

**РОЗРОБКА І ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ
СТВОРЕННЯ МАГНІТОРЕЙКОВИХ ГАЛЬМ**

Проців В.В. (НГУ, г. Дніпропетровськ, Україна)

***Анотація.** Надані результати створення первинного заліза і обґрунтовано його використання для виготовлення магнітопроводів магніторейкових гальм. Запропоновано застосовувати магнітопласти неодим-залізо-бор як джерела магнітної енергії для магніторейкових гальм на постійних магнітах.*

***Ключові слова:** магніторейкове гальмо, первинне залізо, постійний магніт.*

Магніторейкові гальма показали себе надійним засобом гальмування рейкових транспортних засобів комунального транспорту (міські трамваї). Також вони відмінно підходять для умов, коли гальмування потягу виконується лише встановленими на локомотиві гальмами. Це підприємства гірничо-металургійного та нафтохімічного комплексу, що використовують вагонний парк Укрзалізниці або спеціальний рухомий склад, який оснащений колісно-колодковими гальмами із пневмоприводом (автогальмами), проте по тим або іншим причинам гальмівна система вагонів не підключаються до загальної гальмівної пневмосистеми локомотива (економія часу та коштів). Не обладнані гальмами вагонетки шахтного і рудникового транспорту. У таких умовах гальмозабезпеченості локомотива надається першорядне значення. Широкого розгалуження набули електромагнітні гальма, що встановлюють на маневрові локомотиви і кар'єрні тягові агрегати [1], а також на рудникові контактні та шахтні акумуляторні електровози [2]. Проте для шахтних акумуляторних електровозів питання енергоспоживання рейкових гальм особливо актуальне, оскільки споживання електроенергії для гальмування обмежує тривалість використання батареї для тягової роботи. Тому набули поширення магніторейкові гальма на постійних магнітах [3].

Ціллю роботи є розробка нових матеріалів для виготовлення магніторейкових гальм та обґрунтування доцільності їх використання в конструкції гальм.

Завдання роботи. 1. Вивчення властивостей нових нелегованих магнітом'яких матеріалів з заліза. 2. Вибір типу та параметрів постійних магнітів для магніторейкового гальма шахтного локомотива.

За останнє десятиліття з'явилися нові матеріали, використання яких дозволило підвищити експлуатаційні характеристики магніторейкових гальм і збільшити ефективність їх роботи, особливо на важких шахтних шарнірно-зчленованих локомотивах в складних горно-геологічних умовах (обводнення та знакозмінний профіль вироблень з локомотивною відкаткою). У даній роботі описані нещодавно створені нові магнітом'які матеріали, придатні для виготовлення магнітопроводів. Це, насамперед, первинне залізо, технологія отримання якого розроблена в Україні ТОВ «Колорит» за участю автора. Первинне залізо є хімічно чистим залізом із вмістом 99,9 % і більш, отримане методом прямого плазмового відновлення в рідкій ванні із обкускованої залізородної сировини (обкотиши, брикети). Високий відсотковий вміст заліза в продукті означає також украй низький вміст решти елементів (домішок), що звичайно погіршують властивості електротехнічного заліза. Відповідно до ТУ У 13448618.101-2001 первинне залізо може випускатися в п'яти марках, проте для магнітних систем рейкових гальм найбільш пасують марки ПІ-9.9 (із вмістом заліза від 99,90 % до 99,95 %) та ПІ-9.95 (із вмістом заліза від 99,95 % до 99,99 %). Марка ПІ-9.99 (із вмістом заліза 99,99 % і більш), хоч і є найбільш чистою по домішках, проте занадто дорога для промислового використання. Нижче

приведений хімічний склад зразка марки PI-9.90, що отриманий на комбінованому (іскра-плазма) спектрометрі IRIS ENTREPED II XDL SSEA. Метод заснований на збудженні відібраної з однорідного розплаву монолітної проби аперіодичним імпульсним розрядом в атмосфері аргону, розкладанні отриманого випромінювання в спектр, реєстрації інтенсивності ліній елементів, що аналізуються, і автоматичним розрахунком концентрацій в масових долях вмісту елементів, що входять до складу проби. Калібрування спектрометра проводиться на підставі хіманалізу спектральних проб-еталонів для градування традиційними методами аналітичної «мокрої» хімії, що вживають для аналізу сталей і сплавів.

```

6-LA_UN5          УГЛЕРОДИСТЫЕ, НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ          29/06/04 15:45
                                     No. пробы 7
Среднее по 4 анализам
  C      Si      Mn      P      S      Cr      Ni      Mo      Co      Cu
X <.00240<.00320<.00050 .00755 0.0222 0.0132<.00180<.00130<.00100<.00642
  V      W      Al      Ti      Fe
X .00292<.00660<.00050<.00050 99.93

```

Із роздруківки видно, що вміст в пробі таких елементів як вуглець, кремній, марганець, нікель, молібден, кобальт, мідь, вольфрам, алюміній і титан нижчі за поріг чутливості приладу. Вказані марки є відмінним м'яким залізом, що значно перевершує по властивостях армкозалізо марок 0001, 0003 та 0005 по ТУ 14-1-2279-78, залізо розкислене марок 0,05ЖР, 0,08ЖР, 0,08ЖРЮ по ТУ 14-1-2033-77, магнітом'які сталі марок 20864, 20880 та 20895 по ГОСТ 11036-75, а тим більше низьковуглецеву сталь Ст.3пс по ГОСТ 380-94, з якої звичайно виготовляють магнітопроводи і полюсні наконечники магніторейкових гальм. Електротехнічні характеристики заліза первинного наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Електромагнітні властивості первинного заліза

Параметр	Марка заліза первинного по ТУ У 13448618.101-2001		
	PI-9.9	PI-9.95	PI-9.99
Коерцитивна сила H_c , А/м	36,5	25,7	менше 17,1
Максимальна магнітна проникність μ_{max}	100 000	150 000	більше 250 000
Час запізнення індукції відносно прикладеного поля для зразка товщиною 0,1 мм, с	0,51	1,18	більше 1,83

Вимірювання електромагнітних характеристик зразків первинного заліза проводили в комп'ютерному програмному комплексі «АРМ Вимірювання статичних характеристик магнітом'яких матеріалів». Приклад результатів вимірювання одного із зразків приведений на рис. 1. У подібному комплексі «АРМ Вимірювання статичних характеристик магнітотвердих матеріалів» визначали характеристики магнітів, виготовлених з різних матеріалів. У якості периферійного пристрою для підключення дослідницьких шупів з датчиками Холу і нормуючих (вхідних) підсилювачів використовували багатофункціональний пристрій для збирання даних для комп'ютерної шини USB від компанії National Instruments – NI USB-6009, показаний на рис. 2.

Оскільки дотичні між собою елементи магнітної системи (осердя, магнітопроводи, постійні магніти) повинні бути ретельно припасовані один до одного і прошліфовані по поверхнях зіткнення для мінімізації повітряних зазорів між ними, то найважливішою проблемою, що виникає у міру експлуатації гальм, є корозія. Із-за утворення іржі на стиках магнітної системи магнітна провідність їх погіршується, при цьому зменшується

сила магнітного тяжіння полюсних наконечників гальма до рейок і коефіцієнт корисної дії, підвищується нагрів електрокотушок і, як наслідок, знижується гальмівна сила локомотива.

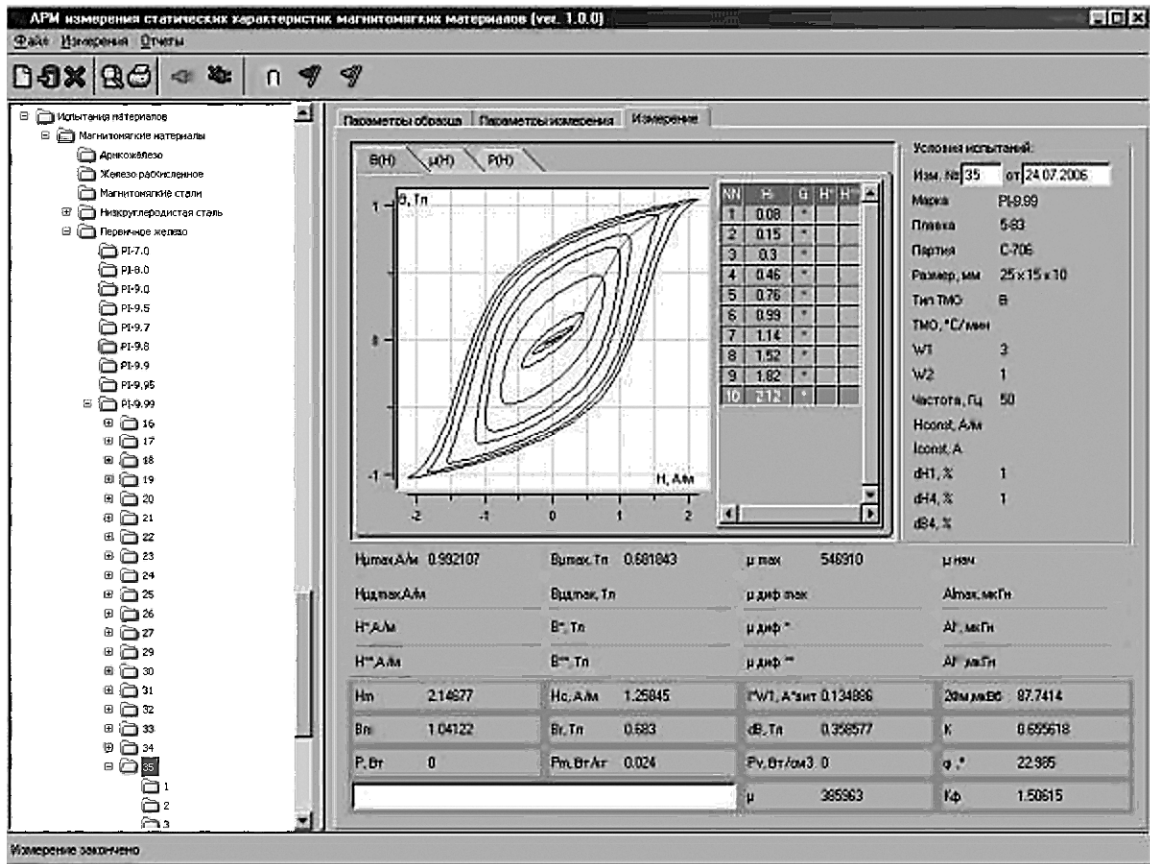


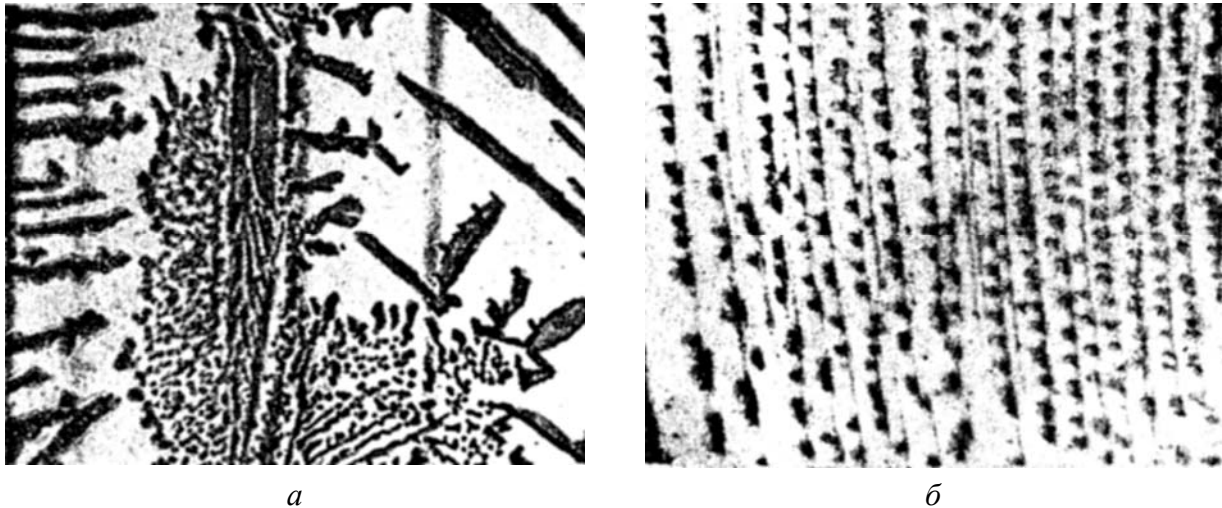
Рис. 1. Вимірювання статичних характеристик магнітом'яких матеріалів



Рис. 2. Периферійний пристрій NI USB-6009

Первинне залізо володіє відмінними антикорозійними властивостями (залізна колона в Індії, що збереглася з 415 р. не окисленою, має вміст заліза лише 99,72 %). На відміну від низьковуглецевої сталі, на поверхні якої утворюється суцільний шар оксиду, що швидко збільшується по товщині у вологому середовищі, яким є рудникова та шахтна атмосфера, оксиди на поверхні первинного заліза вищевказаних марок виникають не у

формі плівки, а у вигляді голок та глобулів. Товщина оксидних шарів, виміряна за допомогою інтерференційного мікроскопа МІИ-4, складає від 0,2 мкм до 0,3 мкм, а ширина окремих голок досягає 30 мкм, як це видно на рис. 3. Цей світловий мікроскоп призначений для аналізу прозорих об'єктів і має два оптичні шляхи для роздвоюваного променя, один з яких проходить через об'єкт, а інший минає його. Після з'єднання променів відбувається інтерференція за рахунок запізнювання по фазі одного з променів. Для досліджень готувалися тонкі шліфи заліза завтовшки менше 0,1 мм.



a – збільшення $\times 90$; *б* – збільшення $\times 300$

Рис. 3. Оксиди на поверхні зразка первинного заліза марки ПІ-9.95

Як конструкційний матеріал, первинне залізо добре підходить для виготовлення магнітопровідних частин рейкових гальм, воно також може використовуватися для виготовлення полюсних наконечників, оскільки має вищий коефіцієнт тертя ковзання, чим низьковуглецева сталь. Воно м'якше і пластичніше. Основні механічні властивості первинного заліза приведені у табл. 2.

Таблиця 2. Механічні властивості первинного заліза

Параметр	Марка заліза первинного по ТУ У 13448618.101-2001		
	ПІ-9.9	ПІ-9.95	ПІ-9.99
Межа текучості при 20 °С, МПа	160	140	менше 120
Тимчасовий опір розриву при 20 °С, МПа	220	200	менше 180
Твердість по Брінелю	90	80	менше 70
Коефіцієнт тертя ковзання по сталі	0,20	0,21	більше 0,22

Для магніторейкових гальм велике значення має відведення тепла, що виділяється в процесі гальмування, щоб не перегріти електрокотушки (це призводить до пробую ізоляції) або постійні магніти (що зменшує їх магнітну індукцію і навіть може привести до розмагнічування). У первинного заліза є перевага перед низьковуглецевими сталями, – його коефіцієнт теплопровідності при 20 °С дорівнює 210 Вт/(м·К) проти 57,4 Вт/(м·К) у сталі Ст.3сп.

Крім магнітних матеріалів, що вже застосовувалися в магніторейкових гальмах, типу алькіно, феритобарій, сплави на базі рідкоземельних елементів самарій-кобальт і

самарій-стронцій, з'явилися нові постійні магніти. До того ж, істотно покращені властивості раніше відомих магнітів. Зараз доступні для широкого застосування наступні основні типи магнітних матеріалів.

1) Ізотропні та анізотропні ферити барію і стронцію (спечені).

2) Постійні магніти залізо-нікель-алюміній і залізо-нікель-алюміній-кобальт (ЮНД або Al-Ni та ЮНДК або Al-Ni-Co).

3) Магніти самарій-кобальт Sm-Co (спечені).

4) Магніти неодім-залізо-бор Nd-Fe-B (спечені).

5) Рідкоземельні магнітопласти неодім-залізо-бор Nd-Fe-B.

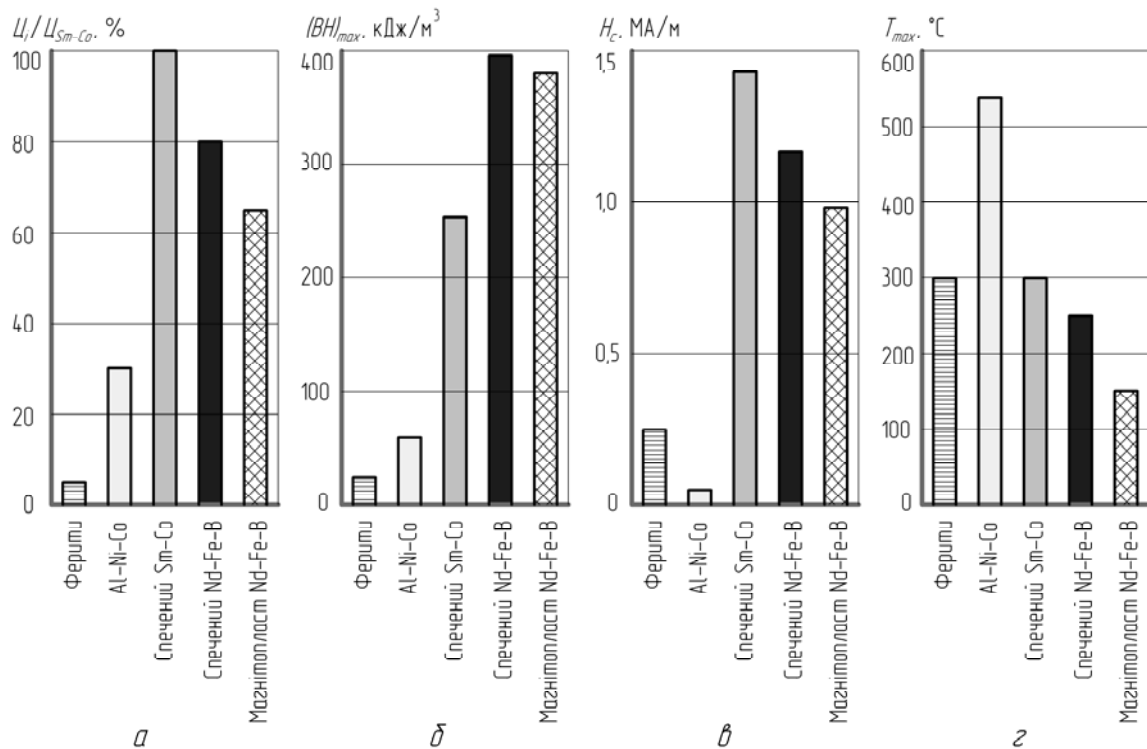
Останній різновид, – полімерні постійні магніти, або магнітопласти, виготовляються з суміші магнітного порошку та полімерного зв'язуючого. Після сухого пресування «в розмір» проводиться затвердіння ізотропних заготовок в сушильних шафах в повітряній атмосфері. Цей вид магнітних матеріалів має ряд цінних властивостей, що вигідно відрізняють їх від металевих або керамічних магнітів, що одержують спіканням, серед них наступні:

а) висока відтворюваність і стабільність, однорідність магнітних властивостей, великий термін служби (більше 200 тис. год.);

б) хороша механічна міцність і пластичність, ударна витривалість до 500g;

в) висока технологічність, тобто можливість одержувати вироби складної форми з малими витратами і при цьому дотримувати з високою точністю задані розміри.

Порівняльний аналіз основних типів постійних магнітів (одного розміру) [4], що використовують при виготовленні магніторейкових гальм, приведений на рис. 4.



а – відносна ціна магнітів різних типів;

б – максимальна енергія;

в – коерцитивна сила;

г – максимальна робоча температура

Рис. 4. Порівняльний аналіз основних типів постійних магнітів

Видно, що найдорожчими (див. рис. 4 а), є магніти на основі самарій-кобальт (їх вартість прийнята за 100 %), наймогутнішими (див. рис. 4 б) – спечені неодим-залізо-бор (395 кДж/м^3). Найбільшу коерцитивну силу мають магніти самарій-кобальт (1,4 МА/м), а витримують найбільшу робочу температуру (вище за яку магніт тимчасово втрачає частину своїх магнітних властивостей) – Al-Ni-Co ($545 \text{ }^\circ\text{C}$). Рідкоземельні магнітопласти неодим-залізо-бор на основі порошків марок $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\text{Nd}_3\text{Fe}_{16}\text{B}$ та $\text{Nd}_4\text{Fe}_{28}\text{B}_3$ дуже добре підходять для формування магнітних блоків розміром $80 \times 40 \times 10 \text{ мм}$. Крім того, полімерне зв'язуюче оберігає поверхневий шар магнітного порошку від корозії.

Для намагнічування виробів з магнітами із фериту барію, стронцію або легованих рідкоземельними металами застосовуються намагнічуючі пристрої, що дозволяють одержувати поле з амплітудою магнітної індукції до 1,0 Т в зоні намагнічення. Для намагнічування рідкоземельних магнітів (РЗМ) складу неодим-залізо-бор і самарій-кобальт необхідні пристрої, що намагнічують, з амплітудою індукції до 3,0 Т. В деяких випадках, використовуючи спеціальний режим попередньої термообробки РЗМ, можна істотно знижувати амплітуду магнітної індукції в зоні намагнічення. Це дозволяє використовувати для намагнічування рідкоземельних магнітів пристрої, розроблені для намагнічування феритів. Такий прилад, розрахований на електроживлення від мережі змінного струму 220/380 В, показаний на рис. 5. При серійному виробництві намагнічування може виконуватися вже після збірки секції магніторейкового гальма.



Рис. 5. Пристрій для намагнічування і повного розмагнічування магнітних блоків розміром до $115 \times 85 \times 65 \text{ мм}$

В цілому, сучасні магніти, що використовують для виготовлення магніторейкових гальм, можна класифікувати таким чином (див. рис. 6). Темним фоном виділені технічні рішення, використання яких найраціональніше. Це електромагніти з поперечним замиканням магнітного потоку, первинне залізо як матеріал для виготовлення магнітопроводів і полюсних наконечників, а також застосування постійних магнітів, виготовлених за технологією магнітопластів Nd-Fe-B.

Висновки. Доцільно використання первинного заліза марок PI-9.9 та PI-9.95 для виготовлення магнітопроводів та полюсних наконечників рейкових гальм як електромагнітних, так і на постійних магнітах, оскільки воно має дуже низьку коерцитивну силу від 25 А/м до 36 А/м і високу максимальну магнітну проникність від 100 000 до 150 000. Первинне залізо має добрі антикорозійні властивості, зіставні із неіржавіючими сталями, має коефіцієнт теплопровідності при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ рівний $210 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ і підвищений коефіцієнт тертя ковзання по сталі від 0,2 до 0,21.

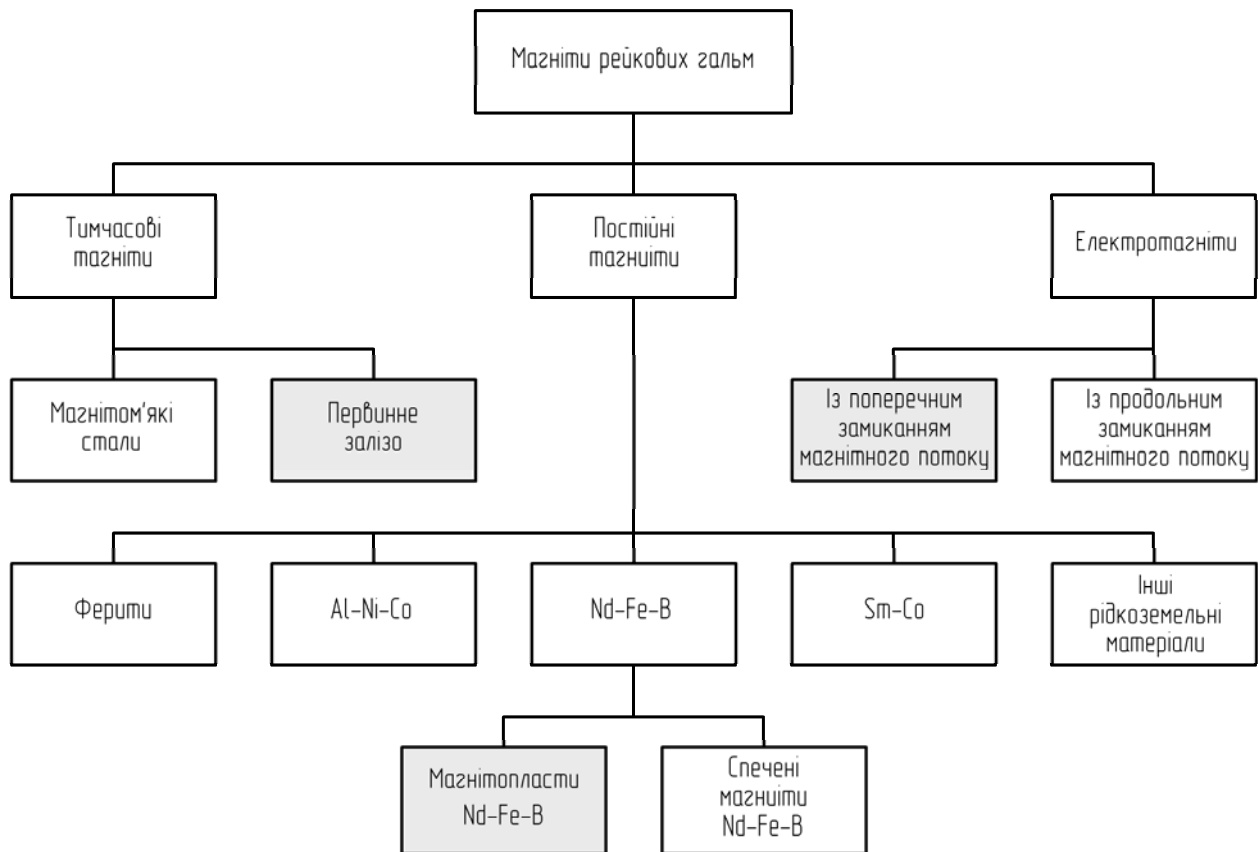


Рис. 6. Класифікація магнітів для магніторейкових гальм

Пропонований магнітний блок магнітопласта $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ розміром $80 \times 40 \times 10$ мм має залишкову магнітну індукцію B_r , величиною 1,23 Т, коерцитивну силу H_c , що дорівнює 0,86 МА/м, максимальну енергію $(BH)_{\max}$ 370 кДж/м³. Робоча температура в 100 °С цілком допустима враховуючи, що секція магніторейкового гальма конструктивно придатна для інтенсивного розсіювання теплової енергії, що виділяється при гальмуванні. Полімерне зв'язуюче магнітопласта додає магнітному блоку еластичність, оберігає його від корозії, розтріскування та розмагнічування у момент удару секції рейкового гальма об рейкові стики або при швидкому опусканні на доріжку катання рейки. Такий магніт здатний витримувати тривалу динамічну дію до 20g з частотою від 5 Гц до 250 Гц, а також сприймати одиночні удари з прискоренням до 500g.

Список літератури: 1. Новые виды тормозов на маневровых локомотивах. Баллон Л.В., Шашкин В.Б. Труды Ростовского-на-Дону института инженеров железнодорожного транспорта, 1976. – Вып. 131, – С. 30-35. 2. Ренгевич А.А. и др. Тормозная платформа с электромагнитными рельсовыми тормозами / Горные машины и автоматика. – М.: Недра, 1969. – Вып. 9. – С.57-60. 3. Дорожкин В.Н. Повышение надежности и эффективности магниторельсовых тормозов шахтных локомотивов: Дис... канд. техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск, 1990. – 190 с. 4. Проців В.В. Визначення раціональної довжини секції складового рейкового магнітного гальма // Зб. наук. праць / НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. № 30 – С. 102-111.

Надійшла до редколегії _____

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ МАГНИТОРЕЛЬСОВЫХ ТОРМОЗОВ**

Проців В.В. (НГУ, г. Днепрпетровск, Украина)

Даны результаты создания первичного железа и обосновано его использование для изготовления магнитопроводов магниторельсовых тормозов. Предложено применять магнитопласты неодим-железо-бор в качестве источников магнитной энергии для магниторельсовых тормозов на постоянных магнитах.

Ключевые слова: магниторельсовый тормоз, первичное железо, постоянный магнит.

**DEVELOPMENT AND GROUND OF THE USE OF NEW MATERIALS FOR CREATION
OF MAGNETIC BRAKES**

Protsiv V.V. (NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine)

The results of creation of primary iron are given and its use is grounded for making of magnetic lines of magnetic brakes. Offered to apply a magnetoplastics Nd-Fe-B as magnetic energy sources for magnetic brakes with permanent magnets.

Key words: magnetic brake, primary iron, permanent magnets.