

Терновий Юрій Федорович, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-1078-4430
Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-7960-061X

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОВОГО РОЗПИЛЮВАННЯ РОЗПЛАВІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається можливість застосування методу газового розпилювання розплаву для одержання постійних магнітів на основі системи Fe-Nd-B. Показано, що в останні десятиріччя інтенсивно зростає обсяг виробництва ПМ на основі інтерметалідних сполук рідкоземельних металів із залізом. Магнітні властивості спечених ПМ зі сплавів Nd-Fe-B складним чином залежать від їх складу і структури, що, в свою чергу, визначаються способами їх одержання. Висвітлено можливості, переваги та недоліки різних способів виробництва магнітно-твердих матеріалів. Показано, що метод газового розпилювання за рахунок високих швидкостей розплаву в процесі охолодження дає змогу забезпечити для багатьох складнолегованих сплавів переохолодження, достатні для формування однорідного хімічного та структурно-фазового складу. Експериментально одержано зразки зі сплаву Fe-Nd-B за технологією, що включає виплавляння сплаву в індукційній печі, розпилювання одержаного розплаву нагрітим інертним газом, пресування порошку в орієнтованому магнітному полі, спікання та наступну термообробку. Наведені порівняльні результати вимірювань магнітних властивостей матеріалу на основі сплаву Fe-Nd-B свідчать, що оптимальною температурою підігріву газу можна вважати 523 К. Таким чином, використання порошку дрібних фракцій, одержаного за рахунок підігріву газу-енергоносія, для виробництва магнітопластів дозволяє підвищити рівень та стабільність магнітних властивостей постійних магнітів системи Fe-Nd-B.

Ключові слова: магнітно-твердий матеріал, інтерметалідна сполука, високо-швидкісне затвердіння розплаву, газове розпилювання порошку, гарячий газ, пресування, термообробка, магнітні властивості

Вступ. У наш час попит на постійні магніти, до яких відносяться магнітно-м'які, магнітно-тверді матеріали і магнітодіелектрики, стає дедалі більше. Застосування постійних магнітів (ПМ) замість електромагнітів дозволяє мініатюризувати прилади, створювати принципово нові конструкції, розширити області використання і знизити витрату електроенергії [1–3]. Особливо інтенсивно зростає обсяг виробництва магнітно-твердих матеріалів (МТМ) на основі інтерметалідних сполук рідкоземельних металів (РЗМ) з перехідними металами групи заліза [4]. МТМ з високим значенням залишкової намагніченості знаходять широке застосування в якості постійних магнітів у виробках електротехнічної, радіоелектронної, автомобільної, авіаційної та багатьох інших галузей промисловості, науки і техніки, медицини. Так, у період з 1983 по 2006 рр. промисловий випуск спечених ПМ і магнітопластів на основі сплавів системи Nd-Fe-B збільшився з меш ніж 1,0 т в 1983 р. до 150 тис. т в 2010 р. За останні десятиліття виробництво Nd-Fe-B-магнітів змінилося не тільки кількісно, але і якісно: розпочавшись в лабораторії, воно трансформувалося в самостійну індустрію в світовому бізнесі. У вартісних показниках виробництво Nd-Fe-B магнітів складає зараз близько 3,0 трлн дол. США, з них 2,44 трлн дол. США відноситься до спечених магнітів і 0,44 трлн дол. США – до магнітопластів [5].

Аналіз літературних даних. Магнітно-тверді матеріали є матеріалами, що володіють значною коерцитивною силою, високою залишковою магнітною індукцією і малою

магнітною проникністю [6]. Існує кілька груп МТМ, що використовуються при виробництві постійних магнітів – матеріали, що не деформуються, деформуються, оксидні, магніти на основі РЗМ тощо. Кожна з них має свої особливості і переваги серед інших. Основними лідерами за магнітними гістерезисними властивостями є матеріали на основі РЗМ, зокрема, сплави системи *Nd-Fe-B* [7].

Наукові дослідження нового магнітного матеріалу – *Nd-Fe-B* – розпочалися з 80-х рр. ХХ ст., а його широке застосування в промисловості – з 1984 р. Виробники шукали магнітний матеріал, що володів би такою ж магнітною енергією як і *Sm-Co*, але був би значно дешевшим.

Інтерметалідна сполука $Nd_2Fe_{14}B$ з тетрагональною кристалічною структурою з 68 атомами в елементарній комірці стало основою для створення постійних магнітів, які зараз мають найвищі значення магнітної енергії до 440 кДж/м³ (теоретична межа 512 кДж/м³) та остаточної індукції до 1,41 Тл [8]. Їх магнітна енергія у 8...10 разів вище, ніж у феритових магнітів, у 5...10 разів – ніж у магнітів класу альніко і в 2...3 разів – ніж *Sm-Co* магнітів. Магніти *Nd-Fe-B* володіють широким діапазоном робочих температур (від 233 К до 423 К), деякі їх різновиди можна використовувати до 473 К. Ще однією перевагою таких магнітів порівняно із феритами, альніко і іншими магнітними матеріалами є високі магнітні властивості за значно менших розмірах і вазі.

Відомі різні способи виробництва магнітно-твердих матеріалів:

- лиття-прокатка з розплавів з наступною термообробкою;
- виготовлення магнітів з швидко загартованих порошків і стрічок з нанокристалічною структурою [9–10];
- відцентрове розпилювання, високошвидкісне гартування з наступним пресуванням і спіканням в атмосфері аргону [11–12].

Проте під час одержання МТМ матеріалів методами прокатки різко падає коефіцієнт використання матеріалу, неможливо одержати магніти складної форми, знижується рентабельність виробництва. Методом лиття важко виготовити дрібні магніти масою до 200 г, особливо складної форми. Вихід придатної продукції під час лиття дрібних деталей становить всього 10...20%.

Найбільш поширеним методом екстракції з розплавів є високошвидкісне затвердіння розплаву (ВЗР), яке дає зойк одержувати з надвисокими швидкостями охолодження (до $10^6...10^8$ К/с) матеріали у вигляді безперервного волокна, стрічки або порошку лускатої, голчастої або іншої форми. Суть ВЗР полягає в короткочасному контакті розплавленого металу з краєм тепловідводного диска, що обертається з великою швидкістю. Гранулометричний склад і форма порошків цілком визначаються конфігурацією робочого краю тепловідводного диска [13].

Одним з перспективних методів одержання постійних магнітів можна вважати порошкову металургію, яка дає змогу одержувати вироби практично без припусків на обробку та забезпечити високі магнітні характеристики. Так, класична технологія порошкової металургії включає наступні основні операції: багатостадійне подрібнення магнітних сплавів до одержання частинок розміром 2...10 мкм; пресування порошків в магнітному полі за тиску 0,5...20 МПа; спікання пресовок за температурах 1343...1423 К; термообробка – відпал за температури 823...973 К та залишкове намагнічування в магнітному полі 20...70 кЕ залежно від складу постійного магніту [14].

Проте традиційна схема порошкової металургії (механічне подрібнення сплаву – пресування – спікання) в разі аморфних матеріалів, як правило, не може бути застосована через низьку стабільність таких сплавів.

Аморфний стан частинок сплавів системи $Nd-Fe-B$ може забезпечити газове розпилювання струменя розплаву, як більш технологічний і високопродуктивний метод. Метод газового розпилювання за рахунок високих швидкостей розплаву в процесі охолодження дає змогу забезпечити для багатьох складнолегованих сплавів переохолодження, достатнє для формування однорідного хімічного та структурно-фазового складу, аж до аморфного стану [15]. Це вигідно відрізняє зазначений метод від інших під час одержання напівфабрикатів РЗМ сплавів для виготовлення різних магнітних матеріалів.

Під час газового розпилювання з низьким тиском газу-енергоносія (1,0...1,7 МПа) для формування необхідної структури дисперговані краплі «змушують» ударятися о масивні кристалізатори. При цьому ЗРС-зразки формуються у вигляді флокенів з товщиною 1...6 мм [13]. Такі умови розпилювання дають змогу одержувати на флокенах сплаву системи $Nd-Fe-B$ $H_c = 5,0$ кЕ і $4\pi I_s = 6$ Тл. Збільшення тиску газу до 8 МПа гарантує умови охолодження, що забезпечують повну або часткову аморфізацію краплі розплаву під час її руху в газовому середовищі. ЗРС-частинки при цьому мають сферичну форму та розподіл за розмірами залежно від технологічних умов і складу розплаву.

Магнітні властивості спечених МТМ зі сплавів $Nd-Fe-B$ досить складним чином залежать від їх складу та структури [16]. Розміри цих частинок мають визначальне значення для магнітних властивостей матеріалів. Однією з головних причин змінювання фізичних і хімічних властивостей малих частинок в міру зменшення їх розмірів є зростання відносної частки «поверхневих» атомів, що знаходяться в інших умовах (координаційне число, симетрія локального оточення тощо), ніж атоми всередині об'ємної фази. З енергетичної точки зору зменшення розмірів частинки призводить до зростання ролі поверхневої енергії. В даний час відомо, що в наночастинках намагніченість на атом і магнітна анізотропія може бути помітно більше, ніж в масивному зразку, а відмінності в температурі Кюрі можуть скласти сотні градусів. Іншими словами, змінюючи розміри, форму, склад, будову наночастинок можна в певних межах управляти магнітними характеристиками матеріалів на їх основі [17].

Таким чином стабільно високий попит на високоенергетичні магніти і значна вартість імпортованих виробів зумовлюють необхідність проведення досліджень з розробки технологій одержання магнітів з заданим рівнем властивостей із сполук РЗМ-залізо-бор в результаті оптимізації технологічних параметрів.

Мета досліджень. Метою роботи було забезпечення одержання порошку більш дрібної фракції шляхом змінювання температури газу-енергоносія, та, за рахунок цього, підвищення рівня і стабільності магнітних властивостей виробів. Як було показано в роботі [18], Під час нагрівання газу-енергоносія, після утворення первинних крапель, на другій стадії, відбувається інтенсивна тепловіддача до газу та допускається динамічний вплив на краплі, що розширює факел розпилення, визначає нижчу імовірність зіткнення частинок під час кристалізації та сприяє вторинному дробленню крапель. Таким чином, використання гарячого газу для розпилення призводить і до зменшення середнього розміру частинок, і до зниження кількості дефектних гранул з сателітами, що дає змогу одержати більш ущільнені спресовані зразки.

Матеріали та методи досліджень. В умовах підприємства «УкрНДІспецсталь» виконано роботу з одержання порошкових сплавів системи $Nd-Fe-B$ за низьким тиском газу-енергоносія у вигляді сферичних частинок.

Головна частина досліджень. Для досягнення поставленої мети на першому етапі шихтову завалку (Fe, B) завантажували до індукційної печі та виплавляли в вакуумі, а перед появою рідкої ванни пічну камеру наповнювали аргоном до тиску

0,06...0,07 МПа, присаджували неодим (*Nd*) та продовжували плавку в інертному газовому середовищі. Перед зливанням металевого розплаву до металоприймача тиск в пічній камері та колоні розпилення зрівнювали до 0,10 МПа.

На другому етапі експерименту одержаний розплав розпилювали на установці розпилення рідкого металу УРЖМВ-3. Установка розпилювання складається з плавильного агрегату (індукційної печі), герметично з'єднаних металоприймача, камери розпилення та порошкоприймача. Установка також обладнана пристроєм для нагрівання інертного газу, що використовували для розпилення рідкого металу.

Розпилювання розплаву здійснювали підігрітим аргонном, температуру якого варіювали у межах 423...623 К. Розпилювання рідкого металу в порошок підігрітим інертним газом забезпечує одержання порошку більш дрібної фракції за рахунок збільшення швидкості газу-енергоносія та підвищення його в'язкості.

Одержаний порошок пресували на гідравлічному пресі зусиллям 250 т за тиску 100 МПа в орієнтуючому магнітному полі $H = 800$ кА/м. Далі здійснювали спікання в печі СНВЗ–1.3.1/1649 у вакуумі із залишковим тиском 0,0133 Па за температури 1323 К протягом 0,5 год., а потім охолоджували до температури навколишнього середовища зі швидкістю 100 К/хв.

Термообробку спечених виробів здійснювали в печі опору ПНВ-0,1 в середовищі аргону за температури 1863...1873 К протягом 0,5 год. із подальшим охолодженням до температури навколишнього середовища зі швидкістю 423 К/хв.

Аналіз результатів досліджень. Магнітні властивості виробів вимірювали на Холлівському коерциометрі з цілком замкнутим магнітним ланцюгом в полі до $H = 1600$ кА/м відповідно до ГОСТ 21559–76.

Для порівняння виготовили зразки зі сплаву *Fe-Nd-B* за способом, описаним у роботі [19], який включає виплавляння сплаву з шихти залізо-бор в вакуумі з присадкою неодиму, розпилювання одержаного розплаву в порошок ненагрітим інертним газом, пресування порошку в орієнтуючому магнітному полі, спікання та наступну термообробку.

Результати вимірювань властивостей виробів, виготовлених за описаною вище технологією, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Властивості постійних магнітів системи *Fe-Nd-B*

| Температура газу-енергоносія, К | Магнітні властивості | | | Механічні властивості | |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|---|-----------------------|------------------------------|
| | Коерцитивна сила H_c , кА/м | Залишкова індукція, Тл | Енергетичний добуток ($H_c \cdot B_r$), кДж/м | Мікро-твердість, ГПа | Межа міцності за стиску, МПа |
| 1403 | 978...982 | 1,22...1,24 | 296...302 | 13...15 | 650...680 |
| 1423 | 990...1002 | 1,22...1,24 | 310...316 | 15...17 | 680...710 |
| 1523 | 1006...1018 | 1,22...1,24 | 318...324 | 16...18 | 700...740 |
| 1623 | 990...1002 | 1,22...1,24 | 310...316 | 15...17 | 680...710 |
| 1643 | 978...982 | 1,22...1,24 | 296...302 | 13...15 | 650...680 |
| порівняльний зразок | 978...982 | 1,22...1,24 | 296...302 | 13...15 | 650...680 |

З даних табл. 1 видно, що властивості магнітів, виготовлених за запропонованою технологією вище за властивості магнітів, виготовлених за порівняльним способом. Оптимальною температурою підігрівання газу можна вважати 1523 К. Вихід частинок сферичної форми за оптимальних параметрів складав 76%. Зменшення температури газу-енергоносія менше 423 К та підвищення вище 1623 К не призводить до помітного поліпшення властивостей постійних магнітів.

Таким чином, використання порошку дрібних фракцій, одержаного за рахунок підігріву газу-енергоносія, дає змогу підвищити властивості постійних магнітів системи *Fe-Nd-B*, зокрема, рівень та стабільність магнітних властивостей.

Виконані дослідження магнітних властивостей одержаних магнітопластів (наповнювач – епоксидна смола) з газорозпиленого порошку в початковому та відпаленому стані ($T > T_{кр}$) показують, що відпал істотно підвищує значення коерцитивної сили (H_c) дрібнодисперсних порошків, що, в першу чергу, пов'язано з кристалізацією аморфного стану та формуванням фази $Nd_2Fe_{14}B$ з розміром зерна 0,1...1,0 мкм. Так, відпал за температури 773...973 К підвищує коерцитивну силу в середньому в чотири рази.

Висновки. Запропоновано технологічні параметри розпилювання, що дають змогу одержати газорозпилені порошки системи *Nd-Fe-B* дрібних фракцій з оптимальними магнітними властивостями. Встановлено, що під час підігріву газу-енергоносія до 523 К вихід частинок сферичної форми складав 76%.

Порошки системи *Nd-Fe-B* знайшли застосування як магнітно-твердий матеріал для виробництва високоенергетичних постійних магнітів для мікродвигунів, малогабаритних електронних приладів, вимірювальних приладів тощо. Такі магнітопласти відрізняються високим ступенем точності й однорідності магнітних характеристик.

Бібліографічний перелік

1. Розин П.А., Акимов А.В. Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах. *Известия МГТУ «МАМИ». Серия: Транспортные средства и энергетические установки.* 2014. № 2(20). Т. 1. С. 12–18.
2. Кондратьев В.Б. Глобальный рынок редкоземельных металлов. *Горная промышленность.* URL: <https://mining-media.ru/ru/article/ekonomicheskoe/12742-globalnyj-rynok-redkoze-melnykh-metallov>
3. Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Перминова С.Ю., Бабийчук А.В., Литовчук Ю.В. Применение постоянных магнитов в горнодобывающей, электротехнической и других отраслях промышленности. *Возобновляемая энергетика.* 2018. № 1(52). URL: <http://amtc.ru/upload/primeneniye-pm-v-promyshlennosti.pdf>
4. Харт У.Г. Тенденция развития и структура мирового рынка постоянных магнитов со связующими. *Тезисы докладов XIII Международной конференции по постоянным магнитам.* 25–29.09.2000. Суздаль. 2000. С. 18–19.
5. Савченко А.Г., Менушенков В.П. Основные направления развития высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов и технологий их производства в XXI веке. *Сборник тезисов конференции «Магниты и магнитные системы» Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2016».* Москва, 2016. С. 34–36.
6. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. Москва : Металлургия, 1989. 496 с.
7. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии. С-Пб. : Изд-во политехн. ун-та, 2010. 385 с.
8. Кекало И.Б., Менушенков В.П. Быстрозакаленные магнито-твердые материалы системы Nd-Fe-B. Москва : МИСиС, 2000. 118 с.
9. Мутников Н.В., Демин В.Б., Зеткин А.М. Магнитные свойства и микроструктура порошков Nd-Fe-B, полученных обработкой сплава в водороде. *Физика металлов и металловедение.* 1994. Том 77. Вып. 6. С. 53–59.
10. Митин Б.С., Васильев В.А. Получение аморфных и микроскристаллических материалов. Москва : ВИЛС, 1984. С. 32–37.
11. Железный М.В., Щетинин И.В., Базлов А.А., Занаева Э.Н. Структура и магнитные свойства сплавов $(Nd_{1-x}Ce_x)Fe_{11}Ti$ (где $0 \leq x \leq 0,3$), полученных методом закалки из жидкого состояния. *Сборник трудов XXIII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах».* 30.06.–5.07.2018, Москва. С. 54–55.
12. Groat J.J. Current Status of Rapidly Solidified Nd-Fe-B Permanent Magnets. *13-Jnt. Workshop on Rare Earth Magnets and their Applications.* 11–14.09.1994. Birmingham. P. 65–87.

13. Терновой Ю.Ф., Пашетнева Н.Н., Воденников С.А. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков. Запорожье : Издательство ЗГИА, 2010. 184 с.
14. Ветлугин Д. А., Софронов В. Л. Получение постоянных магнитов на основе Ne-Fe-B. *Отраслевая научно-практическая конференция «Технология и автоматизация атомной энергетики» ТAAЭ-2006*. С. 88.
15. Савин В.В., Терновой Ю.Ф. Перспективы применения газового распыления расплава многокомпонентных РЗМ-содержащих сплавов адсорбентов водорода и магнитных материалов. *Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов* : тезисы докладов X Международной конференции. 22–28.09.2017, Судак. Киев : ИПМ НАНУ, 2007. С. 1100–1101.
16. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. Москва : Высшая школа, 1981. 335 с.
17. Брехаря Г.П., Васильева Е.А., Конев Н.Н. Структура и магнитные свойства легированных Fe-Nd-B сплавов, закаленных из жидкого состояния. *Физика металлов и металловедение*. 1990. Т. 5. № 11. С. 63–66.
18. Терновий Ю.Ф., Лічконенко Н.В. Про вплив температури газу та розплаву на розміри мікрогранул за газовим розпиленням. *Металургія*. 2020. Вип. 1. С. 27–35.
19. Способ получения порошковых потонных магнитов системы Fe-Nd-B : пат. 42901 СССР : МПК H01F1/032 B22F3/24 B22F1/00. № заявки 4870952; заявл. 01.10.1990; опубл. 15.11.2001.

References

1. Rozin P.A., Akimov A.B. Primenenie magnitotverdykh materialov v elektricheskikh mashinakh na transportnykh sredstvakh. *Izvestiya MGTU "MAMI". Seriya: Transportnye sredstva i energeticheskie ustanoki*. 2014. No 2(20). T. 1. S. 12–18.
2. Kondratev V.B. Globalnyy rynek redkozemelnykh metallov. *Gornaya promyshlennost*. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/ekonomicheskoe/12742-globalnyj-rynok-redkozemelnykh-metallov>
3. Perminov Yu.N., Kokganeich V.P., Perminova S.Yu., Babiychuk A.V., Litochuk Yu.V. Primenenie postoyannykh magnitov v gornodobyvayushchey, elektrotekhnicheskoy i drugikh otraslyakh promyshlennosti. *Ozobnovlyаемая энергетика*. 2018. No 1(52). URL: <http://amtc.ru/upload/primenenie-pm-v-promyshlennosti.pdf>
4. Khart U.G. Tendentsiya i struktura mirivogo runka postoyannykh magnitov so syazuyucshimi. *Tezisy dokladov XIII Mezhnatsionnoy konferentsii po postoyannym magnitam*. 25–29.09.2000. Suzdal, 2000. S. 18–19.
5. Savchenko A.G., Menushenkov V.P. Osnovnye napravleniya razvitiya vysokoenergeticheskikh redkozemelnykh postoyannykh magnitov i technologii ikh proizvodstva v XXI veke. *Sbornik tezisov konferentsii "Magnity i magnitnye sistemy" Mezhdunarodnogo voenno-technicheskogo foryuma "Armiya-2016"*. Moskva, 2016. S. 34–36.
6. Kekalo I.B., Samarin B.A. Fizicheskoe metalloedenie pretsizionnykh splavov. Splavy s oosobymi magnitnymi svoystvami. Moskva : Metallurgiya, 1989. 496 s.
7. Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko B.N. Sovremennyye tekhnologii v poroshkovoy metallurgii. S-Pb. : Izd-o politekh. un-ta, 2010. 385 s.
8. Kekalo I.B., Menushenkov V.P. Bystrozakalennyye magneto-tverdye materialy sistemy Nd-Fe-B. Moskva : MISiS, 2000. 118 s.
9. Mutnikov N.V., Demin V.B., Zetkin A.M. Magnitnye svoystva i mikrostruktura poroshkov Nd-Fe-B, poluchennykh obrabotkoy splava v vodorode. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1994. T. 77. Вып. 6. S. 53–59.
10. Mitin B.S., Vasilev V.A. Poluchenie amorfnykh i mikrokristallichesikh materialov. Moskva : VILS, 1984. S. 32–37.
11. Zheleznyy M.V., Schetinin I.V., Bazlov A.A., Zanaeva E.N. Struktura i magnitnye svoystva splavov $(Nd_{1-x}Ce_x)Fe_{11}Ti$ (gde $0 \leq x \leq 0,3$), poluchennykh metodom zakalki iz zhidkogo sostoyaniya. *Sbornik trudov XXIII Mezhnatsionnoy konferentsii "Novoe v magnetizatsii i magnitnykh materialakh"*. 30.06.-5.07.2018, Moskva. S. 54-55.
12. Groat J.J. Current Status of Rapidly Solidified Nd-Fe-B Permanent Magnets. *13-Jnt. Workshop on Rare Earth Magnets and their Applications*. 11–14.09.1994. Birmingham. P. 65–87.
13. Ternovoy Yu.F., Pashetneva N.N., Vodennikov S.A. Polufabrikaty i izdeliya iz raspylenykh metallicheskh poroshkov. Zaporozhe : Izdatelstvo ZGUA, 2010. 184 s.
14. Vetlugin D.A., Sofronov V.L. Poluchenie postoyannykh magnitov na osnove Ne-Fe-B. *Otraslevaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Tekhnologiya i avtomatizatsiya atomnoy energetiki" TAAE*. 2006. S. 88.

15. Savin V.B., Ternovoy Yu.F. Perspektivy primeneniya gazovogo raspyleniya rasplava mnogo-komponentnykh RZM-soderzhasch splavov adsorbentov vodoroda i magnitnykh maaterialov. *Vodorodnoe materialovedenie i khimiyananomaterialov* : tezisy dokladov X Mezhdunarodnoy konferentsii. 22–28.09.2017, Sudak. Kiev : IPM NASU. 2007. S. 1100–1101.

16. Mishin D.D. Nagnitnye materialy. Moskva : Vysshaya shkola, 1981. 335 s.

17. Brekharya G.P., Vasileva E.A., Konev N.N. Struktura i magniynye svoystva legirovannykh Fe-Nd-B splavov, zakalennykh iz zhidkogo sostoyanya. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1990. T. 5. No. 11. S. 63–66.

18. Ternovoy Yu.F., Lichkonenko N.B. Pro vplyv temperatury rozply na pozmiroy mikrogranul za gazoym rozpylennym. *Металургія*. 2020. Выр. 1. S. 27–35.

19. Spocib otrbmannya poroshkovykh postiynykh magnitiv systemy Fe-Nd-B : pat. 42901 USSR : MPK H01 F1/032 B 22F3/24 B 22F1/00. No zayaky 4870952; zayal. 01.10.1990; opubl. 15.11.2001.

Ternovyy Yuri, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporozhe National University

Lichkonenko Natali, Senior Lecture, Zaporozhe National University

THE APPLICATION OF MELTS GAS SPRAYING TECHNOLOGY FOR OBTAINING MAGNETIC MATERIALS

The possibility of applying the method of gas spraying of the melt to obtain permanent magnets based on the Fe-Nd-B system is considered. It is shown that in recent decades the volume of PM production based on intermetallic compounds of rare earth metals with iron has been growing intensively. The magnetic properties of sintered PM from Fe-Nd-B alloys depend in a complex way on their composition and structure, which, in turn, are determined by the methods of their production. The possibilities, advantages and disadvantages of different methods of production of magnetically hard materials are highlighted. It is shown that the method of gas spraying due to high melt velocities in the cooling process makes it possible to provide for many complex-alloyed alloys supercooling sufficient for the formation of a homogeneous chemical and structural-phase composition. Samples of Fe-Nd-B alloy were experimentally obtained by a technology that includes smelting the alloy in an induction furnace, spraying the obtained melt with heated inert gas, pressing the powder in an orienting magnetic field, sintering and subsequent heat treatment. The presented comparative results of measurements of magnetic properties of material based on Fe-Nd-B alloy show that the optimal gas heating temperature can be considered 523 K. Thus, the use of fine powder obtained by heating energy gas for the production of magnetoplastics allows to increase the level and stability of magnetic properties of permanent magnets of the Fe-Nd-B system.

Keywords: magnetically hard material, intermetallic compound, high-speed melt curing, gas powder spraying, hot gas, pressing, heat treatment, magnetic properties

Стаття надійшла 02.11.2021 р.