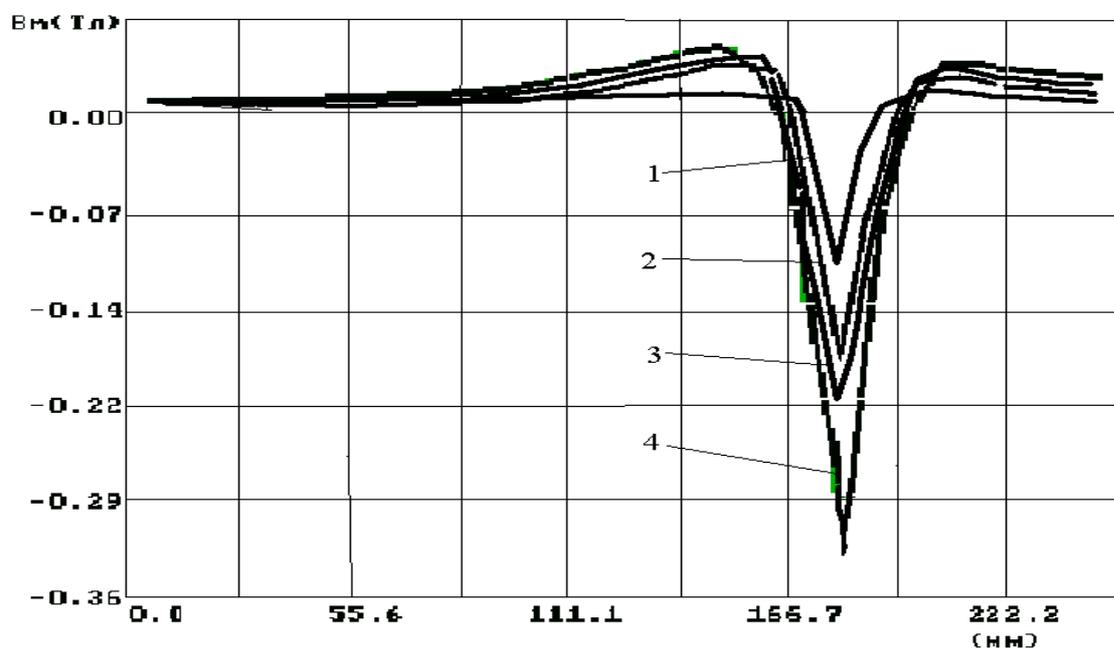
Для анализа влияния постоянных магнитов на характеристики КМЖУ были выбраны магниты: КС-37; 6БИ240; 24СА200; РМ-3. Магнитный расчет проводился с использованием метода конечных элементов (МКЭ), на примере конструкции комбинированного манжетного

магнитоэластомерного уплотнения, с установленным между кромкой манжеты и пыльником, радиально намагниченным магнитным элементом. Отметим, что такое уплотнение имеет наиболее рациональную конфигурацию магнитной системы. В результате расчетов были получены кривые распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения (рис. 1).

Наименьшее значение магнитной индукции в рабочей области уплотнения, порядка 0,1 Тл, соответствует феррит-бариевому магниту 6БИ240, наибольшее – порядка 0,33 Тл – самарий-кобальтовому магниту КС-37. Применение магнитоэласта РМ-37, с самарий-кобальтовым наполнителем, позволяет получить магнитную индукцию порядка 0,22 Тл. Такое уменьшение величины индукции, по сравнению с монолитным са-

марий-кобальтовым магнитом, связано с ограниченным содержанием в магнитоэласте магнитной фазы, которая заполняет лишь часть его объема. Для феррит-стронциевого магнита индукция составляет порядка 0,18 Тл. Таким образом, самарий-кобальтовый магнит позволяет обеспечить наибольшую величину магнитной индукции. Однако существует ряд причин, ограничивающих применение в КМЖУ самарий-кобальтовых магнитов. Этот материал трудно поддается

механической обработке. Изготовить из него необходимый для уплотнения кольцеобразный магнит достаточно сложно. Этот недостаток так же присущ феррит-стронциевым и феррит-бариевым магнитам. Поэтому наиболее подходящим, для данной конструкции, источником магнитного поля является магнитоэласт РМ-3, обеспечивающий приемлемую величину магнитной индукции и достаточно хорошо поддающийся механической обработке.



**Рис. 1. Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре уплотнения при использовании различных магнитов:  
1 – ББИ244, 2 – 24СА200, 3 – РМ-3, 4 – КС-37**

Кроме постоянных магнитов, на величину магнитной индукции в рабочем зазоре, существенное влияние могут оказывать материалы магнитопроводящих частей уплотнения и вала. Уплотнительные устройства применяются для герметизации различных узлов и агрегатов, имеющих валы, изготовленные из сталей различных марок, которые могут значи-

тельно отличаться по своим магнитным свойствам. Поэтому, материал вала может оказывать значительное влияние на величину магнитной индукции в рабочей области уплотнения. Основной характеристикой, определяющей свойства стали, является кривая намагничивания, представляющая собой зависимость магнитной индукции в стали от напряженности

магнитного поля  $B = f(H)$ . На характеристике принято выделять два основных участка. На начальном участке происходит пропорциональный рост индукции при увеличении напряженности магнитного поля. Далее, с ростом напряженности возрастание индукции замедляется. Такое состояние, при котором не происходит увеличения индукции, при возрастании напряженности магнитного поля называют магнитным насыщением стали. При насыщении резко снижается магнитная проницаемость стали, которая определяется, как  $G_m = H/B$ . Следствием насыщения стали является снижение результирующего магнитного потока, а значит и индукции в рабочей области уплотнения. Насыщение стали оценивается по величине индукции насыщения.

В зависимости от легирующих добавок по магнитным свойствам, стали можно разделить на электротехнические и конструкционные. Электротехнические стали, в качестве основной легирующей добавки, имеют кремний. Такие стали

имеют низкие потери на перемагничивание, высокую намагниченность насыщения [5]. Они, в основном, используются для изготовления магнитопроводов электромагнитных устройств и электрических машин. Для изготовления валов эти стали не пригодны из-за низких прочностных характеристик.

Для изготовления валов чаще всего применяются стали следующих марок – сталь 20, сталь 40, сталь 30ХГСА, которые обладают высокими механическими показателями [5]. Магнитная проницаемость у таких сталей значительно ниже, чем у электротехнических и имеет различные значения для разных марок сталей. В таблице 2 приведены магнитные характеристики для некоторых конструкционных материалов. Валы уплотняемых устройств так же могут быть изготовлены из таких материалов, как легкие сплавы, бронза, полимеры [1, 2], магнитная проницаемость которых приближается к магнитной проницаемости вакуума.

Таблица 2

Значение индукции насыщения магнитопроводящих материалов

Марка стали	Индукция насыщения $B_s$ Тл	Значение напряженности магнитного поля, при котором наступает насыщение $H_s$ кА/м
Ст.3	2,12	40
Сталь10	2,1	50
Сталь20	2,17	50
Сталь30	2,1	50
Сталь30ХГСА	1,97	50
Сталь20Х	2,11	50
Сталь40Х	2,01	50
Чугун СЧ18-36	1,48	50

Для анализа влияния материала вала на распределение индукции в рабочей области были выбраны сталь 20, сталь 40, сталь 30ХГСА. Расчеты так же проводились для конструкции с немагнитным валом. В качестве расчетной модели было выбрано уплотнение с магнитным элементом, установленным между кромкой

и пыльником манжеты. Расчеты проводились для феррит-стронциевых магнитов и материалов арматуры и пружины.

На рис. 2 представлены кривые распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения. Наименьшее значение индукции – порядка 0,07 Тл получено для конструкции с немагнитным

валом, максимальное – порядка 0,2 Тл для стали 20. Для стали 40 и стали 30ХГСА величины индукций составляют 0,185-0,195 Тл. Такое незначительное отличие величин индукции для сталей обусловлено отсутствием их насыщения. Уменьшение индукции в конструкции с немагнитным валом связано с изменением магнитной проницаемости вала. Когда вал выполнен из магнитного материала, имеется большая, по сравнению с окружающим пространством, магнитная про-

ницаемость. Основной магнитный поток, протекая по пути наименьшего сопротивления, пересекает рабочий зазор, проходит через вал и замыкается через окружающее пространство. Если вал выполнен из немагнитного материала, его магнитная проводимость приближается к проводимости окружающей уплотнение среды. Поэтому основной магнитный поток, минуя рабочий зазор, замыкается через воздух, в непосредственной близости от источника магнитного поля (рис. 2 а).

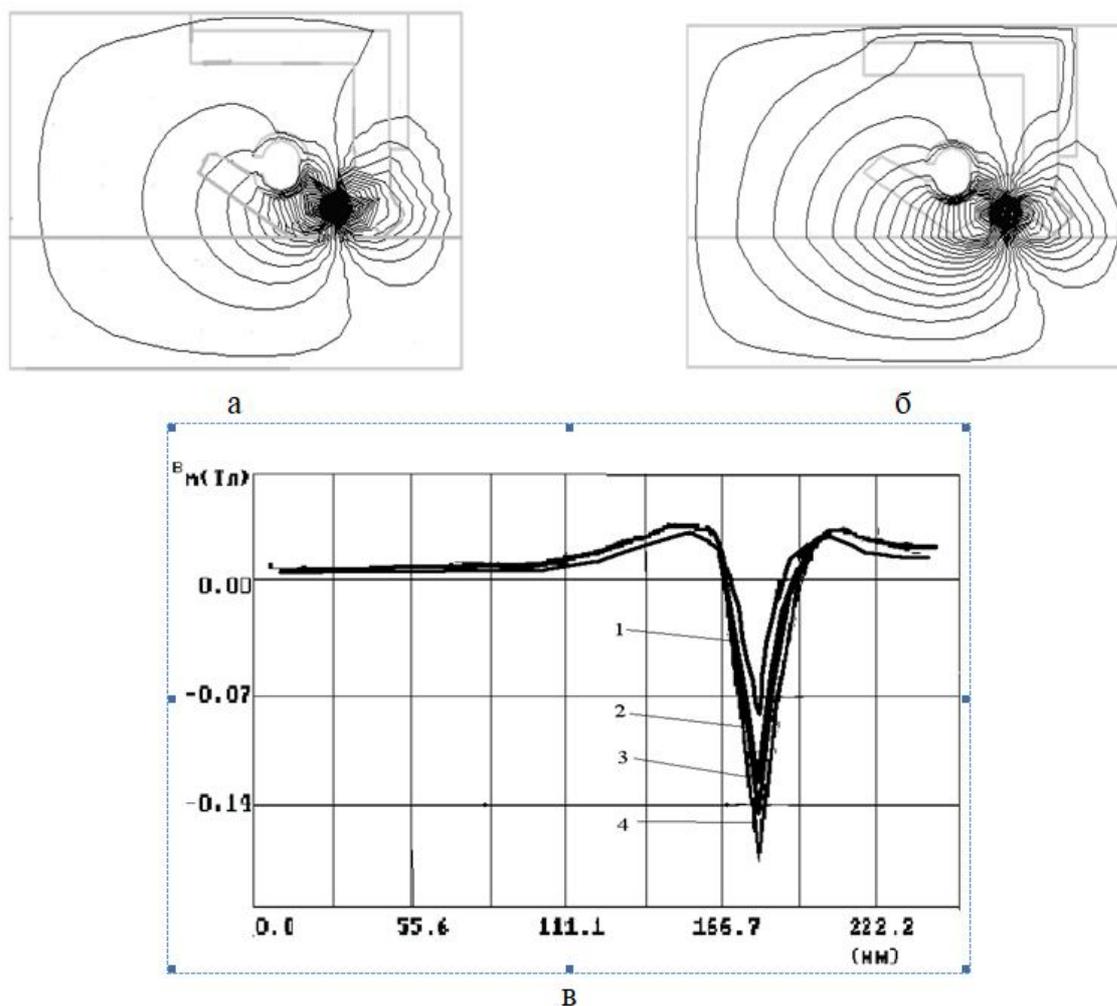


Рис. 2. Картины магнитного поля в уплотнении:  
 а – с магнитопроводящим валом; б – с немагнитным валом;  
 в – кривые распределения магнитной индукции по поверхности вала:  
 1 – немагнитный вал, 2 – сталь 30ХГСА, 3 – сталь 40, 4 – сталь 20

Таким образом, если вал выполнен из магнитного материала, величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения практически не зависит от марки стали. В конструкции с немагнитным валом происходит значительное уменьшение величины индукции. Поэтому в таких конструкциях, чтобы обеспечить достаточное значение индукции, необходимо, в качестве источника магнитного поля, применять магниты с большей намагниченностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. М.: Химия, 1972. 240 с.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: Высшая. школа, 1985. 416 с.

3. Кудряков Б.А., Кузина Н.А. и др. Тракторы и сельскохозяйственные машины. М.: Машиностроение, 1988.

4. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов. Л.: Энергия, 1971. 270 с.

5. Приданцев М.В., Давыдова А.Н., Тамарина И.А. Конструкционные стали. Справочник. М.: Metallurgiya, 1980. 288 с.

6. Топоров А.В., Кропотова Н.А., Колобов М.Ю. Исследование влияния магнитной жидкости на трение эластомерного материала по металлу // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. № 2(50). 2017. С. 86-90.

7. Хрусталеv А.А., Булкин В.А., Дулатов Ю.А. Уплотнения вращающихся валов. Казань, 1978. 39 с.

*Рукопись поступила в редакцию 07.05.2018*

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC MATERIALS ON MAGNETIC CHARACTERISTICS OF COMBINED SEALS

*A Toporov, N. Kropotova, M. Kolobov*

There is a set of designs of the combined consolidations in which magnets are used, and the magnetic liquid can carry out functions as a sealant and lubricant. The influence of the magnetic properties of materials on the magnetic characteristics of combined magneto-liquid seals is considered. Investigations of the influence of the magnetic properties of materials on the characteristics of combined seals was carried out using the finite element method. As a design model, the design parameters of a combined cuff magneto-liquid seal were established with a radially magnetized magnetic element between the cuff edge and another. Calculations were spent for various materials of magnets and armature. The results of the calculation showed, that if the shaft is made of magnetic material, the value of the magnetic induction in the working region of the seal is practically independent of the steel grade. In a design with not magnetic shaft there is a considerable reduction of size of an induction. Therefore, in such designs, to ensure a sufficient value of induction, it is necessary to use magnets with a larger magnetization as a magnetic field source.

Key words: magnetic properties, combined magneto-liquid seal, magnet, magnetic flux, magnetization, experimental calculation.

#### References

1. Bartenev G.M., Lavrent'ev V.V. Trenie i iznos polimerov. M.: Himiya, 1972. 240 s.
2. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Konstruirovaniye uzlov i detalej mashin. M.: Vysshaya. shkola, 1985. 416 s.
3. Kudryakov B.A., Kuzina N.A. i dr. Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny. M.: Mashinostroeniye, 1988.
4. Mitkevich A.V. Stabil'nost' postoyannykh magnitov. L.: Energiya, 1971. 270 s.
5. Pridancev M.V., Davydova A.N., Tamarina I.A. Konstrukcionnyye stali. Spravochnik. M.: Metallurgiya, 1980. 288 s.
6. Toporov A.V., Kropotova N.A., Kolobov M.YU. Issledovaniye vliyaniya magnitnoy zhidkosti na treniye ehlastomernogo materiala po metallu. Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii. Regional'noe prilozheniye. № 2(50). 2017. S. 86-90.
7. Hrustalev A.A., Bulkin V.A., Dulatov YU.A. Uplotneniya vrashchayushchihsya valov. Kazan', 1978. 39 s.