

ON THE CORRELATION OF MECHANICAL AND ELECTROEROSIVE WEAR RESISTANCE OF NiCrBSi ALLOY

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: iz2v2@mail.ru

Comparative experimental data on the electrical erosion and abrasive wear resistance of the NiCrBSi powder composite alloy are presented, and its hardness and specific electrical resistance are determined. The experiments revealed a correlation between the characteristics of electrical erosion and abrasive wear for the studied samples of this material, which was noted in the literature and observed by the authors earlier for copper-based composite materials. The specific electrical resistance of the material of the studied nickel alloy samples is tens of times higher than the specific electrical resistance of copper and is comparable to the specific electrical resistance of chromium-nickel stainless steels or gray cast irons, which are used in brush-ring sliding electrical contacts. The characteristics of mechanical wear resistance correspond to 6th or 7th wear resistance class out of 13 possible, which is a middling result. Electrical erosion wear resistance of the studied nickel alloy is also moderate and is comparable to the wear resistance of copper.

Keywords: nickel alloy, plasma surfacing, hardness, specific electrical resistance, mechanical and electrical erosion wear resistance, correlation.

Поступила в редакцию/received: 27.05.2025; после рецензирования/revised: 02.06.2025;
принята/accepted: 05.06.2025

УДК 621.82

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-12-21

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ВЕЛИЧИНЫ РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ В МАГНИТОПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКАХ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

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

В статье проведен анализ величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающихся постоянных редкоземельных магнитов и выработан общий аналитический подход к описанию силовых свойств магнитов магнитопассивных подшипников. Изучены причины, приводящие к снижению магнитных свойств в пассивных магнитных подшипниках. Установлено, что основными причинами являются температурные поля, механические напряжения, внешние и внутренние размагничивающие магнитные поля. Проведен расчет внешнего и внутреннего размагничивающих полей для элементарной магнитной системы магнитопассивного подшипника, состоящей из двух соосно расположенных магнитов различной формы.

Применяя результаты работы, можно определить оптимальные размеры различных по форме магнитов для магнитопассивных подшипников.

Ключевые слова: магнитосиловые устройства, магнитопассивные подшипники, размагничивающие магнитные поля, коэрцитивная сила, намагниченность.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные магнитные и электромагнитные механизмы с постоянными магнитами начинают все более широко использоваться в современном высокотехнологичном станкостроении, приборостроении, нефтегазовой промышленности, аэрокосмическом и транспортном машиностроении [1–6].

Активное создание механизмов с магнитной связью – муфт, редукторов, подшипников, пружин, электрических генераторов и двигателей, фиксирующих устройств [7–9] началось во второй половине прошлого века после создания двух классов новых магнитожестких материалов на основе редкоземельных химических элементов [10], которые характеризуются высоким значением удельной магнитной энергии в сочетании с большой остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой. Для магнитосиловых устройств (муфт, подшипников, пружин) значение остаточной намагниченности важно потому, что в этих устройствах используются магнитные силы, возникающие при взаимодействии магнитов между собой или с ферромагнетиками, которые пропорциональны остаточной намагниченности во второй степени. Высокое значение коэрцитивной силы магнитожестких редкоземельных материалов позволяет эксплуатировать их в более широком диапазоне собственных и внешних размагничивающих магнитных полей.

Выделяют два класса редкоземельных магнитов [10]: на основе сплава самария и кобальта (самарий-кобальтовые магниты) и сплава, содержащего неодим, железо и бор (магниты типа фенебор). Магниты группы Sm–Co имеют остаточную индукцию 0,7...0,95 Тл, температурный коэффициент обратимых изменений остаточной намагниченности 0,035...0,045 %/°C и диапазон изменения рабочих температур от –70 до 300 °C. Магниты и сплавы Sm–Co обладают стойкостью к агрессивным средам, радиационному воздействию и способны эффективно работать в широком диапазоне температур; магниты достаточно прочны и могут использоваться в условия действия больших инерционных сил.

Остаточная индукция магнитов группы Nd–Fe–B существенно выше: 1...1,35 Тл, однако температурный коэффициент у них больше – 0,07...0,13 %/°C, а диапазон рабочих температур уже: –60...180 °C. Магниты Nd–Fe–B дешевле, но имеют низкую коррозионную стойкость и, как правило, требуют нанесения специальных защитных покрытий. Заметим, что ферритовые магниты, имевшие широкое распространение до появления редкоземельных магнитов, характеризуются остаточной индукцией не более 0,4 Тл и температурным коэффициентом 0,2 %/°C.

Магнитопассивные подшипники – автономно работающие трибоузлы, в которых износ труящихся деталей существенно снижен за счет компенсации нормальной нагрузки магнитными силами, – хорошо зарекомендовали себя в технических устройствах. Применение современных магнитов на основе редкоземельных элементов в магнитопассивных подшипниках позволило существенно повысить их эффективность за счет увеличения жесткости и несущей способности.

В зависимости от конструкции узла трения для магнитной разгрузки могут применяться магниты различных форм, возможно применение магнитной сборки Хальбаха из магнитов с разнонаправленной намагниченностью [11]. При проектировании современного магнитопассивного подшипника необходимо учитывать, что на силовые характеристики магнитов оказывает влияние внутреннее размагничивающее

поле, а также неоднородное размагничивающее поле от сопряженных магнитов. В результате непреднамеренного размагничивания постоянных магнитов возможно нарушение функциональных свойств магнитного подшипника, приводящее к значительному возрастанию трения в трибоузле. Для рационального выбора конструкции магнитопассивного трибоузла необходимо учитывать структуру и величину магнитных полей, возникающих в магнитных материалах приложении эксплуатационных нагрузок. Однако четкие рекомендации по выбору материалов для силовых устройств с постоянными магнитами, в которых учтены возможные необратимые изменения намагниченности, в настоящее время отсутствуют. При разработке таких рекомендаций следует принимать во внимание коэрцитивную силу магнитного материала при заданной температуре, форму кривой размагничивания и геометрические параметры магнитной цепи.

Цель работы заключалась в анализе величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающих постоянных магнитов, выполненных из редкоземельных химических элементов, и выработке общего аналитического подхода к описанию силовых свойств магнитов магнитопассивных подшипников.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАГНИТОВ В ПАССИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Рассмотрим причины, приводящие к ухудшению свойств магнитов в пассивных магнитных подшипниках. В основном любой магнитопассивный подшипник можно разбить на пары взаимодействующих между собой магнитов, поэтому для прогнозирования работоспособности подшипника в целом достаточно рассмотреть стабильность магнитных свойств магнитов, составляющих такую элементарную магнитную систему. Под работоспособностью подшипника в данном конкретном случае подразумевается способность магнитов создавать необходимые аксиальные и радиальные магнитные силы во всем диапазоне смещений вала, на котором они закреплены.

Для примера на рис. 1 показана магнитная система упорного магнитного подшипника, которая состоит из двух соосно расположенных магнитов цилиндрической формы с радиусами R_1 и R_2 и высотой h_1 и h_2 . Для компенсации внешних осевых сил, действующих на подшипник, магниты имеют противоположную осевую намагниченность.

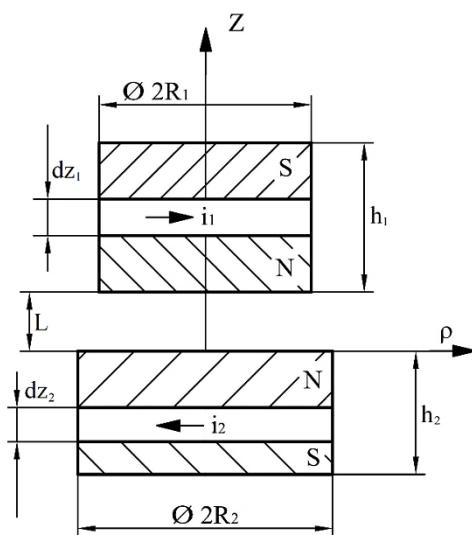


Рис. 1. Схема расположения постоянных магнитов в подшипнике

Будем полагать, что в подшипник установлены высококоэрцитивные промышленные магниты на основе редкоземельных элементов, основные свойства которых, а также стоимость по состоянию на 2025 год приведены в табл. 1.

Таблица 1. Магнитные свойства промышленных постоянных магнитов

Марка магнита	B_r , Тл	H_{cB} , кА/м	H_{cJ} , кА/м	W_{max} , кДж/м ³	Максимальная рабочая температура, °С	Цена за 1 кг, тыс. руб.
КС-37	0,77	540	1 300	55,0	300...350	15...30
КС-37А	0,82	560	1 000	65,0		
КСП-37	0,85	520	800	65,0		
КСП-37А	0,90	500	640	72,5		
N48	1,38...1,42	836...891	>955	366...390	80	4,5...9,0
N48M	1,38...1,44	1 019...1 114	>1 114	366...398	100	
N45H	1,33...1,39	>923	>1 353	342...366	120	
N45SH	1,33...1,39	>923	>1 592	342...366	150	
N35UH	1,17...1,22	836...891	>1 990	263...279	180	
N33EH	1,14...1,17	820...876	>2 388	247...263	200	

Примечание. B_r – остаточная индукция; H_{cB} , H_{cJ} – коэрцитивная сила по индукции и намагниченности; W_{max} – максимальная магнитная энергия.

Характерная для современных магнитотвердых материалов кривая размагничивания по намагниченности J представлена на рис. 2. Вначале, по мере возрастания напряженности размагничивающего поля H наблюдается линейный участок J_r –Е, который характеризуется незначительным обратимым уменьшением остаточной намагниченности. Далее на кривой размагничивания происходит снижение намагниченности вдоль «пятки» Е–С, после чего на участке С– H_{cJ} материал магнита полностью размагничивается. Точка Е на кривой размагничивания соответствует значению напряженности критического поля H_k , выше которого наблюдается необратимое уменьшение намагниченности магнитов.

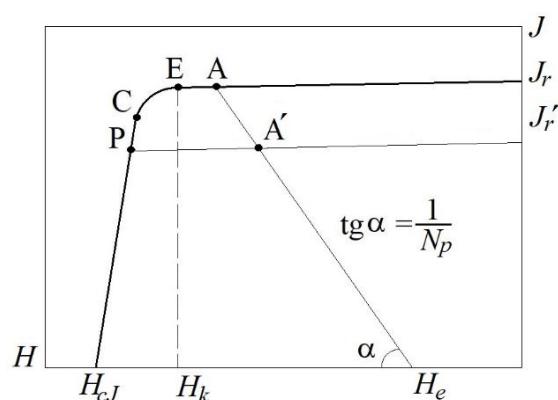


Рис. 2. Обобщенная кривая размагничивания магнита

Для оценки эффективности работы магнитопассивных подшипников необходимо задать намагниченность материалов постоянных магнитов в реальных условиях их эксплуатации. Для определения намагниченности магнитов заданной формы и конечных размеров требуется знать внутреннее размагничивающее магнитное поле, которое в свою очередь сложным образом зависит от остаточной намагниченности, а также от формы и геометрических размеров магнитов [12].

На рис. 3 показан цилиндрический магнит, имеющий однородную намагниченность J , направленную параллельно оси магнита. На торцевых поверхностях магнита наблюдается скачок вектора намагниченности от значения J в магните до нуля на внешней поверхности. В результате на поверхностях образуются фиктивные магнитные заряды, которые являются источником внутреннего магнитного поля, направленного противоположно намагниченности J и называемого поэтому размагничивающим полем H_p . Это поле является однородным только внутри крайне редко используемых магнитов в виде эллипсоидов. Для последующих расчетов будем использовать среднее значение собственного размагничивающего поля по нейтральному сечению магнита (сечение А–А на рис. 3). Величину размагничивающего поля можно выразить через намагниченность следующим образом: $H_p = N_p J$, где N_p – баллистический размагничивающий фактор, зависящий от формы и относительных размеров магнита. Определить намагниченность материала магнитов для подшипников, зная размагничивающий фактор, можно, решив приближенными методами уравнение (1) относительно переменной J . Более точное решение можно получить, определив графическим методом рабочую точку магнитов.

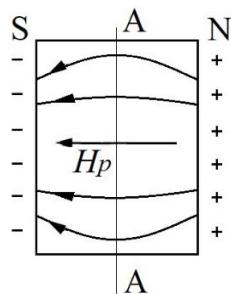


Рис. 3. Схема внутреннего размагничивающего поля магнита

Рабочую точку отдельного постоянного магнита А (A'), которая характеризует остаточную намагниченность материала магнита, получают на пересечении луча, проведенного из начала координат, с кривой размагничивания или линией магнитного возврата. Абсцисса рабочей точки, определенная по графику, соответствует остаточной намагниченности материала магнита.

До тех пор пока рабочая точка остается на участке J_r –Е, намагниченность изменяется незначительно и обратимо. Если рабочая точка переместится вдоль колена кривой размагничивания (точка Р на рис. 2), то произойдет необратимое уменьшение намагниченности магнита J . После этого рабочая точка магнита, например, при наложении внешнего размагничивающего поля будет перемещаться по кривой магнитного возврата Р– J_r . Для всех рассматриваемых магнитотвёрдых материалов линии магнитного возврата достаточно хорошо аппроксимируются прямыми, параллельными касательной к кривой размагничивания в точке с координатами $J = J_r$, $H = 0$. Зная ход кривой магнитного возврата, легко определить намагниченность в любой рабочей точке, лежащей на ней.

Положение рабочей точки магнита, а значит, и намагниченность магнитов изменяется, если на магнит действует внешнее размагничивающее (намагничающее) магнитное поле H_e . В данном случае луч, определяющий положение рабочей точки магнита в отсутствие внешнего магнитного поля, необходимо провести под тем же углом, но из точки с координатами $J = 0, H = H_e$ (см. рис. 2). Как следует из рис. 2, неконтролируемое внешнее магнитное поле может создать опасность снижения намагниченности магнитов до недопустимого уровня, что приведет к потере работоспособности магнитопассивного подшипника.

Необратимое снижение намагниченности материала магнита начинается в полях, превышающих некоторое критическое значение H_k , соответствующее окончанию линейного участка изменения намагниченности в размагничивающих полях (точка Е на рис. 2). Поэтому суммарное размагничивающее поле, действующее на магнит, должно удовлетворять условию $H_e + H_p \leq H_k$. Величина критического магнитного поля более высокая у высококоэрцитивных материалов, и ее приблизительное значение определяется как $H_k \leq 0,95H_{cJ}$ для магнитов из сплава фенибор и $H_k \leq 0,5H_{cJ}$ для Sm-Co магнитов. Многие исследователи, например авторы [13], считают, что в рабочей точке магнитов намагниченность магнитожесткого материала должна превышать $0,9J_r$, однако это означает, что магнит подвергся частичному размагничиванию и его рабочая точка переместилась на некоторую частную кривую размагничивания магнитного возврата. При этом условии магнитосиловые характеристики подшипников будут примерно на 20 % ниже максимально возможных. Кривую размагничивания в области перегиба для магнитов из фенибора хорошо описывает следующая функция [17]:

$$\frac{J}{J_r} = 1 + 0,052 \frac{H}{H_{cJ}} - 0,95 \exp \left[-119 \left(1 + \frac{H}{H_{cJ}} \right) \right]. \quad (1)$$

Пользуясь выражением (1), легко определить величину размагничивающего поля, соответствующего любому допустимому значению остаточной намагниченности.

Важность проблемы работоспособности магнитопассивных подшипников в условиях воздействия на отдельные магниты размагничивающих полей возрастает при эксплуатации подшипников при повышенных температурах. На рис. 4 приведены кривые размагничивания материала фенибор марки N33 при трех значениях температуры.

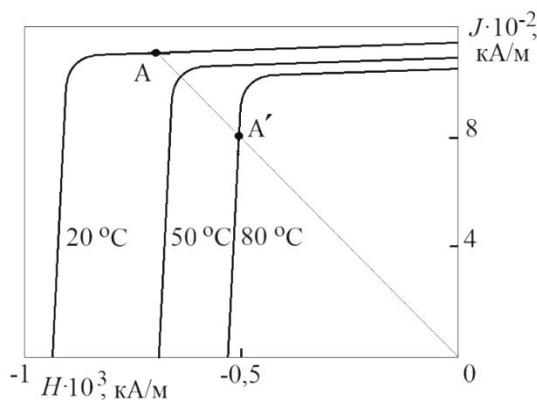


Рис. 4. Рабочая точка магнита фенибор N33 при различных температурах

На этом же графике указаны рабочие точки цилиндрического магнита с размагничивающим фактором $N_p = 0,5$ при относительных размерах $R / H \approx 0,45$. Из

рисунка видно, что при нормальной температуре магнит намагничен до насыщения, но при температуре выше 80 °С он начинает самопроизвольно размагничиваться под влиянием внутреннего поля H_p .

Показанные на рис. 4 температурные изменения намагниченности и коэрцитивной силы происходят в результате необратимого изменения магнитных свойств материалов постоянных магнитов, вызванного изменением магнитной структуры, фазового состава, а также в результате обратимого изменения, обусловленного температурной зависимостью намагниченности и коэрцитивной силы материала магнитов. Свойства постоянных магнитов еще более чувствительны к воздействию повышенных температур, потому что магнитожесткий материал магнитов находится под совокупным действием терромагнитных полей. Например, для Sm–Co-магнитов коэффициент необратимых изменений намагниченности при нагревании возрастает в 1,5 раза по сравнению с изменениями в материале магнитов в размагниченном состоянии. Величина необратимого снижения намагниченности магнитов зависит в основном от величины аксиальной составляющей размагничивающего магнитного поля. Влияние радиальной составляющей поля H_ρ (см. рис. 1) на магниты в основном сводится к небольшим обратимым поворотам вектора намагниченности. Значит, при изучении влияния размагничивающих полей на постоянные магниты следует учитывать не только изменение рабочей точки магнита, но и негативное действие на магнитное состояние материала магнитов.

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ

Данный расчет можно проводить аналитическим методом, в основе которого лежит вполне обоснованное допущение об однородной и изотропной намагниченности магнитов на основе редкоземельных элементов. Согласно гипотезе Ампера, постоянный магнит можно представить в виде равного ему по размерам соленоида с однослойной и очень тонкой обмоткой, по которой протекают элементарные токи $i_1 = J dz_1$ или i_2 (см. рис. 1) с постоянной плотностью, равной остаточной намагниченности магнита J [18, 19]. Для расчета магнитной напряженности поля внутри и снаружи магнита следует воспользоваться законами Био – Савара – Лапласа.

В магнитной системе, показанной на рис. 1, каждый из магнитов создает внешнее поле, которое является размагничивающим полем H_e для сопряженного магнита. Внешнее размагничивающее поле, например, действующее на магнит 1 со стороны сопряженного магнита 2, имеет две составляющие – аксиальную H_z и радиальную H_ρ , причем $H_z > H_\rho$.

На основании гипотезы Ампера о поверхностных токах в магнитах получено следующее выражение для расчета напряженности внешнего размагничивающего поля H_z в точке с координатами z_1 и ρ , создаваемого нижним магнитом (см. рис. 1):

$$H_z = \int_{-H_2}^0 \frac{J}{2\pi[(R_2+\rho)^2+(z_1-z_2)^2]^{1/2}} \left[E + \frac{R_2^2+\rho^2+(z_1-z_2)^2}{(R_2-\rho)^2+(z_1-z_2)^2} N \right] dz_2, \quad (2)$$

где $E = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \beta}}$ и $N = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \beta} d\beta$ ($a^2 = \frac{4R_2\rho}{(z_1-z_2)^2+(R_2+\rho)^2}$) – полные эллиптические интегралы первого и второго рода; μ_0 – магнитная постоянная; J – намагниченность рассматриваемого магнита.

Пользуясь тем же уравнением (1), можно вычислить среднюю напряженность размагничивающего поля в нейтральном сечении магнита ($H_\rho=0$) и после этого легко определить размагничивающий фактор магнита.

Аксиальную силу взаимодействия цилиндрических магнитов, определяющую несущую способность упорного магнитопассивного подшипника, можно рассчитать по формуле

$$F_z = \mu_0 J^2 \int_{-H_2}^0 \int_L^{L+H_1} \frac{(z_1 - z_2)}{[(R_1 + R_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{1/2}} \times \left[-E + \frac{R_2^2 + R_2^2 + (z_1 + z_2)^2}{(R_1 - R_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} N \right] dz_1 dz_2, \quad (3)$$

где L – расстояние между магнитами.

Пользуясь формулой (3), авторы определяли оптимальные размеры различных по форме магнитов для магнитопассивных подшипников. Оптимальными считались магниты с такими размерами, сила взаимодействия которых в расчете на единицу объема магнитожесткого материала была максимальной. По существу, смысл критерия оптимальности магнитов сводится к минимизации затрат при изготовлении подшипников на дорогостоящие магнитожесткие материалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во многих современных устройствах используются постоянные магниты для создания усилий между соответствующими конструктивными элементами. Стабильность силовых свойств таких механических устройств зависит от конструкции магнитной системы, условий ее эксплуатации и свойств магнитожестких материалов.

При проектировании магнитосиловых устройств, как правило, основное внимание уделяют учету температурных полей и механических напряжений в постоянных магнитах. Однако причиной недопустимых изменений характеристик магнитов во многих случаях является влияние на их свойства внешних и внутренних размагничивающих магнитных полей. Когда размагничивающее поле превышает некоторое критическое значение, происходит необратимое размагничивание магнитов и снижение силы взаимодействия между ними. Причем, рассматривая последствия уменьшения остаточной намагниченности, необходимо учитывать, что между магнитной силой и намагниченностью существует квадратичная зависимость. Нагревание магнитов усугубляет негативную роль размагничивающих полей.

Решалась задача описания величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающихся постоянных магнитов, выполненных из редкоземельных химических элементов. Ее актуальность объясняется отсутствием четких рекомендаций по выбору материалов для магнитопассивных подшипников и других силовых устройств с постоянными магнитами, в которых учтены возможные необратимые изменения намагниченности.

В качестве примера рассмотрена элементарная магнитная система магнитопассивного подшипника, состоящая из двух соосно расположенных магнитов различной формы. Предполагалось, что магниты изготовлены из современных высококоэрцитивных материалов с близкой к прямоугольной петле размагничивания по намагниченности. Для описания напряженности магнитного поля внутри и снаружи магнита использовались аналитические расчеты поля постоянного магнита, основанные на методе эквивалентного соленоида.

ЛИТЕРАТУРА

1. McGilton B., Crozier R., McDonald A., Mueller M. Review of magnetic gear technologies and their applications in marine energy // *IET Renewable Power Generation*. 2018. V. 12. № 2. P. 174–181.

2. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E. Practical aspects of modern and future permanent magnets // *Annual Review of Materials Research*. 2014. V. 44. № 1. P. 451–477.
3. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
4. Coey J.M.D. Perspective and prospects for rare earth permanent magnets // *Engineering*. 2020. V. 6. № 2. P. 119–131.
5. Fastenau R.H.J., Van Loenen E.J. Applications of rare earth permanent magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. V. 157. P. 1–6.
6. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Линейная магнитная муфта возвратно-поступательного перемещения // *Вестник машиностроения*. 2022. № 7. С. 10–16.
7. Falkowski K., Henzel M. High Efficiency Radial Passive Magnetic Beating // *Solid state phenomena*. 2010. V. 164. P. 360–365.
8. Болотов А.Н., Новикова О.О. Контроль намагниченности промышленных постоянных магнитов для магнитосиловых механических систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 40–46.
9. Yonnet J.P. Passive magnetic bearings with permanent magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1978. № 2. P. 803–805.
10. Тишин А.М. Перспективы применения редкоземельных постоянных магнитов в электроприводах специального назначения. К 100-летию использования постоянных магнитов в технике // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2017. № 1(19). С. 175–192.
11. Zhu Z.Q., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2001. V. 148. № 4. P. 299–308.
12. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н. [и др.]. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятна. М.: Энергия, 1980. 486 с.
13. Канцырев А.В., Скачков В.С., Панюшкин В.А. [и др.]. Квадрупольные линзы на постоянных магнитах для прототипа протонного микроскопа PRIOR // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 5. С. 92–103.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Оценка структуры и величины размагничивающих полей в магнитопассивных подшипниках // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 12–21.

EVALUATION OF THE STRUCTURE AND MAGNITUDE OF DEMAGNETIZING FIELDS IN MAGNETIC BEARINGS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

The analysis of the magnitude and topography of demagnetizing fields for repulsive permanent rare earth magnets has been carried out and a general analytical approach to describing the force properties of magnets of magnetic bearings has been developed. The reasons leading to a decrease in magnetic properties in passive magnetic bearings have been studied. It has been established that the main causes are temperature field, mechanical stress,

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (28), 2025*

external and internal demagnetizing magnetic fields. The calculation of the external and internal demagnetizing fields for an elementary magnetic system of a magnetic mass bearing consisting of two coaxially arranged magnets of various shapes is carried out. Applying the results of the work, it is possible to determine the optimal size of madness of various shapes for magnetic bearings.

Keywords: magnetoforce devices, magnetopassive bearings, demagnetizing magnetic fields, coercive force, magnetization.

Поступила в редакцию/received: 08.04.2025; после рецензирования/revised: 25.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 620.179.118.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-21-28

О ПАРАМЕТРАХ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлова В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены результаты исследования микрорельефа поверхностей образцов из титанового сплава после операции электроэррозионной резки. Определен набор стандартных и нестандартных параметров профиля микрорельефа, а также их соотношений, по которым можно судить о характере профиля шероховатости. Показано, что распределение ординат профиля хорошо описывается нормальным распределением, а также бета-распределением. Это дает основания представить профиль исследованной поверхности в виде широкополосного нормального случайного процесса и использовать возможности данной модели для статистической оценки дополнительных параметров шероховатости. Показано также, что параметры шероховатости поверхностей после электроэррозионной резки сопоставимы с аналогичными параметрами поверхностей после газолазерной резки и механической обработки (шлифования), и это свидетельствует об их общей стохастической природе.

Ключевые слова: титановый сплав, электроэррозионная резка, шероховатость, статистические параметры, профильный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Микрорельеф технической поверхности (волнистость, шероховатость, субшероховатость) является одной из основных характеристик ее качества и определяет многие ее свойства – от чисто декоративных до принципиально важных эксплуатационных. Параметры микрорельефа, определяющие эксплуатационные свойства поверхности, зависят как от режимов технологической обработки поверхности, так и от свойств обрабатываемого материала. Связь технологических режимов обработки технических поверхностей и параметров их качества была и остается предметом многочисленных исследований. Наиболее изучены поверхности после различных видов механической обработки, однако с появлением новых технологических методов обработки и новых методов исследования качества