

УДК 621.762

А.В. Мініцький, к.т.н., доц.**Н.В. Мініцька, к.т.н., доц.***Національний технічний університет України "КПІ"***О.В. Власова, к.т.н., н.с.***Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича*

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ПОРОШКОВИХ МАГНІТНО-М'ЯКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті проаналізовано основні напрямки розвитку порошкових магнітно-м'яких матеріалів. Огляд охоплює дослідження як відомих матеріалів, що були розроблені у 80-х рр. минулого сторіччя, так і сучасних магнітно-м'яких матеріалів. Показано найбільш перспективні напрямки створення порошкових магнітно-м'яких матеріалів, які пов'язані з використанням плакованих композиційних та нанокристалічних порошків.

Вступ. Виробництво магнітних матеріалів із низькими втратами енергії при перемагнічуванні на сьогоднішній день є одним з найбільш масових. Не дивлячись на те, що дослідження і розробка таких матеріалів ведуться ще з початку минулого століття, вивчення механізму намагнічування–перемагнічування і підвищення якості цих матеріалів є актуальним і тепер. Це пов'язано з широким використанням магнітно-м'яких матеріалів у різних технічних пристроях – електрогенераторах, електродвигунах, вимірювальних установках, котушках індуктивності та ін., якісний рівень яких визначається властивостями сучасних марок таких матеріалів [1].

Традиційно при виробництві магнітних матеріалів перше місце належить електротехнічним сталям (90 %), що використовуються при виготовленні потужних електричних генераторів і трансформаторів. Проте питання заміни виробів із листових електротехнічних сталей на порошкові деталі є достатньо перспективним [2], оскільки дозволяє використовувати переваги технології порошкової металургії, що полягають у можливості виготовлення суцільнопресованих деталей електроприводів. Економічні, а в ряді випадків і технічні переваги порошкових магнітно-м'яких матеріалів забезпечують їх широке використання у змінних полях [3, 4].

Основна частина. Для матеріалів, що працюють у змінних магнітних полях, найважливішими властивостями є початкова магнітна проникність і питомі магнітні втрати [5]. Величина питомого

електричного опору визначає граничну частоту, до якої доцільне застосування даного матеріалу.

Використання матеріалу можливе при невеликих розмірах виробу, коли виключається екрануюча дія вихрових струмів і досягається перемагнічування по всій товщині деталі. Це можливо, якщо виконується співвідношення:

$$d \leq 10^5 \sqrt{2\rho / \mu_{\max}},$$

де d – товщина магнітопроводу, мм; ρ – питомий електричний опір матеріалу магнітопроводу, Ом·м; μ_{\max} – максимальна магнітна проникність (безрозмірна величина) [6].

З формули випливає, що магнітопроводи з матеріалів із високою магнітною проникністю можуть бути використані в змінних магнітних полях за умови значного підвищення їхнього опору чи формування шаруватої структури, причому товщина шару не повинна перевищувати обчислене значення. Оскільки легуванням можна збільшити питомий електричний опір не більше ніж на порядок, товщина магнітопроводу, що працює на частоті 50 Гц, не повинна перевищувати потроєну товщину листа (0,35) електротехнічної сталі, тобто $0,35 \cdot 3 \approx 1$ мм. Збільшення пористості також дозволяє підвищити питомий електроопір, але при цьому зменшується ефективна індукція, результатом чого у підсумку стає ріст сумарних втрат.

Дослідження матеріалів на основі залізних порошків показали, що питомі втрати можуть бути обмежені декількома шляхами. Наприклад, у матеріали на основі залізних порошків вводять легуючі добавки (фосфор, кремній, алюміній, бор), використовують лускаті порошки й шаруваті вироби, проводять поверхневе окислення частинок вихідного матеріалу для утворення ізолюючої плівки [7].

Використання порошків із частинками у формі плоских лусочок товщиною близько 25 мкм забезпечує порівняно невеликий фактор, що розмагнічує, і високу проникність у напрямку поля при орієнтації площини таких лусочок у напрямку, перпендикулярному магнітному полю [8]. Опір поперек шарів, тобто в напрямку протікання вихрових струмів, при використанні лусочок з порошку ПЖ4 і смоли ЭД-5 як ізолюючого зв'язуючого зростає до 750 мкОм·м, що в $7,7 \cdot 10^3$ рази більше, ніж у чистого заліза [9]. У зв'язку з утворенням немагнітних прошарків між частинками виникає внутрішній фактор, що розмагнічує, який призводить до росту ефективного значення коерцитивної сили і, відповідно, втрат на перемагнічування, що в матеріалах із лускатого заліза перевищують 80 % від загальних питомих втрат, які складають $P_{1,0/50} = 10$ Вт/кг.

Одним із відомих порошкових магнітно-м'яких матеріалів, здатних замінити традиційні електротехнічні сталі, є матеріал системи залізо–фосфор [10]. Для виробництва магнітно-м'яких виробів зазвичай використовують порошок ПЖФ06, що містить 0,6 % фосфору. У таблиці 1 наведено магнітні характеристики зразків, виготовлених із залізофосфорного порошку ПЖФ06 з 0,6 % стеарату цинку пресуванням під тиском 700 МПа і спіканням при температурі 1250 °С протягом 4 год. у середовищі водню. Для порівняння в таблиці наведено магнітні характеристики зразків з порошку шведської фірми «Hoganas», виготовлених за тими ж технологічними режимами [11].

Таблиця 1

Магнітні властивості залізофосфорних матеріалів

Марка порошку	Щільність, ρ , г/см ³	Індукція, B_{2000} , Тл	Проникність, μ_{\max}	Коерцитивна сила, H_c , А/м	Втрати, $P_{1,0/50}$, Вт/кг
ПЖФ06	7,1	1,4	4000	85	7–9
РАС	7,2	1,3	4000	100	8

Добавка фосфору, що утворює із залізом твердий розчин при невисоких температурах (1050 °С), дозволяє не тільки інтенсифікувати процес спікання, але й знизити загальні втрати, підвищуючи електроопір матеріалу до 19 мкОм·см при 0,5 % Р і до 22 мкОм·см при 1 % Р.

Відомі роботи з одержання сплаву залізо–фосфор, отриманого легуванням залізного порошку доменним ферофосфором [12]. Найкращі результати були отримані при вмісті фосфору 1 % мас. і спіканні при 1250 °С в дисоційованому аміаку. Однак легування залізного порошку ферофосфором має той недолік, що його необхідно дробити й подрібнювати до одержання фракції 100 мкм.

Одним із розповсюджених магнітно-м'яких матеріалів, що поєднує у собі комплекс необхідних властивостей для використання його в пристроях змінного струму, є залізкременисті сплави [13–15].

Однак спроби одержання залізкременистих порошоків із вмістом кремнію від 2 до 6,5 % методом дифузійного насичення, розпиленням показали, що через велику хімічну активність кремнію в процесі одержання залізкременистих порошоків відбувається часткове утворення склоподібної фази SiO_2 , а також включень фаяліту Fe_2SiO_4 [16]. На підставі досліджень зроблено висновки про те, що для одержання залізкременистих порошоків необхідно використовувати засоби для запобігання окисдування кремнію, для чого рекомендується

використовувати вихідну сировину з мінімальним вмістом кисню, застосовувати спеціальні засипки та плавкі замки в контейнерах при використанні дифузійних процесів одержання, чисті захисні середовища при розпиленні порошку та ін. [17].

На підставі експериментальних даних визначено [18], що для порошкових сплавів Fe–Si і Fe–P з незначним вмістом домішок на магнітні властивості порошоків визначальним чином впливають щільність укладання та розмір частинок. Одним з основних факторів, що впливають на створення в матеріалі необхідної структури й досягнення заданих магнітних властивостей, є умови спікання. Насамперед, при спіканні зразків із залізокременистого сплаву необхідно цілком виключити окислювання матеріалу та створити в ньому грубозернисту структуру з мінімальним вмістом домішок. Відомо про розкислюючий вплив бору й алюмінію. У роботах [66–69] системно досліджені закономірності формування структури та властивостей легованих бором і алюмінієм залізокременистих сталей, що здатні скласти альтернативу традиційним матеріалам, які використовуються у магнітопроводах електричних машин малої та середньої потужності. У таких сплавах магнітна проникність і магнітна індукція залежать від неоднорідності розподілу кремнію. Найбільшу магнітну індукцію (1,7 Тл) мають сплави з 1 % кремнію, а найбільшу магнітну проникність (≈ 5000) – сплав з 6,5 % кремнію (обидва сплави спечені при температурі 1300 °C і містять 0,06 % бору).

Введення алюмінію призводить до істотного росту зерна в процесі спікання і, відповідно, до високих магнітних властивостей. Так у роботі [19] автори одержали методом порошкової металургії магнітно-м'який сплав Fe – 1 % Al. Після спікання при 1482 °C протягом 12 год. сплав мав низьку коерцитивну силу ($H_c \approx 72$ А/м), порівняно високу магнітну проникність ($\mu \approx 5000$) і високу магнітну індукцію насичення ($B_s \approx 1,3$ Тл при 640 А/м). За магнітно-м'якими властивостями сплав Fe–1% Al перевершував чисте порошкове залізо та сплави Fe–Si і Fe–P, що випускаються в даний час. Але при оптимальній температурі спікання (1482 °C) такого матеріалу відбувається значна втрата маси через інтенсивне випаровування алюмінію.

Для підвищення електроопору порошкових матеріалів з метою зниження в них магнітних втрат при роботі у змінних полях можна вводити порошок легкоплавких марок скла (з температурою початку розм'якшення 350 °C) [20]. Однак при цьому добавки скла знижують значення магнітної індукції та магнітної проникності, хоча втрати на вихрові струми трохи зменшуються.

В останні роки в галузі використання порошкових магнітно-м'яких матеріалів проводяться дослідження з одержання спеціальних порошків із необхідними властивостями та структурою [21].

Фахівці Інституту порошкової металургії (Москва) і Сулінського металургійного заводу ведуть активні дослідження з розробки технологій одержання частково-легованих порошків на основі особливо чистого залізного порошку, що містять як легуючі елементи 0,5–1,0 % P і 2–8 % Sn для деталей магнітно-м'яких матеріалів [22]. Вивчення показало, що при компактуванні легованих особливо чистих залізних порошків формується структура, вільна від дефектів, у вигляді крихких неметалевих включень, що легко руйнуються. Тому такі порошкові сталі та сплави мають більш високу пластичність. Крім того, мінімізація сторонніх включень і дефектів металу основи позитивно позначається на збільшенні магнітної проникності й зниженні коерцитивної сили матеріалу.

Автори роботи [23] досліджували початкову магнітну проникність сердечників з порошку відновленого заліза, щоб з'ясувати вплив характеристик матеріалу, концентрацій домішок, розміру зерна й залишкових напружень після пресування. Визначили, що зниження концентрацій домішок (O, C, S) і укрупнення зерна ефективно підвищують магнітну проникність. Дослідження структури показало, що навколо границь зерен частинок заліза існують немагнітні частинки з розмірами, порівняними з товщиною доменних стінок чистого заліза. Припущено, що границі зерен діють як місця сильного гальмування зсуву доменних стінок. На основі цих результатів у Kawasaki Steel розробили новий порошок відновленого заліза, що має більшу магнітну проникність, ніж звичайні матеріали, при частотах аж до декількох сотень Гц.

Використання окисдованих залізних порошків також збільшує електроопір матеріалу [24]. Оксидну плівку можна одержати методом паро- чи термоокисдування [25, 26]. Так експериментально розроблена технологія виготовлення композиційного магнітно-м'якого матеріалу з термоокисдованого сулінського залізного порошку [27].

Недоліком цієї технології є трудомістка операція підготовки вихідного порошку, що містить відпал і обкатування. Тому доцільні пошуки інших залізних порошків, що відповідають вимогам до вихідних феромагнітних порошків при створенні композиційного магнітно-м'якого матеріалу.

Автори роботи [28] пропонують спосіб одержання виробів із порошків на основі заліза, що містить пресування виробів із порошку, що складається з частинок заліза, який не містить зв'язуючого

матеріалу, нагрівання спресованого виробу в середовищі, що містить кисень, до температури нижче температури спікання з витримкою, достатню для зчеплення частинок між собою і підвищення механічної міцності спресованого виробу. Як оксидне середовище можна використовувати пару (водяну). У процесі нагрівання порошку в простір між частинками вводять (методом просочення) електроізоляційний матеріал (наприклад, органічну смолу). Після введення в пори зв'язуюче затверджують.

Однак вивчення мікроструктури оксидованих зразків показало, які відбувається утворення товстих шарів оксидів, що розташовуються в основному по границях зерен. Це значно знижує магнітну індукцію і підвищує коерцитивну силу.

Одним із нових напрямків при виготовленні магнітно-м'якого матеріалу є використання плакованих порошоків, вихідна складова яких покривається шаром легуючих компонентів, якими можуть бути органічні й неорганічні матеріали [29, 30]. Процес плакування кожної окремої частинки дозволяє створювати на поверхні залізного порошку чи його сплавів тонку і рівномірно розподілену електроізоляційну оболонку при високій концентрації феромагнетика в одиниці об'єму [31, 32].

Це дозволяє істотно підвищити питомий електроопір, що обмежує вихрові струми та знижує магнітні витрати. Магнітні властивості матеріалів з таких порошоків однакові у всіх напрямках, тобто вони ізотропні, що відрізняє їх від електротехнічних сталей. Основні властивості сучасних магнітно-м'яких матеріалів, що створено у провідних країнах світу, представлено в таблиці 2.

У випадку плакування вихідного порошку органічними ізолюючими матеріалами після пресування виробу повинна проводитися полімеризація чи припікання утвореного на частинках порошку поверхневого шару при температурах не більше 500 °С. Такі зразки мають високий питомий електроопір, що перешкоджає утворенню вихрових струмів, а це дає можливість використовувати такі матеріали в змінних полях.

У більшості робіт як плакуючий шар найчастіше використовують смолу, каучук тощо, при цьому спостерігається деяке зниження магнітної індукції та магнітної проникності. Провідний розроблювач і виробник магнітно-м'яких порошоків – фірма «Hoganas» – стверджує, що для зменшення вихрових струмів необхідна поверхнева ізоляція на кожній порошковій частинці. Такий бар'єр може складатися з органічних чи неорганічних добавок.

Порівняльні дані по магнітних властивостях
сучасних порошкових магнітно-м'яких матеріалів

Матеріал	Країна-розробник	Щільність ρ , г/см ³	Змінне поле		
			B, Тл	μ_{\max}	Втрати P _{1,0/50}
Чисте залізо EU-10	Японія ¹	7,4	B ₂₀₀₀ = = 1,4	4500	30
Порошок заліза + смола EU-62X		7,0	B ₈₀₀₀ = = 1,15	200	7
Fe, плаковане Ni-P	США ²	7,35	B = 1,7	–	–
Somaloy TM 500 + Kenolube		B ₂₅₀₀ = = 0,9	581	29 (P _{1,5/100})	B ₂₅₀₀ = = 0,9
Fe-0,8 % P, T спікання 1500°, 24 год.	Польща ³	7,8	B ₂₅₀₀ = = 1,62	14400	20,6
Atomet EM-1(2) (Fe + resin)	Канада ⁴	7,2	B ₂₅₀₀ = = 1,4	–	10–12
ПЖРВ + 0,5 % епоксидної смоли	Україна ⁵	6,9	B ₂₅₀₀ = = 1,1	393	9,1
ПЖРВ, плаковане Sn		7,29	B ₂₅₀₀ = = 1,38	3200	15,0

Примітка: 1 – [33], 2 – [34], 3 – [35], 4 – [36], 5 – [37]

Процес виробництва базується на традиційних методах порошкової металургії. Для ізоляції використовуються різні смоли, з метою поліпшення пресування такого порошку пропонується мастило типу «kenolube» у межах 0,3–0,5 % мас. Мастило повинно бути сумісне з ізоляцією при таких режимах термообробки матеріалу. Так розроблений матеріал «somaloyTM500», разом з мастилом «kenolube» (0,5 %) [38] рекомендується для виробів, що працюють у змінних полях.

Зараз «Hoganas» також розпочала промисловий випуск нових матеріалів із плакованих порошоків «LCM», розроблених для роботи при частотах 60 Гц [39]. Як і попередній порошок «IP», що працює при частотах від 200 до 400 Гц, плаковані порошки «LCM» запропоновані переважно для виробництва АС електричних приладів як для окремих деталей, так і для цілих вузлів. Таким чином, одержання мікродвигунів з «LCM» плакованих порошоків відкриває можливості їх впровадження в автомобільну промисловість. У «LCM» порошоків кожна частинка покрита непровідним матеріалом. Однак якщо порошок «IP» покритий полімером, то «LCM» порошки покриваються ізоляційною сумішшю,

що дає зменшення витрат. І ті, й інші порошки виробляються «Hoganas» методом теплового пресування.

Разом з тим, одним з недоліків таких матеріалів є низька механічна міцність, порівняно з порошковими матеріалами, що спікаються при високих температурах. Тому дослідження, спрямовані на розробку й вибір відповідної ізолюючої складової, можуть ліквідувати цей недолік і підвищити фізико-механічні характеристики матеріалу. При цьому найбільш перспективні ізолюючі прошарки з таких матеріалів, що самі є феромагнетиками й одночасно значно підвищують електроопір. Необхідно також враховувати ступінь чистоти вихідних залізних порошоків і вибирати відповідно до цього методи їх виготовлення.

У радіо- й електротехнічних виробках з початку 80-х рр. почали широко застосовуватися аморфні матеріали, які використовуються замість пермалюю, феритів, електротехнічних сталей і магнітодіелектриків [40]. У даний час найбільшого поширення набули магнітно-м'які аморфні сплави, в яких поєднуються високі магнітні й механічні властивості. Особливістю магнітно-м'яких аморфних сплавів, порівняно з кристалічними, є великий (близько 20 %) вміст немагнітних елементів, таких, як бор, вуглець, фосфор та ін., необхідних для збереження аморфної структури. Наявність цих елементів знижує максимальні значення індукції насичення в аморфних сплавах, порівняно з кристалічними, і збільшує температурний коефіцієнт магнітних властивостей. Ці ж елементи збільшують електроопір, підвищують твердість і міцність аморфних сплавів, а також їх корозійну стійкість [41].

Проте одержання аморфних сплавів з високою магнітною проникністю пов'язане з великими технічними складнощами: доводиться застосовувати холоднокатані листи товщиною 1,5–20 мкм, гарячокатані листи та холоднотягнений дріт. Тому дані матеріали застосовуються обмежено й використовуються лише в тих галузях техніки, де необхідно одержати матеріал з максимальними значеннями магнітної проникності.

Інформаційний аналіз великого масиву даних з вивчення технологічних схем отримання порошкових магнітно-м'яких матеріалів і дослідження магнітних та фізико-механічних властивостей дослідних зразків з них показує, що одним з перспективних напрямків подальшого розвитку таких матеріалів є розробка матеріалів на основі нанокристалічних порошоків [42–46]. Унікальне сполучення магнітних властивостей, що спостерігається в нанокристалічних сплавах на основі системи Fe–Si–B типу «Finemet» ($\text{Fe}_{74,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$) зі

змішаною аморфно-кристалічною структурою і з розміром зерен ~ 10 нм, дозволяє отримати індукцію насичення не менше 1,0 Тл та високу початкову магнітну проникність. Відсутність доменної структури забезпечує формування дуже низької коерцитивної сили (5–10 А/м), що за рахунок малої площі петлі гістерезису дозволяє отримати низькі витрати на перемагнічування таких матеріалів.

Висновки. На основі узагальнення результатів аналізу сучасних тенденцій розвитку матеріалознавства порошкових магнітно-м'яких матеріалів розглянуто перспективні напрямки створення таких матеріалів, які забезпечують підвищені магнітні характеристики для роботи в змінних полях промислової частоти. Обґрунтовано ефективність використання для одержання спечених магнітно-м'яких матеріалів з високим рівнем магнітних характеристик, порошоків заліза, плакованих органічними та неорганічними матеріалами. Зазначено перспективність використання нанокристалічних порошоків при створенні сучасних магнітно-м'яких матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Development of high performance sintered soft magnetic material / *Y. Shimada et al.* // Powder Metall. – Vol. 53, № 8. – 2006. – P. 686–695.
2. Tomasz Janta PM soft magnetic composition versus electrical sheets / *Tomasz Janta, Andrej Kordecki* // Soft magnetic material workshop, Euro PM 2000, Japan. – 2000. – P. 15–29.
3. Patricia Jansson Advances in soft magnetic composites based on iron powder / *Patricia Jansson* // Soft magnetic materials 98, Barselona, Spain, April 1998. – P. 7–9.
4. Patricia Jansson SMC materials – including present and future application / *Patricia Jansson* // PM TEC 2000, New York, June 2000. – P. 19–20.
5. Мишин Д.Д. Магнитные материалы / *Д.Д. Мишин.* – М. : «Высшая школа», 1991. – 422 с.
6. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение / *К.Хек.* – М. : Энергия, 1973. – 301 с.
7. Тульчинский Л.Н. Порошковые магнитомягкие материалы / *Л.Н. Тульчинский, О.А. Панасюк* // Порошковая металлургия. – 1995. – № 7/8. – С. 53–67.
8. Минаев Е.М. Порошковый композиционный магнитомягкий материал / *Е.М. Минаев* // Тез. докл. XV Всесоюзной научн.-техн. конф. – К. : ИПМ АНУССР, 1985. – С. 328–329.

9. *Saton Masaaki* Soft magnetic performances of scaly powder obtained by a method of sputtering of a melt by water for magnetic cores / *Saton Masaaki* // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1986. – V. 72, № 13. – P. 160.
10. *Чистяков В.К.* Влияние защитной среды на магнитные и механические свойства материалов системы железо–фосфор / *В.К. Чистяков, Г.А. Дорогина, О.Б. Коробка* // Порошковая металлургия. – 2001. – № 9/10. – С. 98–104.
11. *Гайдученко Г.К.* Эффективность влияния фосфора на магнитные характеристики изделий из распыленных железных порошков. Порошковые конструкционные материалы / *Г.К. Гайдученко, О.А. Панасюк, В.А. Костюк* // Сб. научн. тр. – К. : ИПМ АНУССР, 1989. – С. 17–23.
12. *Изычев В.Ю.* Технология получения и свойства сердечников акустических систем из порошкового магнитомягкого материала железо–фосфор / *В.Ю. Изычев, Ю.М. Панин, С.В. Масас* // Тез. докл. XV Всесоюзной научн.-техн. конф. – К. : ИПМ АНУССР, 1985. – С. 320–322.
13. *Тимофеев И.А.* Физико-механические свойства железо-кремнистых сплавов / *И.А. Тимофеев, Н.Н. Павлов* // Литейное производство. – 1999. – № 12. – С. 17–18.
14. *Кузнецов И.А.* Магнитные свойства порошков железа и железа с кремнием после механического размола и отжига / *И.А. Кузнецов, Г.А. Дорогина, И.Н. Веселов* // XV Рос. научн.-техн. конф. – М., 1999. – С. 426.
15. Содержащий кремний железный порошок : пат. № 197168825 Германия, МПК⁶ B22F9/16 / *Simon Joachim, Schelegel Reinhold, Leuther Bernd.* – Заявл. 22.04.1997 ; Опубли. 29.10.1998.
16. Высокотемпературное окисление железо-кремниевых материалов / *В.А. Лавренко, Т.Г. Проценко, О.А. Панасюк и др.* // Докл. АН СССР. – Химическая технология, 1976. – Т. 229, № 5. – С. 1180–1183.
17. Спеченные материалы для электротехники и электроники : справ. изд. / *Г.Г. Гнесин, В.А. Дубок, Братерская и др.* – М. : Металлургия, 1981. – 344 с.
18. *Малая Е.В.* Композиционные порошки Fe–Si, Fe–P для магнитомягких материалов имитирующих слоистое строение магнитопроводов / *Е.В. Малая, В.Г. Люлько, Р.В. Сахабудинов* // Межд. конф., Волгоград, 1998. – С. 336–337.
19. *Wenger Lowell* Soft magnetic properties of Fe–(1 wt %) Al alloy processed by powder metallurgy / *Putatunda Susil K., Nielsen*

- Timoty, Talagala Punya, Naik Ratna* // Department of chemical engineering and material science Wayne State University, Detroit, MI 48202 Mater. and manuf. processes. – 2000. – 15, № 3. – P. 405–418.
20. *Радомысльский И.Д.* Применение стекла в порошковой металлургии / *И.Д. Радомысльский, Н.И. Щербань* // Порошковая металлургия. – 1965. – № 12. – С. 83–91.
21. *Sustarsic B.* SMC Materials in the Design of Small Electric Motors for Domestic Application / *B.Sustarsic, A.Sirc, D.Milyavec* // Euro PM 2004. Conference Proceedings PM Functional Materials. – Vol. 4. – 2004. –P. 629–635.
22. Высококачественные железные и легированные порошки для изделий электротехнического и конструкционного назначения / *В.Б. Акименко, И.А. Гуляев, Я.М. Турецкий и др.* // Сталь. – 1994. – № 9. – С. 70–72.
23. *Nakamura Naomichi* Магнитные свойства железного порошка «KIP MG270H» с высокой магнитной проницаемостью для линейных сердечников разделения / *Nakamura Naomichi, Higuchi Kazio* // Kawasaki steel techn. rept. – 2000. – № 42. – P. 30–35.
24. Магнитномягкие (спеченные) материалы с низкими потерями на перемагничивание и высокой степенью связи между частицами : пат. № 6129790 США, МПК⁷ H01 R1/24 // Materials Innovation, Inc. Lashmore David S., Bean Glenn L., Deresh Lev, Hua Zonglu. № 09/249342 ; Заявл. 11.02.1999 ; Опубли. 10.10.2000 ; НПК 148/307.
25. *Файнимидт Е.М.* Пароокислирование в кипящем слое / *Е.М. Файнимидт, А.П. Баскаков* // Сб. трудов V собрания металлургов России, Краснодар, 10–13 сент., 2001. – Краснодар : Изд-во КубГТУ, 2001. – С. 135–136.
26. *Буланов В.Я.* Влияние среды спекания на физические свойства материалов из железных порошков с предварительно окисленным поверхностным слоем / *В.Я. Буланов, Г.А. Дорогина, И.А. Кузнецов* // Физ. и химия обраб. матер. – 1999. – № 6. – С. 52–56.
27. *Бойков В.К.* Исследование возможности изготовления композиционного магнитномягкого материала из термоокисленного железного порошка, полученного распылением синтетического чугуна / *В.К. Бойков* // Тез. докл.

- XV Всесоюзной научно-техн. конф. – К. : ИПМ АН УССР, 1985. – С. 326–327.
28. Способ обработки прессовок из железного порошка, особенно рекомендуемый для магнитных изделий : пат. 5993729 США МПК⁶ B22 F3/02 // David E. Gay. – Заявл. 06.02.1997 ; Оpubл. 30.11.1999 ; НПК 419/2.
 29. Properties and applications of both sintered iron-bas soft magnetic material / *J.A. Bas, L. Paradelo, J.A. Calero, M.J. Dougan* // Euro PM 2000. Soft magnetic materials workshop, Munich, oct. – 2000. – P. 40–41.
 30. *David E. Gay*. High performace microencapsulated powders for varios P/M applications / *David E. Gay*. // The internetonal journal of powder metallurgy. – 1996. – V. 36, № 1. – P. 13–25.
 31. Anneled polymer – bonded soft magnetic body : пат. № 005589010A США кл. H01 F1/22 / *David E. Gay*. Заявл. 24.11.1995 ; Оpubл. 31.12.1996. НПК 148/306.
 32. *Joseph M. Capus*. PM soft magnetic gaining ground / *Joseph M. Capus* // Metal powder report. – 1998. – V. 53, № 9. – P. 22–23.
 33. *Kazuo Asaka* Hitachi Powder Metals Co Ltd, Mechanical Parts Desingn Dept, Japan, “Soft Magnetic Materials and their Applications” Euro PM2000, Soft Magnetic Materials Workshop. – Pp. 45–51.
 34. *Donaldson I.W.* GKN Sinter Metals, Workester, MA, USA “The effect of processing and density on PM soft magnetic properties” Euro PM 2004 / *I.W. Donaldson, F. Hanejko*. – Pp. 561–567.
 35. *Ianta Tomasz* “PM Soft Magnetic Composites versus Electical Sheets”, Poland, Euro PM 2000, SMM Workshop / *Tomasz Ianta, Andrzej Kordecki, Bogumi W. Glisku*. – Pp. 41–44.
 36. *Gelinas C.* “Use of soft magnetic composite materials in industrial application” / *C. Gelinas, P. Viarouge, J. Cros* Quebec Metal Powders Limited, Quebec, Canada, Euro PM – 2004. – Pp. 605–610.
 37. Origination and investigation of properties of powder magnetic-soft materials, based on the iron powders, clad with metal and non-metal components / *V.A. Maslyuk, O.A. Panasyuk, H. Danninger et al.* // Euro PM 2004. Austria Centre, Vienna, Austria 17–21 oct. 2004. – Vol. 4. – P. 577–581.
 38. *Lange A.* Application of soft magnetic powder in electric motors / *A. Lange*. // Euro PM 2000. Soft magnetic material workshop, Munich, october 2000. – P. 52–66.

39. *Jackson Dennif* Hoeganes widens its ferrous range / *Dennif Jackson* // Metal powder report. – 1998. – V. 53, № 9. – P. 26–27.
40. Судзуки К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори К. Хасимото ; под. ред. Ц. Масумото ; пер. с япон. – М. : Metallurgia, 1987. – 328 с.
41. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. – М. : Миссис, 2002. – 736 с.
42. Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М. : КомКнига, 2006. – 592 с.
43. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
44. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса и П.Аливисатоса ; пер. с англ. – М. : Мир, 2002. – 292 с.
45. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы : уч. пособ. / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
46. Магнитные наночастицы: методы получения, строения свойства / С.П. Губин, Ю.А. Кокишаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи химии. – № 74 (6). – 2005. – С. 539–574.

МІНІЦЬКИЙ Анатолій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- розробка порошкових матеріалів;
- магнітно-м’які матеріали.

МІНІЦЬКА Наталія Валентинівна – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- нанокристалічні порошки;
- розробка композиційних матеріалів.

ВЛАСОВА Оксана Василівна – кандидат технічних наук, науковий співробітник Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- нанотехнології;
- магнітно-м’які матеріали.

Подано 17.09.2010