

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891+537.523

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-5-12

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СПЛАВА NiCrBSi

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 сравнительные экспериментальные данные по электроэрозионной и механической (абразивной) износостойкости порошкового композиционного сплава NiCrBSi, определены его твердость и удельное электросопротивление. Эксперименты выявили корреляцию характеристик электроэрозионного и абразивного изнашивания, отмечавшуюся в литературе и наблюдавшуюся авторами ранее для композиционных материалов на основе меди, также для исследованных образцов данного материала. Удельное электросопротивление никелевого сплава в десятки раз превышает удельное электросопротивление меди и сравнимо с удельным электросопротивлением хромоникелевых нержавеющих сталей или серых чугунов, которые используются в скользящих электрических контактах «щетка – кольцо». Характеристики механической износостойкости соответствуют 6–7-му классу износостойкости из 13 возможных, что является средним результатом. Электроэрозионная износостойкость исследованного никелевого сплава также невысока и сравнима с износостойкостью меди.

Ключевые слова: никелевый сплав, плазменная наплавка, твердость, удельное электросопротивление, механическая и электроэрозионная износостойкость, корреляция.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья логически продолжает предыдущую работу авторов [1], в которой рассматривается корреляция механической и электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов на основе меди. Приводятся результаты исследования износостойкости перспективного материала – порошкового никелевого сплава состава NiCrBSi [2]. Данный материал широко используется в настоящее время для восстановления изношенных деталей машин и во многих случаях характеризуется коррозионной стойкостью, а также механической износостойкостью в условиях адгезионного, абразивного и фреттинг-изнашивания [3–7]. При этом электроэрозионная износостойкость данного материала практически не исследована. Цель данной работы – экспериментальное исследование электроэрозионного изнашивания сплава NiCrBSi и сопоставление характеристик его электроэрозионной износостойкости с аналогичными характеристиками в режиме механического изнашивания.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись образцы покрытия из порошкового сплава NiCrBSi на подложке из алюминиевой бронзы БрА9Ц8Н15, полученные плазменной наплавкой. Технология и режимы наплавки описаны в работе [2]. Испытания на

механическое и электроэррозионное изнашивание проводили на трех образцах исследуемого материала, полученных при различных значениях тока сварочной дуги: 66 А (образец № 1), 83 А (образец № 2) и 94 А (образец № 3). Для сравнения таких различных по своему механизму видов изнашивания, как механическое и электроэррозионное, удобно использовать относительные характеристики, приняв некоторый материал за эталон. В данном исследовании таким эталоном был выбран типичный электроконтактный материал – медь марки М1 (образец № 4).

Так как электроэррозионная износостойкость представляет интерес прежде всего с точки зрения использования материала в качестве электроконтактного, помимо величины износа дополнительно определяли такие физико-механические свойства исследуемого материала, как твердость и удельное электросопротивление.

Микротвердость HV определяли согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 1,96 Н, твердость индентирования H_{IT} – согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) при нагрузках на индентор 90 и 180 Н.

Удельное сопротивление сплава NiCrBSi определяли известным четырехзондовым методом, схема которого показана на рис. 1. Зонды 1 и 4 подключаются к источнику постоянного тока, зонды 2 и 3 – к милливольтметру, который измеряет разность потенциалов U_{23} при известной силе тока I_{14} . Удельное электросопротивление рассчитывали по формуле

$$\rho = 2\pi S \frac{U_{23}}{I_{14}},$$

где S – расстояние между зондами (в нашем случае $S = 1$ мм).

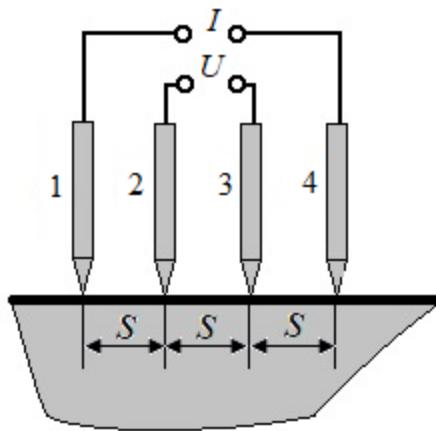


Рис. 1. Схема измерения удельного электросопротивления

Для оценки электроэррозионной износостойкости исследуемого материала в режиме импульсного разряда использовалась установка, схема рабочего узла которой приведена на рис. 2а.

Разряд возникает при периодическом замыкании и размыкании контакта цилиндрического вольфрамового электрода 1 диаметром 1 мм с образцом 2 из исследуемого материала, зафиксированным на латунном основании 3 прижимной пластиной 4 с центральным отверстием. Основание расположено на шпинделе 5, который перемещается в вертикальном направлении микрометрическим винтом, что позволяет регулировать как зазор контакта, так и контактное нажатие. Электрод вместе с

держателем 6 совершают возвратно-поступательные перемещения в вертикальной плоскости от механического привода, обеспечивающего частоту коммутаций (число циклов «замыкание – размыкание») $n_u = 20 \text{ мин}^{-1}$.

Зазор контакта равен 7 мм, продолжительность включения – 50 %. Контактное нажатие 0,5 Н, постоянное во всех экспериментах, обеспечивалось с помощью разновесов, помещаемых на держатель электрода. Импульсный разряд в контакте создавался с помощью емкостного накопителя энергии, величина коммутируемого заряда $Q \approx 66 \text{ мКл}$.

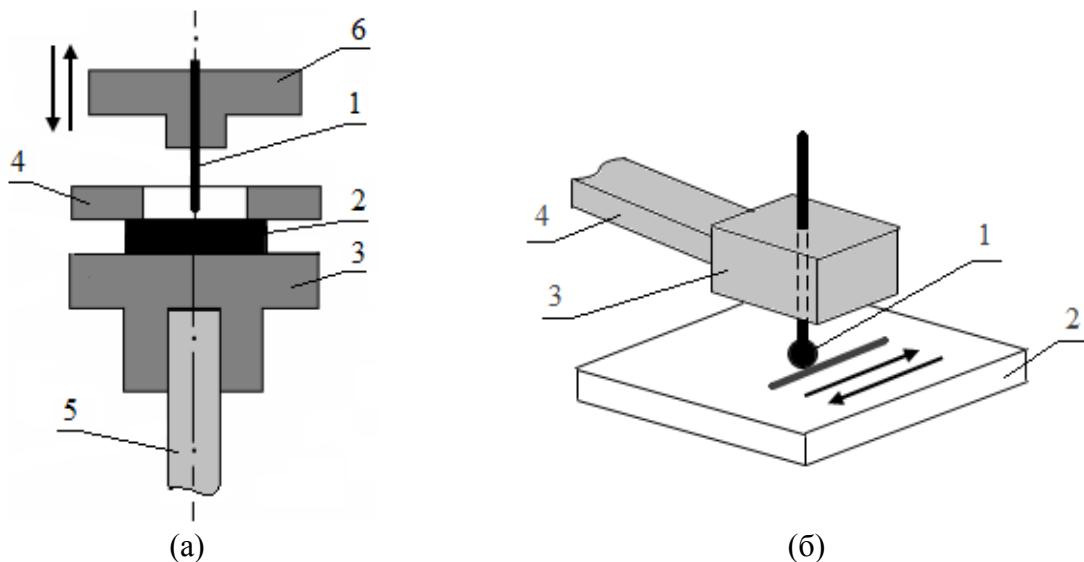


Рис. 2. Схемы рабочих узлов установок для испытаний материалов на изнашивание: электроэррозионное (а); механическое (абразивное) (б)

После испытаний измеряли линейный износ образцов, т. е. уменьшение длины вольфрамового электрода и глубину лунки на образце из исследуемого материала. Точность измерений 0,01 мм. В качестве характеристик электроэррозионной износстойкости используют объемную и массовую эрозию в расчете на один цикл коммутации, объемную и массовую эрозию в расчете на единицу коммутируемого заряда Q и другие величины. В данной работе мы использовали в качестве характеристики электроэррозионной износстойкости линейный износ за один цикл коммутации i_{he} – величину, аналогичную такой же характеристике для механического изнашивания. Линейная i_{he} и объемная i_{Ve} величины эрозии за один цикл связаны очевидной функциональной зависимостью:

$$i_{he} = \frac{i_{Ve}}{\pi r^2},$$

где r – радиус лунки, практически равный радиусу электрода. Объемную эрозию в расчете на единицу коммутируемого заряда i_Q в свою очередь легко вычислить по величине объемной эрозии за один цикл коммутации:

$$i_Q = \frac{i_{Ve}}{Q},$$

где Q – величина коммутируемого заряда.

Для оценки механической износостойкости материала NiCrBSi применяли метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы по схеме шар – плоскость (см. рис. 2б). В качестве шарового контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40...50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку в 0,5 Н. Износостойкость определяли в процессе возвратно-поступательных движений шарового контробразца 1 по плоской поверхности исследуемого образца 2. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца, закрепленного в обойме 3, сопряженной с электромеханическим приводом 4 с питанием от генератора импульсов, происходили с частотой 20 Гц. За один цикл путь трения составлял 5 мм. Длительность испытания составляла 20 мин.

Износостойкость материала, полученного порошковой плазменной наплавкой, значительно отличается по ширине наплавки (т. е. в центральной части и ближе к внешнему краю валика наплавленного материала) [8], поэтому в данных экспериментах канавки изнашивания располагали перпендикулярно валику наплавки.

После испытаний проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали характеристики изнашивания исследуемого покрытия. Для характеристики механической износостойкости использовали стандартные параметры по ГОСТ 27674-88: линейную I_h и объемную I_V интенсивности изнашивания, среднюю скорость изнашивания u , а также нестандартные параметры: линейный износ за цикл i_h ; безразмерный коэффициент износа k и объемную интенсивность изнашивания в расчете на единицу нормальной нагрузки (размерный коэффициент износа) [9]. Последние два параметра фигурируют в известном в трибологии уравнении Арчарда:

$$I_V = \frac{V}{L} = k \frac{N}{H},$$

где V – объем изношенного материала; L – путь трения; N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость (микротвердость) более мягкого материала пары трения. Отношение $k / H = I_V / N$ называют размерным коэффициентом износа [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики твердости исследуемого материала (сплава NiCrBSi) и меди М1 как эталона представлены в табл. 1. Сплав NiCrBSi обладает значительной твердостью, которая практически не зависит от нагрузки на индентор, по крайней мере в диапазоне 2...200 Н.

Таблица 1. Характеристики твердости исследованных материалов

Микротвердость HV , МПа	Твердость индентирования H_{IT} , МПа	
Сплав NiCrBSi	Сплав NiCrBSi	Медь М1
$5\ 300 \pm 60$	$5\ 414 \pm 318$	737 ± 21

Для удельного электросопротивления сплава NiCrBSi получено значение $\rho = 0,92 \pm 0,13 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, которое существенно превышает удельное сопротивление меди ($0,018 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), однако это не исключает возможности применения данного материала в электроконтактных соединениях. Его удельное электросопротивление сравнимо, например, со значениями удельного электросопротивления хромоникелевых нержавеющих сталей ($\rho \approx 0,7\ldots1,0 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), применяемых, в частности, для

изготовления контактных колец в средне- и тяжелонагруженных скользящих электроконтактных соединениях, или с удельным сопротивлением серого чугуна ($\rho = 0,4 \dots 1,2 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$), используемого для этих же целей [10, 11].

Характеристики механического и электроэрозионного износа исследованных образцов приведены в табл. 2. По величине механической износостойкости в условиях абразивного изнашивания образцы исследуемого никелевого сплава относятся к 6–7-му классу из 13, что является средним результатом. Полученные нами сравнительно невысокие оценки износостойкости исследуемого сплава согласуются с результатами работ [4–6], в которых для аналогичного никелевого сплава в режиме абразивного изнашивания получены значения линейной интенсивности изнашивания $I_h \sim 10^{-5}$ (4–5-й класс износостойкости). Возможные причины невысокой фрикционной износостойкости данного материала приводятся в работе [7]. В нашем случае это может объясняться неоптимальными технологическими режимами получения покрытия. Для сравнения, аналогичное по составу покрытие, полученное с помощью лазерных технологий, при испытаниях по аналогичной методике показало износостойкость на порядок выше (линейная интенсивность изнашивания I_h порядка 10^{-8}) [12].

Значения безразмерного коэффициента изнашивания k для исследованного материала близки к соответствующим значениям для инструментальных сталей и примерно на порядок больше, чем для нержавеющих сталей [9].

По абсолютным значениям электроэрозионной износостойкости исследуемый никелевый сплав примерно в два раза уступает композиционному электроконтактному материалу на основе меди с добавлением тугоплавких компонентов, испытанному по аналогичной методике [1].

Характеризуя электроконтактные свойства сплава NiCrBSi, помимо повышенного удельного электросопротивления необходимо отметить склонность исследуемого материала к свариванию контакта, выявленную в процессе наших экспериментов. Этот недостаток отмечается и для других сплавов никеля [9].

Таблица 2. Характеристики механического и электроэрозионного износа

Образец		Механическое изнашивание					Электрическая эрозия i_{he} , мкм/цикл
		$I_h, 10^{-7}$	$I_V, 10^{-14} \text{ м}^2$	$k, 10^{-4}$	$k / H, 10^{-8} \text{ МПа}^{-1}$	$i_h, \text{ нм/цикл}$	
NiCrBSi	№ 1	0,72	3,30	3,57	6,60	0,79	4,00
	№ 2	0,83	3,65	3,95	7,29	0,88	3,38
	№ 3	1,61	7,12	7,71	14,2	1,71	6,25
Cu	№ 4	2,50	6,67	0,98	13,3	1,33	6,72

На рис. 3 представлены относительные величины механического и электроэрозионного износа испытанных образцов. В целом отмеченная в литературе [13, 14] и подтвержденная нами в статье [1] тенденция к корреляции механической и электроэрозионной износостойкости материалов наблюдается и в данном случае, хотя и не так явно, как в случае материала на основе меди с добавками тугоплавких материалов.

Сопоставление относительных характеристик механического и электроэрозионного изнашивания (относительно меди), представленное на рис. 4, подтверждает этот вывод.

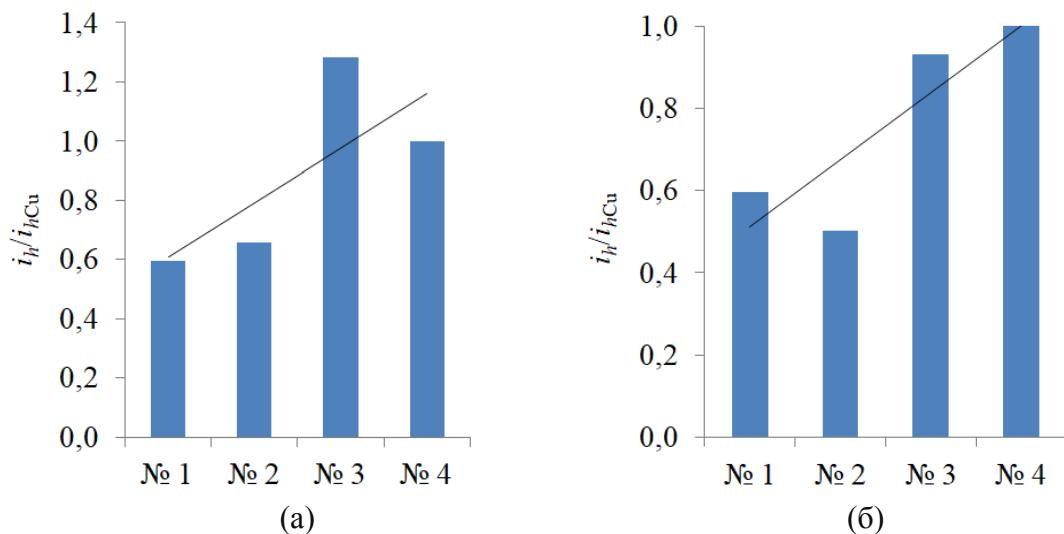


Рис. 3. Относительные величины износа: механического (а); электроэрозионного (б). Линия – тренд

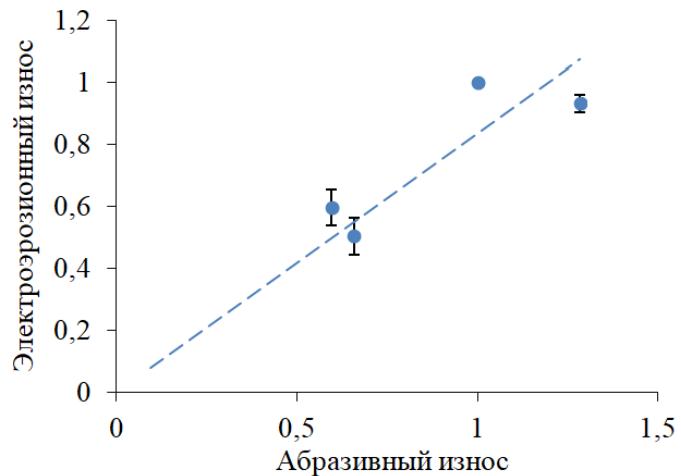


Рис. 4. Сравнение относительных величин износа сплава NiCrBSi:
● – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания на механическую (абразивную) и электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового сплава NiCrBSi подтвердили сделанный нами ранее вывод о корреляции параметров этих видов изнашивания по результатам исследования композиционных сплавов на основе меди. По абсолютным значениям абразивной и электроэрозионной износостойкости данный материал показал средние результаты: линейная интенсивность механического изнашивания имеет порядок 10^{-7} (6–7-й класс износостойкости), электроэрозионного – 12–26 нм/Кл, что сравнимо с износостойкостью меди (~ 20 нм/Кл). В процессе испытаний на электроэрозионную износостойкость наблюдались случаи сваривания контакта.

Результаты испытаний свидетельствуют о влиянии на характеристики износостойкости режимов плазменной наплавки, в частности тока сварочной дуги, поэтому в качестве направления дальнейших исследований можно рекомендовать поиск оптимальных режимов наплавки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией кафедры прикладной физики ТвГТУ Сахарову К.А. за помощь в подготовке образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О сочетании электроэррозионной и механической износостойкости материалов для коммутирующих электроконтактных соединений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 5–12.
2. Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Плазменная порошковая наплавка износостойкого покрытия. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвуз. сборник научных трудов / отв. ред. В.В. Измайлов*. Тверь: ТвГТУ, 2024. Вып. 17. С. 88–93.
3. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review // *Journal of materials research and technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
4. Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л., Поздеева Н.А. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 869–873.
5. Makarov A.V., Korobov Y.S., Soboleva N.N., Khudorozhkova Y.V., Vopneruk A.A., Balu P., Stepchenkov A.K. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // *Letters on Materials*. 2019. № 9 (4). P. 470–474.
6. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // *Обработка металлов*. 2013. № 4 (61). С. 79–85.
7. Токарев А.О., Макагон Л.Д. Оценка износостойкости и триботехнических свойств плазменно-напылённых покрытий // *Научные проблемы водного транспорта*. 2021. Вып. 69. С. 95–108.
8. Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абрзивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 34–41.
9. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
10. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
11. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.
12. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.
13. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекс, 2005. 408 с.
14. Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск: Аналитика Родис, 2016. 328 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. О корреляции механической и электроэррозионной износостойкости сплава NiCrBSi // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 5–12.

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.