

УДК 620.19

**ВЫБОР МАГНИТОЖЕСТКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
МАГНИТОПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКОВ***А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В., 2025

Аннотация. В современном высокотехнологичном оборудовании магнито-пассивные подшипники применяются в основном для разгрузки механических подшипников или в составе активных электромагнитных подвесов. В статье разработаны рекомендации для обоснованного выбора магнито жестких материалов для оптимальных магнитов магнитосиловых устройств с учетом особенностей их эксплуатации, геометрических размеров, конструкции магнитной цепи подшипника и при условии сохранения остаточной намагниченности на наиболее высоком уровне. Рассмотрены магниты самых востребованных форм: цилиндрической, кольцевой, призматической и конусной. Определены безразмерные критерии оптимальных по размерам магнитов, при выполнении которых достигается заданная несущая способность или жесткость. Установлено, что коэрцитивная сила по намагниченности материала магнитов для силовых механизмов должна быть не менее чем на 10–20 % выше остаточной намагниченности магнитов.

Ключевые слова: магнито пассивные подшипники, магнито жесткие материалы, коэрцитивная сила по намагниченности, намагниченность магнитов, размагничивающее магнитное поле магнита.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-40-49**ВВЕДЕНИЕ**

Особое место среди магнитных механизмов занимают магнито пассивные подшипники [1–4], механические свойства которых – жесткость, несущая способность – выросли более чем на порядок после начала применения в их конструкции современных магнитов. Удельная несущая способность подшипников с магнитами нового поколения может достигать 0,2–0,4 МПа. Магнито пассивные подшипники – это радиальные или упорные бесконтактные подшипники, в которых внешняя нагрузка бесконтактно компенсируется магнитными силами. Источником этих сил являются постоянные магниты. Преимущество таких подшипников перед механическими заключается в том, что они не подвержены износу, имеют незначительные диссипативные потери энергии, обусловленные силами электромагнитного торможения, и не загрязняют окружающую среду смазочными продуктами. Магнито пассивные подшипники в основном применяются для разгрузки механических подшипников или в составе активных электромагнитных подвесов [3–5]. В магнито пассивных подшипниках используются магниты с осевой симметрией формы, но в подшипниках для магнитной разгрузки могут применяться и магниты в виде прямоугольной призмы. В некоторых случаях для магнитной разгрузки можно эффективно использовать как магниты простых форм с постоянным направлением

намагниченности по объему, так и магнитную сборку Хальбаха из магнитов с разнонаправленной намагниченностью [6].

В магнитопассивных подшипниках на магниты воздействует не только внутреннее размагничивающее поле, но и неоднородное размагничивающее поле от сопряженных магнитов. В зависимости от толщины магнитов и их намагниченности суммарное размагничивающее поле может приближаться к значению коэрцитивной силы по намагниченности или даже превышать ее. Поэтому влияние больших размагничивающих полей на магниты способно привести к необратимому уменьшению остаточной намагниченности магнитов, а следовательно, к ухудшению их функциональных свойств и даже к разрушению из-за возникновения механического контакта между магнитами, имеющими относительное движение.

Для предотвращения выхода из строя магнитных подшипников по причине непреднамеренного размагничивания постоянных магнитов необходимо выработать требования к материалам магнитов с учетом их эксплуатации, геометрических размеров, особенностей магнитной цепи подшипника и при условии сохранения остаточной намагниченности на наиболее высоком уровне. В первом приближении эти требования определяются только коэрцитивной силой магнитов при заданной температуре, формой кривой размагничивания, а также геометрическими параметрами магнитной цепи.

Цель работы заключалась в выработке рекомендации по обоснованному выбору магнито жестких материалов для оптимальных магнитов, направленному на предупреждение их размагничивания в процессе эксплуатации и достижение высоких магнитосиловых характеристик подшипников.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, МАГНИТНОСИЛОВЫХ УСТРОЙСТВ

Наиболее важными магнитными характеристиками постоянных магнитов, определяющими надежность и эффективность работы магнитопассивных подшипников и других устройств с постоянными магнитами (муфт, тормозов, пружин), являются коэрцитивная сила по намагниченности H_{cJ} и намагниченность J в рабочей точке магнита.

Для предупреждения размагничивания отдельного магнита в магнитопассивном подшипнике при рабочей температуре критическое значение размагничивающего поля H_k (соответствует точке Е на кривой размагничивания, рис. 1) должно превосходить собственное размагничивающее магнитное поле магнита H_p в сумме с внешним полем H_e , создаваемым сопряженными магнитами, и определяться свойствами материала магнитов или другими источниками:

$$H_k > H_e(J) + H_p(J) + H_n, \quad (1)$$

где H_n – величина дополнительного магнитного поля, учитывающая сильную неоднородность внешних и внутренних размагничивающих полей и полей от случайных источников.

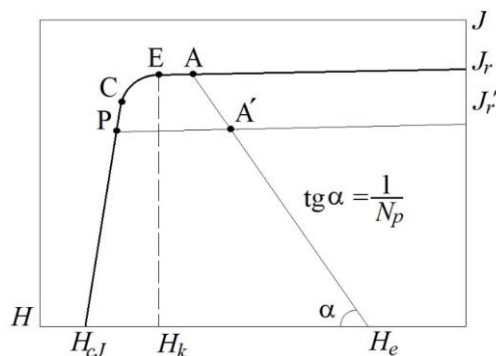


Рис. 1. Обобщенная кривая размагничивания магнита

Величина H_k зависит от магнитных свойств материала магнита, и найти ее значение можно либо в справочных пособиях, либо с помощью уравнений, полученных в работе [7]. Под скалярными величинами H_e и H_p подразумеваются только аксиальные или нормальные к поверхности магнита составляющие векторов напряженности соответствующих размагничивающих полей.

У механизмов, выполненных из закритических магнитомягких материалов $H_k \geq J_r$ (J_r — наибольшая остаточная намагниченность), имеющих близкую к однородной намагниченность, силовые характеристики пропорциональны намагниченности во второй степени, в то время как от объема, например, они зависят в степени, показатель которой меньше единицы. Поэтому магниты для подшипников и других устройств должны иметь максимально возможную, с учетом неравенства (1), намагниченность. Наибольшего значения результирующее размагничивающее поле достигает в том случае, когда сопряженные магниты подшипника намагничены встречно.

МАГНИТНЫЕ ПОДШИПНИКИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ МАГНИТАМИ

Необходимое для расчета размагничивающего поля H_p значение размагничивающего фактора N_p определяется через отношение $H/2R$. Современные магниты, которые используются в электромагнитных устройствах, имеют отношение толщины к характерному размеру полярной поверхности существенно меньше единицы, значит, для цилиндрических магнитов $H/2R \ll 1$ (R, H — радиус и высота магнита). Только при этом условии магниты могут создавать внешнее поле с максимальной энергией и магнитным потоком, а также достигается наибольшая сила их взаимодействия.

Расчеты размагничивающего фактора сплошных и полых цилиндрических тел удобно проводить, пользуясь выражением, полученным в работе [8], с применением метода фиктивных магнитных зарядов:

$$N_p = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1-\tau}{\lambda} - \frac{\lambda}{\pi(1-\tau)} \ln \left[1 + \left(\frac{1-\tau}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $\tau = \frac{r}{R}$; $\lambda = \frac{h}{2R}$ (r, R — внутренний и внешний радиусы; h — высота магнита).

Для цилиндрических магнитов следует принять $\tau = 0$. Приведенная формула отвечает двум обязательным граничным условиям: при $\lambda \rightarrow 0$ N_p стремится к единице, а при $\lambda \rightarrow \infty$ N_p — к нулю. Расчеты, произведенные по формуле (1), очень хорошо согласуются с данными, указанными в обзорной работе [9].

Напряженность внешнего поля цилиндрического магнита несколько увеличивается при сканировании вдоль радиуса от оси к краю магнита. Для оценки величины этого поля можно воспользоваться следующим выражением, которое описывает внешнее поле магнита вдоль его оси:

$$H_z = \frac{J}{2} \left[\frac{L+H}{\sqrt{R^2 + (L+H)^2}} - \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} \right], \quad (3)$$

где $L \equiv z$ – расстояние от полярной поверхности магнита.

Уравнение (2) для максимального значения поля при $L = 0$ можно выразить через параметр λ : $H_z = J\lambda/\sqrt{\lambda^2 + 1}$. Отсюда становится понятно, что по мере уменьшения параметра λ внешнее поле уменьшается, однако внутреннее размагничивающее поле растет.

Остановимся на рассмотрении подшипников с оптимальными по размерам цилиндрическими магнитами. Аналитические расчеты показали, что оптимальными являются магниты, у которых параметр $\lambda = 0,42$, а размагничивающий фактор для них $N_p \approx 0,49$. Это значит, что оптимальные магниты находятся в некотором состоянии с магнитной энергией, близкой к максимальному значению.

Максимальная сила $F_{\max}$ взаимодействия (при зазоре, стремящемся к нулю) между двумя соосно расположенными цилиндрическими магнитами оптимальных размеров выражается как

$$F_{\max} = 0,45 \cdot \mu_0 J^2 V^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где $V = 2,6 R^3$ – объем магнита.

Обычно в техническом задании на разработку магнитопассивного подшипника дается сила $F_{\max}$, поэтому по формуле (4) можно определить объем оптимального магнита и затем легко рассчитать его размеры.

Поле постоянного магнита можно описать в безразмерном виде, воспользовавшись результатами работы [7] и некоторой интегральной функцией ψ , зависящей от параметров H/R , L/R , ρ/R , z/R : $H_z/J = \psi(H/R, L/R, \rho/R, z/R)$. Отсюда следует, что оптимальные магниты имеют подобную структуру магнитных полей. При этом безразмерные параметры являются тривиальными геометрическими критериями подобия, нетривиальный критерий имеет вид H_z/J . Результат расчета поля, создаваемого оптимальным цилиндрическим магнитом, приведен на рис. 2. Графики, характеризующие магнитное поле магнита, представлены в безразмерных координатах и являются универсальными для всех магнитов, поскольку учитывают приведенные критерии подобия.

Графики на рис. 2 (кривые 1, 2) показывают изменение размагничивающего поля по оси магнита и в среднем сечении. Из них видно, что фактическое размагничивающее поле может быть почти на 40 % выше, чем определенное с помощью баллистического размагничивающего фактора, и это следует учитывать в формуле (1) через величину H_n , чтобы не допустить локального размагничивания магнита.

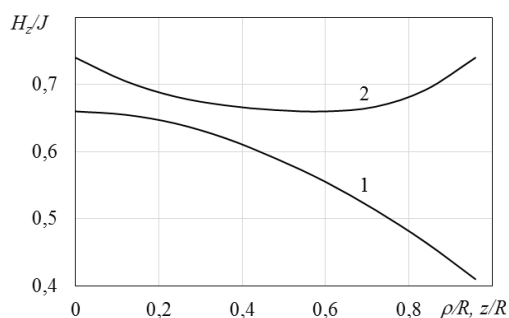


Рис. 2. Изменение относительного размагничивающего поля H_z/J вдоль радиуса (при $z = -h/2$) (1) и вдоль оси z (при $\rho = 0$) (2)

В результате численных расчетов было установлено, что размагничивающее поле от цилиндрического магнита имеет максимум, зависящий от величины полярного радиуса и расстояния z от поверхности (величины зазора L). По мере удаления от поверхности магнита положение максимума смещается от края магнита к центру. Величину максимального поля на расстоянии L от магнита радиуса R можно определить по приближенной формуле

$$H_s \approx J \exp(-7,3 L/R - 0,96). \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что поверхностный слой магнита в подшипнике может находиться под воздействием размагничивающего поля, на 20–30 % превышающего собственное размагничивающее поле магнита.

Приведенные сведения показывают, что для исключения непредвиденного снижения расчетной несущей способности подшипников с оптимальными цилиндрическими магнитами необходимо, чтобы критическое размагничивающее поле материалов магнитов удовлетворяло следующему требованию: $H_k > 0,87J + H_n$.

ПОДШИПНИКИ С КОЛЬЦЕВЫМИ МАГНИТАМИ

Размагничивающий фактор, необходимый для вычисления собственного размагничивающего поля H_s при $\lambda \lesssim 1$, можно достаточно точно определить из формулы (2).

Кольцевые магниты, наиболее перспективные для применения в магнитных подшипниках, имеют отношение ширины магнита к среднему радиусу $2(R-r)/(R+r) \ll 1$, поэтому размагничивающее поле таких магнитов в интересующей нас области $r < \rho < R$ можно вычислить с точностью до 15 % по формуле, полученной для постоянного магнита в виде бесконечной пластины с размерами сечения $(R-r) \times H$:

$$H_s = \frac{J}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{R-r}{2L} - \arctg \frac{R-r}{2(L+H)} \right]. \quad (6)$$

Значит, силовые свойства подшипников будут стабильны при любых зазорах L , если критическое поле для материала магнитов

$$H_k > N_R J + \frac{J}{\pi} \arctg \frac{R-r}{2H} + H_n. \quad (7)$$

Для предупреждения размагничивания в средней части магнита следует увеличить значение поля, равное $N_R J$, на 10–20 %.

Оптимальные кольцевые магниты имеют следующие относительные размеры: $r/R \approx 0,64$; $h/2R = h/D \approx 0,13$. При таких размерах размагничивающий фактор $N_p \approx 0,52$, а поэтому их магнитная энергия близка к максимальному значению.

Наибольшее размагничивающее поле в объеме рассматриваемого магнита более чем на 25 % превосходит значение поля, определенного посредством коэффициента N_p . Внешнее размагничивающее поле оптимального цилиндрического магнита достаточно однородно и не превышает $H_e \approx 0,3 J$. Суммарное размагничивающее поле $H_e + H_p$ в кольцевом магните, вычисленное аналитическим методом, слабо зависит от полярного радиуса – величина его проходит через максимум в центре магнита и всего лишь на несколько процентов меньше, чем на краях магнита.

Кольцевые магниты с оптимальными размерами создают меньшее размагничивающее поле, чем цилиндрические того же объема. Различие становится заметнее по мере увеличения радиусов кольцевого магнита. Обобщенное наиболее жесткое требование к материалам оптимальных по размерам кольцевых магнитов должно быть следующим: $H_k > 0,96 J_r + H_n$.

Максимальная сила рассматриваемых магнитов ($L \sim 0$) в зависимости от объема определяется по приближенной формуле

$$F_{\max} = 0,53 \cdot \mu_0 J^2 V^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Удельная магнитная сила взаимодействия (см. формулы (3), (8)) кольцевых магнитов выше, чем цилиндрических, только при малых зазорах $L < 0,1 \text{ мм}$. Если известна необходимая несущая способность подшипника, то по формуле (8) находится объем магнитов, а затем с помощью геометрических критериев оптимальности вычисляются реальные размеры магнитов и выбирается конкретный материал для магнитов с учетом требования к коэрцитивной силе.

ПОДШИПНИКИ С МАГНИТАМИ В ВИДЕ УСЕЧЕННОГО КОНУСА

Магниты имеют следующие геометрические параметры: R – радиус большего основания магнита; h – высота магнита; j – угол между основанием и образующей конуса. Магниты в подшипнике направлены друг к другу большими основаниями. Для оптимальных по размерам конусообразных магнитов получены геометрические критерии, которые имеют такой вид: $h/R = 1$, $j = 2\pi/3$. Нормальная сила взаимодействия конусообразных оптимальных магнитов на ~5–10 % выше, чем сила взаимодействия цилиндрических магнитов ($h/R = 0,84$) такого же объема.

Баллистический размагничивающий фактор N_p , определенный из анализа топографии поля в среднем сечении магнита, приблизительно равен 0,51. Однако в области, близкой к большей полярной поверхности магнита, размагничивающее поле существенно выше, поэтому целесообразно при выборе магнито жестких материалов принять $N_p \approx 0,85$. Внешнее размагничивающее поле оптимальных магнитов при постоянном L незначительно уменьшается от оси магнита к его краю. Наибольшее размагничивающее поле, создаваемое оптимальным конусообразным магнитом в зависимости от расстояния L до полярной поверхности, можно достаточно точно определить по формуле $H_e \approx J \exp(-1,2 L/R - 2,2)$.

Общее размагничивающее поле $H_e + H_R$ при нулевом зазоре между конусообразными магнитами очень близко к значению, равному намагниченности магнитов J .

ПОДШИПНИКИ С ПРИЗМАТИЧЕСКИМИ МАГНИТАМИ

В магнитных подшипниках, предназначенных для разгрузки механических подшипников или других трущихся узлов машин и механизмов, удобно и целесообразно устанавливать магниты в виде правильной призмы с квадратным сечением, которые намагничены вдоль ребра призмы. Оптимальные магниты имеют соотношение размеров $h/a = 0,42$, где h – высота призмы; a – сторона квадрата в основании.

Максимальная сила взаимодействия оптимальных призматических магнитов выражается как

$$F_{\max} = 0,47 \cdot J^2 V_s^{\frac{2}{3}}, \quad (9)$$

а максимальная магнитная сила в расчете на единицу полярной поверхности как

$$f_{\max} = 0,56 \mu_0 J^2.$$

Для нахождения размагничивающего фактора призматического магнита предлагают [10] воспользоваться формулой

$$N_p = \left[1 + 1,77 \frac{h}{a} \left(\frac{2h}{a} + 1 \right)^{1/2} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что размагничивающий фактор оптимального призматического магнита N_p , как и следовало ожидать, равен 0,5. Приведенное значение N_p позволяет определить среднее значение напряженности размагничивающего поля в средней части магнита, локальная же величина размагничивающего фактора в центральной части магнита достигает 0,79J. Для практических расчетов рабочей точки магнитов рекомендуем находить размагничивающий фактор по формуле

$$N_p = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{1,2}{h/a \cdot \sqrt{2+h^2/a^2}}. \quad (11)$$

Величина H_z внешнего (размагничивающего) магнитного поля призматического магнита увеличивается от центра магнита к периферии примерно в 2–2,5 раза. Для расчета внешнего поля H_z на расстоянии L от центра полярной поверхности магнита можно воспользоваться формулой

$$H_z = \frac{J}{\pi} \cdot \left[\arctg \frac{a^2}{2L \cdot \sqrt{2a^2 + 4L^2}} - \arctg \frac{a^2}{2(L+h) \cdot \sqrt{2a^2 + 4(L+h)^2}} \right]. \quad (12)$$

При сближении магнитов однополярными поверхностями до зазора $L = 0$ размагничивающее поле $H_z + H_p$ в центральной области приповерхностного слоя стремится к максимально возможному значению, равному J . Менее подвержены воздействию высоких размагничивающих полей области магнита, примыкающие к боковым граням.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы изучались размагничивающие поля в магнитопассивных подшипниках с магнитами, имеющими все наиболее важные для практики формы: цилиндрическую, кольцевую, призматическую и конусную. Предложены подходы для расчета размагничивающих полей в подшипниках с магнитами произвольных размеров, основанные на подобии магнитных систем.

В исследовании определены безразмерные критерии оптимальных по размерам магнитов, имеющих разные формы, при выполнении которых достигается заданная несущая способность или жесткость подшипников при минимальных затратах дорогостоящего магнитомягкого материала. Установлено, что при оптимальных размерах

магнитов их магнитная энергия близка к максимальной. Усредненная напряженность собственного размагничивающего поля магнитов численно равна приблизительно половине остаточной намагниченности. В отдельных оговоренных областях магнита собственное размагничивающее поле может быть существенно выше, и это необходимо учитывать при расчете магнитных систем подшипников.

Внешнее размагничивающее поле, действующее на сопряженные магниты, нелинейно возрастает при уменьшении зазора между ними. Даны рекомендации по расчету характерных значений этого поля.

При нулевом зазоре между сопряженными магнитами напряженность размагничивающего поля в отдельных областях магнитов достигает значения, численно равного остаточной намагниченности.

Наиболее общий вывод исследования заключается в том, что коэрцитивная сила по намагниченности материала магнитов для силовых механизмов должна быть не менее чем на 10–20 % выше остаточной намагниченности магнитов.

В основном во всех приведенных уравнениях, необходимых для оценки размагничивающих полей, геометрические свойства магнитов выражены через безразмерные параметры. Таким образом, полученные в работе результаты могут быть легко распространены на подобные магнитные системы в других типах магнитных силовых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yonnet J.P. Passive Magnetic Bearings with Permanent Magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1978. No. 2. P. 803–805.
2. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние температуры на несущую способность пассивных магнитных подшипников // *Справочник. Инженерный журнал*. 2022. № 8 (305). С. 23–28.
3. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Tribology of Bearings and Guides with Magnetic Loading Off // *Journal of Friction and Wear*. 1995. Vol. 16. No. 6. P. 1048–1069.
4. Slininger T.S., Chan W.Y., Severson E.L., Jawdat B.M. An Overview on Passive Magnetic Bearings // *2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 2021. URL: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10319990> (дата обращения: 15.03.2025).
5. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
6. Zhu Z.Q., Howe D. Halbach Permanent Magnet Machines and Applications: a Review // *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2001. Vol. 148. No. 4. P. 299–308.
7. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
8. Лаптева К.А., Толмачев И.И. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 2. С. 140–144.
9. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. Минск: Беларуская навука, 2015. 243 с.

10. Моисеева Н.С., Резчикова И.И., Королев Д.В., Могргунов Р.Б., Пискорский В.П. Ограничение допустимой коэрцитивной силы, вызванное полем рассеяния магнита // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 7. С. 1055–1058.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛОТОВ Александр Николаевич – ученый секретарь ученого совета ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

НОВИКОВА Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: onvk@mail.ru

НОВИКОВ Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vnvkv@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Выбор магнито жестких материалов для оптимальных магнитопассивных подшипников // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 40–49.

SELECTION OF MAGNETIC-HARD MATERIALS FOR OPTIMAL MAGNETOPASSIVE BEARINGS

A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Novikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In modern high-tech equipment, magnetically passive bearings are used mainly to unload mechanical bearings or as part of active electromagnetic suspensions. The paper develops recommendations for a reasonable choice of magnetically hard materials for optimal magnets of magnetic power devices, taking into account the features of their operation, geometric dimensions, design of the magnetic circuit of the bearing and under the condition of maintaining residual magnetization at the highest level. Magnets of the most popular shapes are considered - cylindrical, ring, prismatic and conical. Dimensionless criteria for optimally sized magnets have been defined, which, when met, achieve the specified load-bearing capacity or rigidity. It has been established that the coercive force by magnetization of the magnet material for power mechanisms should be no less than 10–20 % higher than the residual magnetization of the magnets.

Keywords: magnetopassive bearings, magnetically hard materials, coercive force by magnetization, magnetization of magnets, demagnetizing magnetic field of a magnet.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BOLOTOV Alexander Nikolaevich – Academic Secretary of the Academic Council of Tver State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

NOVIKOVA Olga Olegovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: onvk@mail.ru

NOVIKOV Vladislav Vladislavovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vnvkv@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Selection of magnetic-hard materials for optimal magnetopassive bearings // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 40–49.

УДК 669.187:621.186

**ВЗАИМОСВЯЗЬ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ДРУГИХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ПРИКЛАДНОЙ НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

А.Н. Макаров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2025

Аннотация. В статье изложены причины низкой конкурентоспособности некоторых отраслей российской промышленности. Отмечено, что в компаниях промышленно развитых стран (ПРС) 55 % персонала занято непосредственно на производстве продукции, 5–10 % – в научно-исследовательских центрах (НИЦ) прикладными научно-исследовательскими работами, 5–10 % трудятся в проектно-конструкторских и аналитических центрах, 15–20 % – в инжиниринговых и сервисных центрах (ИЦ, СЦ). Данная структура позволяет компаниям ПРС выпускать и продавать по всему миру высококонкурентную продукцию. В ряде российских компаний вышеизложенная структура отсутствует, что не позволяет им выйти на высокий уровень. Предложено создавать в российских компаниях НИЦ, ИЦ, СЦ с численностью персонала 15–20 % от всего штатного состава для выпуска качественной продукции и завоевания мирового рынка.

Ключевые слова: промышленная продукция, прикладные научно-исследовательские работы, инжиниринговые центры, сервисные центры.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-49-57