

НОСЕНКО

Віктор Костянтинівич — доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу кристалізації Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

АМОΡФНІ ТА НАНОКРИСТАЛІЧНІ СПЛАВИ ДЛЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 25 лютого 2015 року

Висвітлено результати розроблення технології отримання магнітом'яких аморфних і нанокристалічних стрічкових сплавів на основі заліза надшвидким охолодженням розплаву, а також виготовлення з них магнітопроводів з високою термічною стабільністю магнітних властивостей. Наведено приклади впровадження розроблених нанокристалічних магнітопроводів, трансформаторів і дроселів на їх основі в таких галузях промисловості, як енергетика, силова електроніка, приладобудування. Проаналізовано перспективи їх широкомасштабного застосування.

Ключові слова: аморфні та нанокристалічні сплави, технологія надшвидкого охолодження розплаву, приладобудування, енергозбереження.

Вступ

Однією з найактуальніших проблем сучасного етапу технічного прогресу є енергозбереження, яке забезпечується створенням ресурсощадних технологій, матеріалів і устаткування. Важливе місце у вирішенні цієї проблеми посідають нові матеріали з аморфною і нанокристалічною структурою та технології їх отримання. Сьогодні кардинальне технічне й технологічне оновлення підприємств, що випускають вироби для радіоелектронної техніки, приладобудування та енергетики [1], неможливе без розроблення та впровадження нового високопродуктивного технологічного обладнання для отримання нових аморфних і нанокристалічних сплавів за технологією надшвидкого охолодження розплаву (НШОР).

Нині українські показники енергоспоживання є одними з найвищих у світі, вони в 4 рази більші, ніж у країнах — членах ЄС. За інформацією Міністерства палива та енергетики, у 2013 р. енергоспоживання в Україні становило 147 264 млн кВт·год, при цьому технологічні втрати електроенергії на її транспортування та розподіл електричними мережами були

на рівні 18 997 млн кВт·год (12,8%). Основною причиною таких великих втрат є те, що сьогодні в Україні більша частина генеруючих активів (близько 200 тис. трансформаторних підстанцій напругою 6–150 кВ і приблизно 1 млн км ліній електропередач) зношені більш ніж на 35%, а також низькоефективні [2]. Модернізації та оновлення потребують електрообладнання, системи автоматики й безпеки (зокрема, обладнання для релейного захисту високовольтних мереж), системи ведення обліку електроспоживання. В Україні експлуатують понад 100 тис. вимірювальних трансформаторів струму низького класу точності з осердями із трансформаторної сталі, в яких загальний недооблік електроенергії становить більш як 200 тис. МВт·год. Крім того, в інтересах національної енергетичної безпеки розроблення нових технологій, виготовлення сучасних магнітом'яких матеріалів та електротехнічного обладнання має здійснюватися в Україні.

Загалом у світі 97% осердь трансформаторів і двигунів виготовляють з неефективних сталевих Fe-3% Si стрічок та листів. Щороку людство втрачає 670 ТВт·год (3,4% загального споживання енергії) через теплові втрати в залізі. За оцінками експертів [3], використання нових нанокристалічних сплавів FeSiBPCu тіль-

ки в період до 2020 р. може зберегти 297 млн т нафти. Для зменшення гігантських втрат потужності в умовах нинішнього очікування високої ефективності та поліпшених технічних характеристик гібридних/електричних транспортних засобів необхідно розробляти нові магнітом'які матеріали з великою індукцією насичення в поєднанні з малими питомими втратами на перемагнічування.

З огляду на вищевикладене в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України проведено цикл досліджень, основною ідеєю яких було розроблення і використання нових магнітом'яких аморфних і нанокристалічних стрічкових сплавів замість традиційних кристалічних матеріалів з метою вирішення проблем енергозбереження. Причому головним нашим гаслом було: кожному замовнику – конкретний сплав і виріб з комплексом потрібних йому електромагнітних властивостей.

Отримання, структура та властивості аморфних сплавів

За швидкості охолодження розплаву до 10^6 К/с атоми сплаву певного хімічного складу не встигають сформувати кристалічну ґратку, і він твердне в аморфному стані. Особливістю

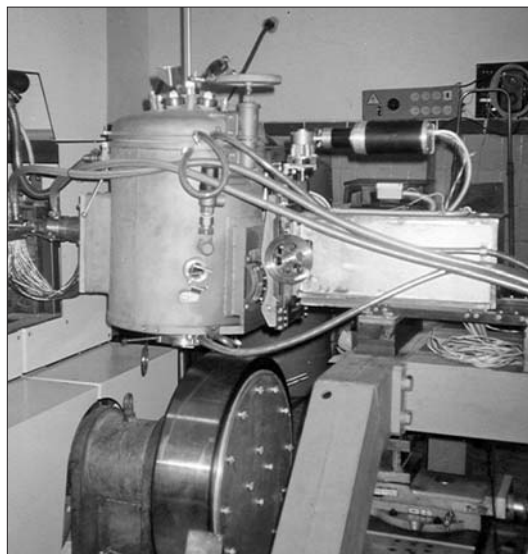
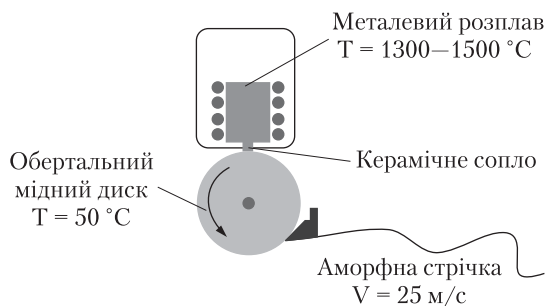


Рис. 1. Схема процесу спінінгування розплаву та напівпромислова установка виготовлення аморфної стрічки

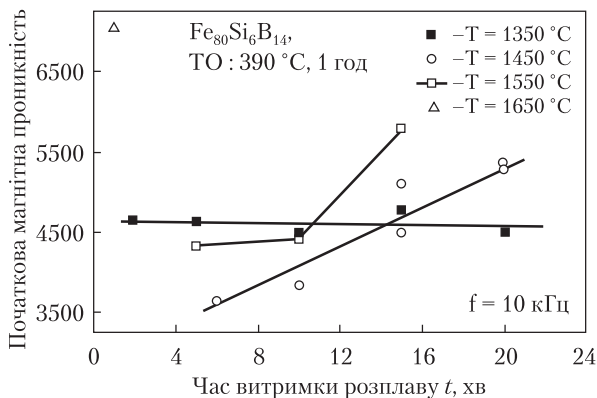


Рис. 2. Вплив температурно-часової обробки розплаву на магнітні (початкова проникність) властивості аморфних стрічок сплаву $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$

аморфних магнітом'яких сплавів (АМС) порівняно з кристалічними є великий (близько 20%) вміст немагнітних елементів, таких як бор, кремній (вуглець, фосфор) та ін., необхідних для склоутворення і стабілізації аморфної структури при швидкому твердінні з розплаву [4, 5]. Наявність цих елементів знижує максимальні значення індукції насичення в аморфних сплавах порівняно з кристалічними і збільшує температурний коефіцієнт магнітних властивостей. Ці ж елементи посилюють електроопір, підвищують твердість, міцність і корозійну стійкість аморфних сплавів. Типовий склад АМС — $(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni})_{70-85}(\text{Si}, \text{B}, \text{P}, \text{C})_{15-30}$ в ат. % можна широко варіювати, що дозволяє перекрити великий спектр магнітом'яких властивостей залежно від заданих вимог.

Для отримання вихідних аморфних стрічок товщиною 17–25 мкм і шириною 6,5–25 мм було використано метод одновалкового спінінгування розплаву на повітрі [6] (рис. 1). Розроблена технологія дозволяє одержувати до 95% придатної стрічки в одному виробничому циклі, що в 1,5–2 рази більше за показники відомих промислових компаній.

Структура АМС характеризується відсутністю далекого порядку в розташуванні атомів і демонструє тільки близький порядок зі структурною кореляційною довжиною на рівні атомних відстаней. Це фактично миттєвий знімок випадкової атомної конфігурації рідкого

розплаву, замороженого за типової швидкості охолодження 10^5 – 10^6 К/с. Аморфна стрічка формується на диску-холодильнику зі швидкістю 25–35 м/с, що дозволяє отримувати понад 2 км стрічки за 1 хв технологічного процесу НШОР. Для порівняння: тонкі листи традиційних металевих сплавів потребують серії відносно повільних (до 1 м/с) стадій гарячої і холодної прокатки. Це означає, що чим тоншим виходить кінцевий розмір, тим важчим і дорожчим стає процес виробництва.

В Інституті створено технологічний модуль для НШОР з продуктивністю близько 5 т/рік аморфних і нанокристалічних стрічок магнітом'яких сплавів, який може стати базовим для серійного виробництва і використовуватися на металургійних підприємствах країни (рис. 1).

Обладнання, що запускається нині, дозволить щороку випускати близько 1 млн одиниць аморфних і нанокристалічних магнітопроводів різного призначення і розмірів.

Слід підкреслити, що процес НШОР відповідає найвищим вимогам законодавства про охорону навколишнього середовища.

Відомо, що атомна структура АМС характеризується мікрогетерогенною будовою, створеною нанокластерами з різним локальним близьким порядком. У результаті термообробки сплавів певного хімічного складу з таких кластерів утворюється нанокристалічна структура з унікальними електромагнітними властивостями, в якій розміри кристалів і магнітних доменів (8–15 нм) у тисячі разів менші, ніж зазвичай. Встановлено, що схильність розплавів до склоутворення, механізми нанокристалізації, магнітні й механічні властивості аморфних сплавів визначаються особливостями топологічного і композиційного упорядкування, на які можна впливати як зміненням хімічного складу сплавів, так і температурно-часовою обробкою розплавів перед загартуванням. Наприклад, збільшення перегріву розплаву $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$, так само як і часу його витримання за температури понад 1350 °C, сприяє істотному (до 50%) підвищенню початкової магнітної проникності аморфного сплаву піс-

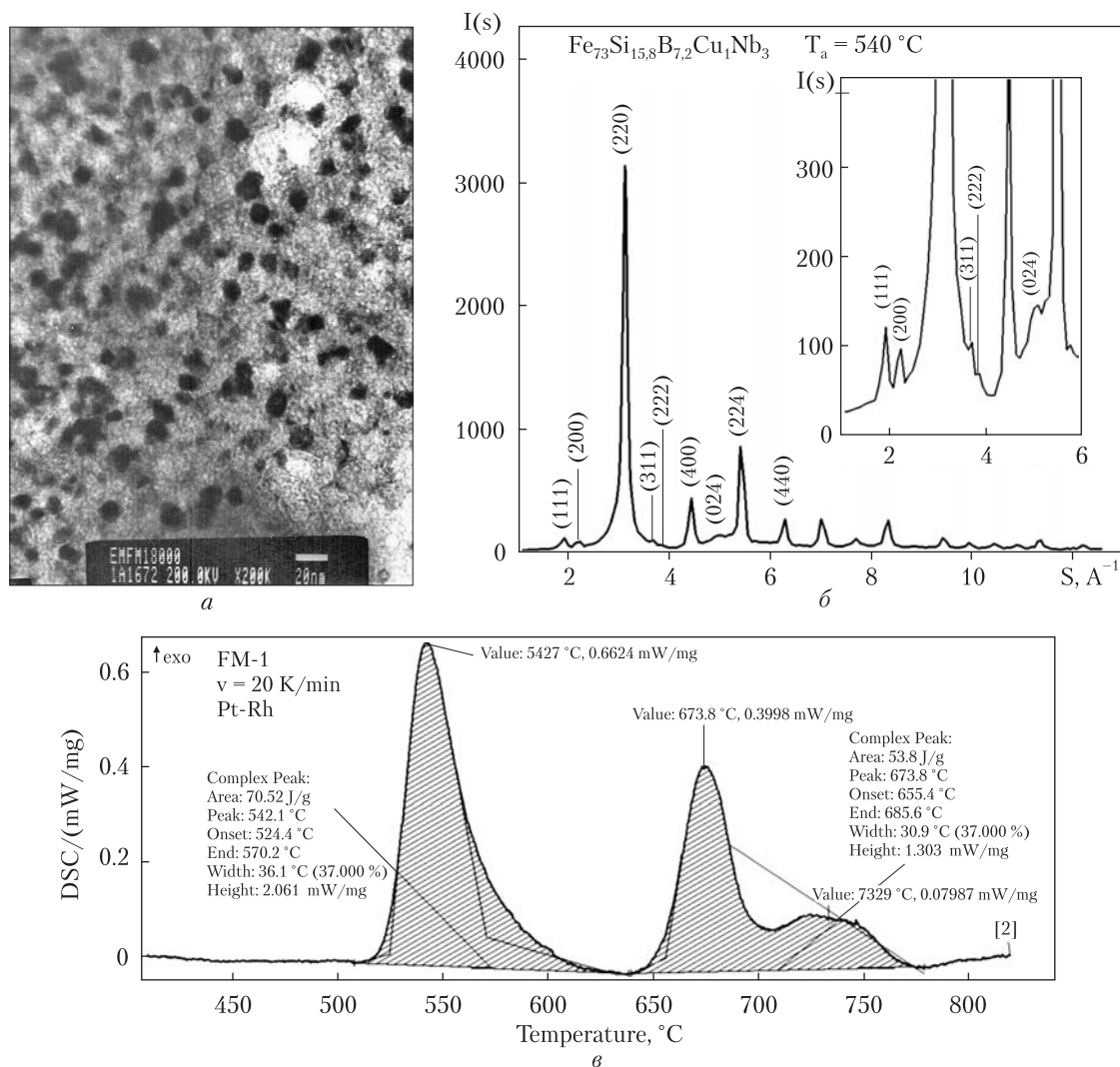


Рис. 3. Двофазна структура нанокристалічного сплаву $(\text{FeSiB})_{96}(\text{CuNb})_4$: а – ТЕМ-мікрофотографія; б – рентгенограма; в – ДСК-крива нанокристалізації

ля його оптимальної термообробки (рис. 2). Є всі підстави вважати, що цей ефект є наслідком успадкування особливостей структурного стану розплаву [7, 8], зумовлених його попередньою температурно-часовою обробкою.

Структура та магнітні властивості нанокристалічних сплавів

Нанокристалічного стану досягають послідовною термічною обробкою АМС за температури, вищої, ніж температура їх кристалізації. За-

звичай кристалізація аморфних металів значно погіршує їх магнітом'які властивості і формує відносно грубу мікроструктуру з розміром зерен близько $0,1\text{--}1 \text{ мкм}$. Проте в 1988 р. автори роботи [9] встановили, що кристалізація АМС $\text{Fe}\text{--}\text{Si}\text{--}\text{B}$ з додавкою невеликих кількостей Cu і Nb дозволяє отримати надтонку зернисту структуру ОЦК $\text{Fe}(\text{Si})$ з типовим розміром зерен $d_1 = 10\text{--}15 \text{ нм}$, включених в аморфну матрицю.

В останні роки в Інституті проводили фундаментальні дослідження взаємозв'язку рівня

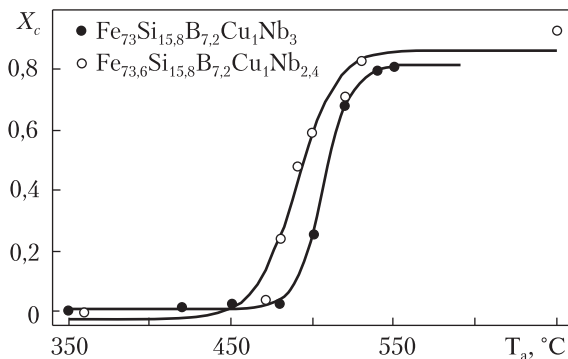


Рис. 4. Температурна залежність частки перетвореного об'єму в нанокристалічних сплавах різного хімічного складу ММ-1Н (○) та ММ-11Н (●)

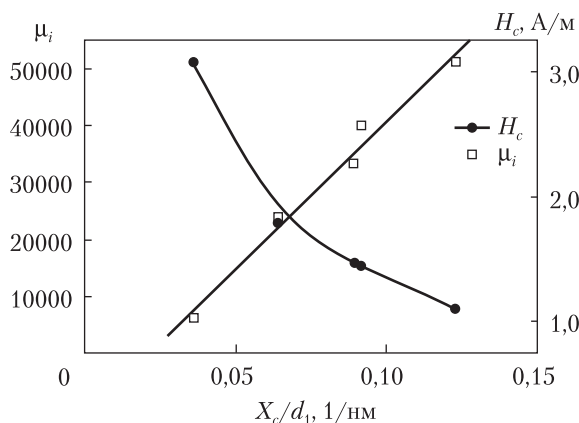


Рис. 5. Початкова магнітна проникність (μ_i) і динамічна коерцитивна сила (H_c) на частоті 1 кГц для осердь сплаву ММ-11Н залежно від структурного параметру X_c/d_1

магнітних властивостей з умовами отримання і атомною будовою сплавів з аморфною структурою на основі заліза типу Finemet. У результаті було створено нові економно леговані нанокристалічні сплави цього типу [6], серед яких за рівнем магнітом'яких властивостей найкраще зарекомендували себе нанокристалічні сплави $(\text{FeSiB})_{96,6}(\text{CuNb})_{3,4}$ – ММ-1Н і $(\text{FeSiB})_{96}(\text{CuNb})_4$ – ММ-11Н. Розроблені на основі цих сплавів електромагнітні компоненти відповідають рівню найкращих виробів зарубіжних фірм Hitachi (Японія), Vacuumschmelze (Німеччина), Allied Signal (США) та вимогам для пристроїв, що працюють у режимі середньочастотного перемикавання.

На рис. 3 наведено рентгенограму і характерну наноструктуру сплаву $(\text{FeSiB})_{96}(\text{CuNb})_4$ – ММ-11Н. Типова нанокристалічна структура з хорошими магнітом'якими властивостями утворюється, якщо аморфний стан кристалізується шляхом первинної кристалізації ОЦК $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ перед тим, як утворюються інтерметалічні фази, такі як бориди Fe_3B або Fe_2B .

Дуже висока швидкість зародження і повільний ріст кристалічних виділень заліза необхідні для отримання наномасштабної мікроструктури і можуть бути отримані лише за умови правильного вибору складу сплаву (рис. 4). Одночасне додавання Cu і Nb призводить до утворення нанокристалічної структури, в якій мідь збільшує зародження зерен $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$, а ніобій, накопичуючись на фронті кристалізації, заважає укрупненню і водночас перешкоджає утворенню боридів [10]. Кінцева мікроструктура характеризується випадково орієнтованими наддрібними зернами упорядкованого за типом DO_3 твердого розчину кремнію (до 20 ат.%) у залізі; залишкова аморфна матриця займає ~20–30% об'єму і розділяє кристаліти на відстані ~1–2 нм. Ці особливості і є основою для чудових магнітом'яких властивостей, до яких належать висока початкова проникність $3 \cdot 10^4$ – 10^5 і, відповідно, коерцитивна сила, менша за 1 А/м.

Автори роботи [11] на великій кількості нанокристалічних сплавів показали, що коерцитивна сила і початкова проникність змінюються з розміром зерен як $H_c \sim d_1^6$ та $\mu_i \sim 1/d_1^6$. Ці залежності виконуються для кристалітів з розмірами ≤ 100 нм. Ми ж для сплавів оптимізованого складу встановили (рис. 5), що на магнітом'які властивості цих сплавів, крім розмірів d_1 , істотно впливає також об'ємна густина X_c нанокристалів $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$: чим менші розміри кристалів та чим більша їх щільність, тим вищі магнітні властивості сплаву.

Запропоновано модель, що більш адекватно описує кінетику ізотермічної нанокристалізації (рис. 4), ніж класична модель Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврамі (КДМА):

$$X(t) \approx 1 - \exp\left[-(4\pi/3)N_+R_{Z,H}^3(t)\right]. \quad (1)$$

Грунтуючись на даних аналізу кінетики формування нанокристалів α -Fe, запропоновано розглянути процес нанокристалізації як такий, що відбувається завдяки росту попередньо сформованих зародків; при цьому на початкових етапах розміри нанокристалів збільшуються згідно з законом параболічного росту ($r \approx \sqrt{Dt}$, D – коефіцієнт дифузії), а на завершальній стадії, коли r наближається до кінцевого значення, ріст гальмується внаслідок зіткнення дифузійних зон.

Малий розмір зерен у сплаві $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ [9] та в сплавах подібного складу є вирішальним у пригніченні магнітокристалічної анізотропії. При цьому головним є те, що фази, утворені при кристалізації цих сплавів, можуть одночасно призводити до малої, майже нульової магнітострикції насичення λ_s . Саме зменшення λ_s в кінцевому підсумку відповідає за одночасне збільшення початкової проникності при нанокристалізації. У нашому випадку ми маємо справу з малими феромагнітними кристаликами, пов'язаними обмінними взаємодіями [9–12], з малою коерцитивною силою і водночас з високою проникністю, що є наслідком згладжувального ефекту обмінної взаємодії для структурних кореляційних довжин, набагато менших, ніж ширина стінок доменів [13, 14].

Отже, ці нові нанокристалічні сплави мають чудові магнітом'які властивості, досі досягнуті лише в Мо-пермалоях і аморфних сплавах на основі Со, але за значно вищої індукції насичення ($B_s = 1,2$ т і більше), яка характеризує потенційну енергомісткість матеріалу.

Приклади впровадження нанокристалічних магнітопроводів

Малі втрати на вихрові струми стрічкових осердь з аморфних або нанокристалічних стрічок по суті зумовлені розміром тонкої стрічки $d \approx 20$ мкм і відносно високим електричним питомим опором ($\rho \approx 100$ – 130 мкОм·см), що залежить від мікроструктури. Як видно з рис. 6, питомі втрати в нанокристалічних осердях становлять 50–60 Вт/кг при 100 кГц, 0,2 Т і 25°C

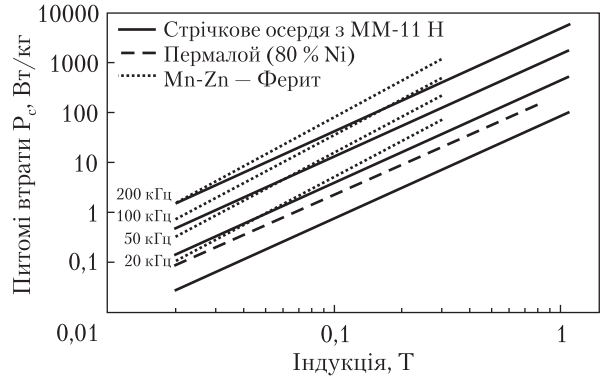


Рис. 6. Залежність втрат в осерді від частоти для магнітом'яких матеріалів для середньочастотних силових трансформаторів

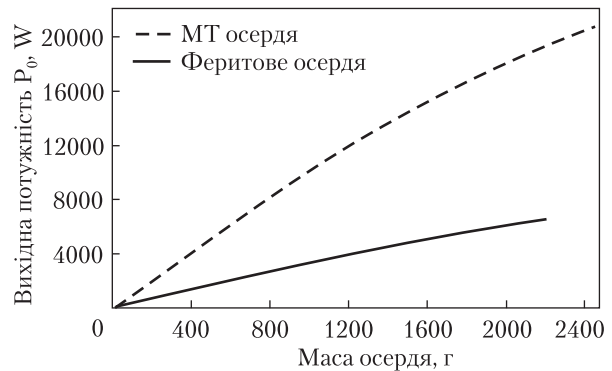


Рис. 7. Порівняння вихідної потужності силових трансформаторів, виконаних з використанням нанокристалічних і феритових осердь

проти 180 Вт/кг для феритів. На більш низьких частотах перетворення позитивна різниця виявляється ще більшою. Завдяки цьому під час розроблення імпульсних джерел живлення масогабарити вихідного трансформатора вдається зменшити від 2 до 8 разів порівняно з трансформатором на Mn-Zn-фериті (рис. 7).

Відомо, що магнітна анізотропія за умови правильного використання може бути потужним інструментом регулювання форми петлі гістерезису відповідно до вимог різних застосувань. Як в аморфних, так і в нанокристалічних матеріалах її можна реалізувати відпалюванням або в магнітному полі, або при розтягувальних напруженнях, причому обидва способи дають однорідну одновісну анізотропію.

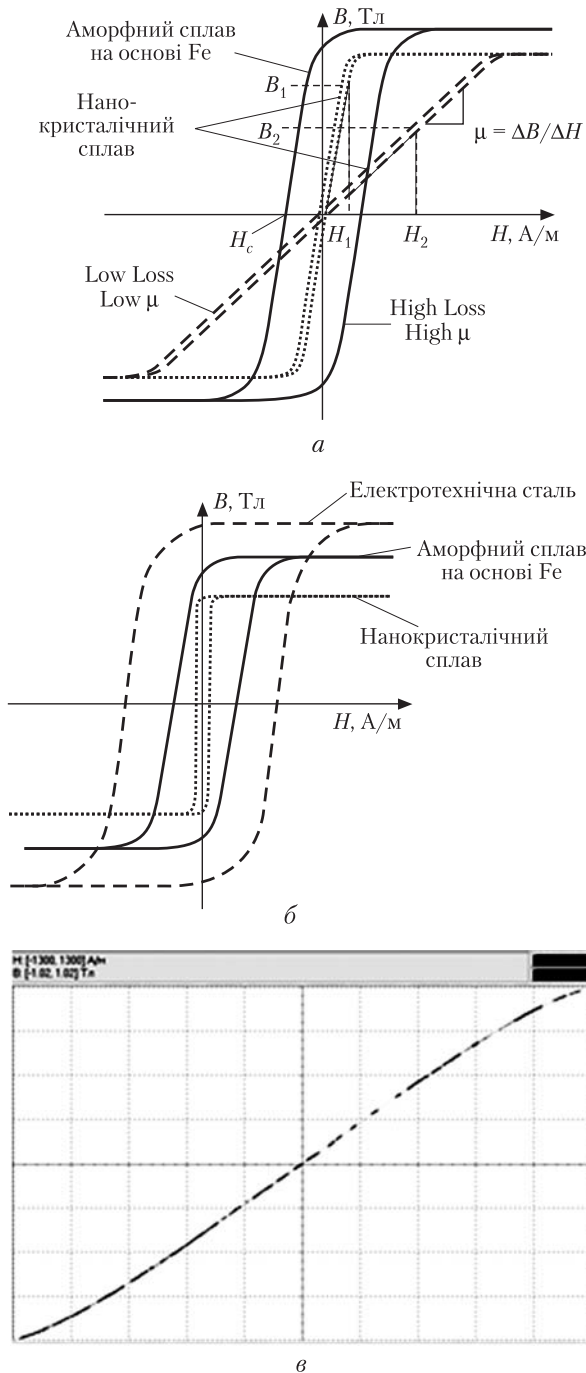


Рис. 8. Приклади петель гістерезису: *a* – після різних термообробок нанокристалічного сплаву; *б* – просто аморфного сплаву (Fe–Si–В) і трансформаторної сталі; *в* – приклад безгістерезисної петлі перемагнічування осердя зі сплаву ММ-12Н з поперечною магнітною анізотропією, наведеною термомеханічною обробкою

Відпал у магнітному полі наводить одновісну анізотропію з легкою віссю, паралельною напрямку магнітного поля, прикладеного при термообробці. Утворення анізотропії пов'язане з напрямленим атомним упорядкуванням уздовж напрямку локальної намагніченості для мінімізації енергії спин-орбітального зв'язку [15]. Лінійні петлі для нанокристалічного сплаву (рис. 8*a*) отримували термообробкою в поперечному полі, тобто наведенням одновісної анізотропії перпендикулярно до осі стрічки. Процес намагнічування визначається обертанням векторів намагніченості від осі легкого намагнічування до напрямку осі стрічки. Це зумовлює отримання проникності μ_e практично постійної аж до магнітного насичення. Величина проникності визначається енергією константи наведеної анізотропії K_u :

$$\mu_e = \frac{J_s^2}{2\mu_0 K_u}, \quad (2)$$

де μ_0 – магнітна стала, J_s – намагніченість насичення. Ця лінійна форма петлі має найбільш відтворювані властивості, найменші втрати і, отже, є особливо важливою для застосування аморфних і нанокристалічних матеріалів.

Прямокутна петля (рис. 8*б*) з одновісною анізотропією, паралельною осі стрічки, досягається після термообробки в поздовжньому магнітному полі. Процес намагнічування контролюється переміщенням на 180° стінок доменів. У такий спосіб досягають найвищих значень максимальної проникності. Питомі втрати на перемагнічування в аморфних і нанокристалічних сплавах менші за втрати в електротехнічній сталі в 3 та 15 разів відповідно.

У наступних модифікаціях складу розроблених нанокристалічних сплавів встановлено нові можливості регулювання параметрів петлі перемагнічування. Зокрема, для модифікованого Со і Si нанокристалічного сплаву ММ-12Н уперше отримано ростову текстуру нанокристалів у вихідній стрічці, яка не зникає при подальшій термічній обробці і рості нанокристалів. Коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису (B_r/B_s) цього сплаву залежно від вимог можна змінювати від 0,05 до 0,9, ви-

користовуючи термічну та/або термомагнітну обробку магнітопроводів.

Регулювання параметрів петлі перемагнічування стало можливим також з використанням методики термомеханічної обробки стрічок сплавів ММ-11Н і ММ-12Н. На рис. 8в показано приклад безгістерезисної петлі перемагнічування осердя з поперечною магнітною анізотропією, наведеною термомеханічною обробкою стрічки при невеликому розтягуючому зусиллі, прикладеному при її охолодженні нижче температури Кюрі ($T_c = 600\text{ }^\circ\text{C}$).

Метою досліджень нових складів сплавів є збільшення намагніченості насичення до значення, близького до B_s чистого α -Fe, при збереженні майже нульової магнітострикції. Головна перешкода для отримання сплавів з високим вмістом заліза – недостатня склоутворююча здатність. Автори [16] повідомляли про отримання високих значень індукції насичення $B_s = 1,88\text{--}1,94\text{ Т}$ в поєднанні з малою коерцитивною силою $H_c = 7\text{--}10\text{ А}\cdot\text{м}^{-1}$ та низькою магнітострикцією $\lambda_s = 2\text{--}3\text{ ppm}$ в сплавах системи $\text{Fe}_{83,3\text{--}84,3}\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_{3\text{--}4}\text{Cu}_{0,7}$ завдяки одночасному введенню добавок P і Cu замість Nb або Ta.

Наші нові сплави, збагачені Fe, можна отримувати традиційними технологіями лиття на повітрі, хоча процес лиття слід ще оптимізувати з урахуванням зниженої склоутворюючої здатності. Подальші дослідження потрібні також для визначення умов відпалу, які є більш критичними для таких сплавів [17], ніж для добре відомих сплавів системи $\text{Fe}_{\text{bal}}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13\text{--}16}\text{B}_{6\text{--}8}$, зокрема ММ-11Н і ММ-12Н.

Порівняння основних магнітних характеристик кращих аморфних і нанокристалічних магнітопроводів із розроблених нами сплавів з властивостями трансформаторної сталі і пермалю наведено в таблиці.

На рис. 9 зображено важливі з практичного погляду температурні залежності властивостей наших нанокристалічних сплавів [6].

Поєднання високої індукції насичення і високої проникності разом з хорошою частотною характеристикою, малими втратами і відмінною термічною стабільністю дозволяє зменшити розмір і вагу магнітних компонентів, що

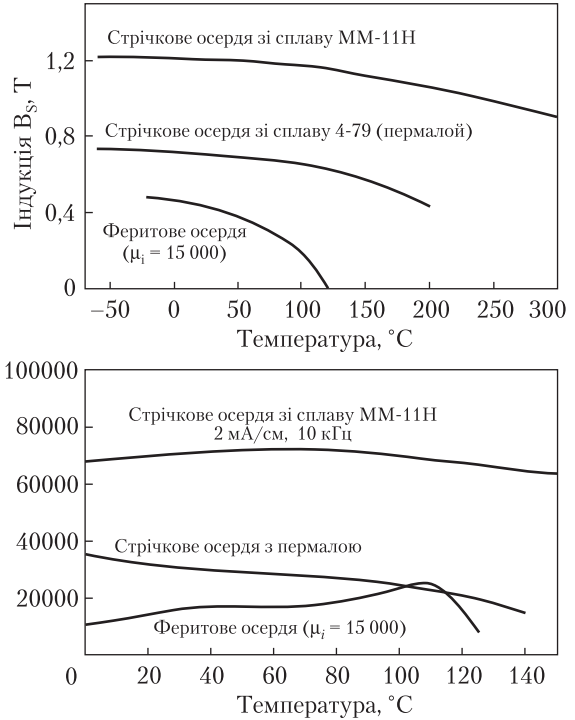


Рис. 9. Температурна стабільність індукції насичення (а) і початкової магнітної проникності (б) нанокристалічних сплавів

Основні магнітні характеристики кращих аморфних і нанокристалічних магнітопроводів порівняно з традиційними кристалічними сплавами

Сплав	B_s , Т	H_c , А/м	μ_i	$P_{10/400}$ *, Вт/кг	$P_{10/1000}$, Вт/кг
ММ-2 (АМС–FeNiMoSiB)	1,50	3,5	3500–7000	2,0	6,0
ММ-11Н (НКС–FeSiBAlNbCu)	1,25	0,5	40000–120000	0,4	1,2
$\text{Fe}_{83}\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ (НКС)	1,82	3–5	20500	4,77	13,9
Пермалой	0,8	0,5	50000	–	–
81НМА (стрічка сплаву NiMoFe)	1,85	4,5	2000–5000	5,98	18,7
Fe–6,5 мас. % Si	1,85	4,5	2000–5000	5,98	18,7
Fe–3 мас. % Si	2,03	8	1700	7,8	27,1

* $P_{10/400}$ і $P_{10/1000}$ – втрати в осерді за максимальної індукції $B_m = 1,0\text{ Т}$ і частоти перемагнічування 400 і 1000 Гц відповідно.



Рис. 10. Приклади застосування нанокристалічних магнітопроводів зі сплаву ММ-11Н: *а* — для силових трансформаторів імпульсних високовольтних (до 60 кВ) надпотужних (до 500 кВт) джерел живлення; *б* — для серійного виробництва силових блоків живлення електровозів; *в* — трансформатори для перетворювачів частоти установок ВЧ-плавки і гартування; *г* — магнітопроводи і трансформатори серійних високовольтних і високочастотних імпульсних джерел живлення та модуляторів потужністю від 0,001 до 30 МВт в імпульсі

використовуються, наприклад, в імпульсних джерелах живлення або системах телекомунікації. Оскільки основою нанокристалічних сплавів є недорога сировина — залізо і кремній, вони становлять конкуренцію не лише аморфним сплавам на основі Со, а й промисловим кристалічним сплавам та феритам. Тому постійно зростає їх застосування в магнітопроводах автоматичних вимикачів замикання на землю, скомпенсованих за струмом дроселів і високочастотних трансформаторів. Сьогодні світове виробництво нанокристалічних сплавів перевищує 1000 т/рік і продовжує збільшуватися. Головним недоліком нанокристалічних матеріалів є значне окрихчення при нанокристалізації [4], що потребує відпалу виключно кінцевої форми і обмежує їх застосування переважно тороїдальними стрічковими осердями. Однак цю проблему ми успішно вирішуємо, використовуючи спеціальні просочення і зовнішні полімерні покриття, специфічні для кожного конкретного застосування.

Наші нанокристалічні магнітопроводи, на відміну від традиційних феритових, здатні ефективно працювати в рекордно широкому температур-

ному інтервалі від -60 до $+150$ °С, дозволяють у 1,5—8 разів зменшити масу і габарити виробів, до 40% знизити масу міді в обмотках, забезпечити істотне зниження затрат на виробництво одиниці кінцевої продукції з одночасним підвищенням її технічного рівня і значну (в 1,3—2 рази) економію електроенергії при експлуатації виробів. Ці розробки вже частково впроваджено на підприємствах України та за її межами. Так, нанокристалічні магнітопроводи зі сплаву ММ-11Н використовують у силовій електроніці, зокрема для установок промислової електронно-променевої плавки титану (Міжнародна компанія «Антарес», Київ); силових імпульсних джерел живлення електровозів (Дніпропетровський науково-виробничий комплекс «Електровозобудування» і Особливе проектно-конструкторське бюро джерел живлення); установок для ВЧ-плавки і гартування (Науково-практичний центр Національної академії наук Білорусі з механізації сільського господарства, Мінськ) та ін. Промислову апробацію на вітчизняних підприємствах зараз проходять різноманітні трансформатори силових імпульсних джерел живлення і модуляторів, зокрема у високовольтних перетворювачах по-

тужністю до 30 МВт в імпульсі для живлення найновіших магнетронів, в узгоджувачих ширококутних трансформаторах радіо- і телефонних мереж, у складі високоефективних дроселів фільтрів (рис. 10).

НВП «Електроавтоматика» і «АТ-Система» провели апробацію виготовлених з використанням високостабільних нанокристалічних магнітопроводів силових трансформаторів (2,5 кВ·А) в імпульсних джерелах живлення спеціального призначення (ремонт і модернізація бронетехніки) (рис. 11). Ці трансформатори мають такі переваги, як низькі ватні втрати на частотах 10–20 кГц завдяки використанню нанокристалічного магнітопровода; втричі менші масогабарити, ніж у трансформаторів на фериті, високий рівень напруги пробоя та висока механічна стійкість після проживлення та сушіння; широкий температурний інтервал стабільності електромагнітних параметрів трансформатора (робоча температура може становити 120 °С).

На основі нанокристалічних магнітопроводів масою 0,7–2,4 кг створено вимірювальні трансформатори струму класів точності від 0,5S (комерційний облік) до 0,01 (еталонні) (Хмельницькобленерго, «Олтест») (рис. 12), які допускають значно менші похибки в широкому діапазоні вимірювання первинного струму. За своїми характеристиками вони не поступаються світовим аналогам. В Інституті прецизійних вимірювань Укрметрестандарту нанокристалічні магнітопроводи застосовують в еталонних вимірювачах імпедансу (мостах змінного струму).

Надзвичайно ефективним виявилось використання мініатюрних тороїдальних магнітопроводів (рис. 13) для ширококутних імпульсних ВЧ-трансформаторів і дроселів телекомунікаційних систем, у тому числі спеціального призначення. Високі показники основних магнітних характеристик таких нанокристалічних стрічкових магнітопроводів для роботи на високих частотах (50 кГц – 5 МГц) характеризуються також високою температурною стабільністю. Робоча температура традиційних магнітом'яких матеріалів зазвичай не перевищує 95 °С, тоді як нові нанокристалічні осердя з високою теплопровідністю зовнішньої ізо-

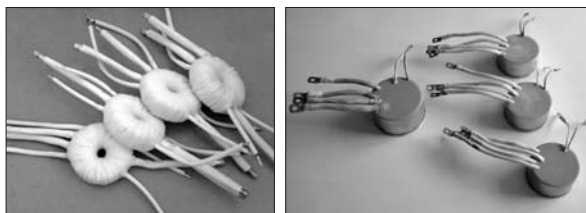


Рис. 11. Трансформатори для імпульсних (10–15 кГц) блоків живлення потужністю 2,5–3 кВт



Рис. 12. Еталонний трансформатор струму на основі нанокристалічних магнітопроводів



Рис. 13. Мініатюрні тороїдальні магнітопроводи (МТ) для трансформаторів і дроселів телекомунікаційних систем

ляції можуть працювати впродовж тривалого часу за температури до 180 °С.

Застосування розроблених трансформаторів і блоків трансформаторів у приймально-передавальних трактах систем передачі даних у стандарті ISDN дозволить знизити масогабаритні характеристики, зменшити енергоспоживання, підвищити заводо захищеність, до 2 порядків збільшити швидкість оброблення інформації, підвищити надійність функціонування

апаратури зв'язку перспективних комплексів. Такі трансформатори дають можливість передавати текстову, цифрову, звукову та інші види інформації по єдиному кабелю, у системах зв'язку вони дадуть змогу замінити імпортні аналоги, що знизить їх вартість і розширить ринки збуту для вітчизняного виробника. Споживачами мініатюрних високостабільних магнітопроводів МТ вже стали підприємства «Хартрон-Плант», «Радар», Київський завод автоматки ім. Г.І. Петровського. На сьогодні в Україні виробництво аморфних і нанокристалічних магнітопроводів здійснює лише єдине підприємство — ТОВ «МЕЛТА», якому вдалося самостійно створити дослідно-промислове виробництво потужністю всього близько 2 т/рік [6].

Ще одним показовим прикладом ефективного використання аморфних сплавів замість традиційних кристалічних прокатних є розроблення і впровадження аморфного сплаву ХКБРС. Цей сплав вдало поєднує характеристики міцності і пластичності з високим рівнем електроопору (>140 мкОм·см), що дає можливість його ефективного використання замість ніхромових, фехралевих та вуглеволоконних матеріалів у високоміцних корозійностійких стрічкових низькотемпературних нагрівачах промислового і побутового призначення. Впровадження розробки вже розпочато на малому наукововиробничому підприємстві ТОВ «МЕЛТА», яке випускає дослідні й дослідно-промислові партії аморфних стрічок та інфрачервоних нагрівачів на основі ліцензійного договору з Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Основними перевагами нових «аморфних» інфрачервоних нагрівачів є менші енергетичні затрати при еквівалентній тепловіддачі та поліпшені механічні і корозійні характеристики.

В актовому залі Інституту металофізики встановлено автоматизовану систему локального обігріву, яка забезпечує економію споживання електроенергії порівняно з електрокалориферами принаймні вдвічі. Споживачами аморфного сплаву ХКБРС нині вже є також підприємства ПАТ «Індуктор» (Івано-Франківськ) та НВК «Сапро» (Дніпропетровськ).

Перспективними галузями використання розробки є як промислове, так і побутове основне та додаткове опалення, промислове сушильне обладнання, металургійна і деревообробна промисловість, сільське господарство.

Висновки

Отже, реалізація розроблених нами нанотехнологій полягає в отриманні вихідних прецизійних сплавів та аморфних стрічок, створенні технологій та виготовленні готових магнітопроводів, індуктивних компонентів, силового електротехнічного і електронного обладнання, вимірювальних приладів. Найбільшого ефекту від впровадження запропонованих інноваційних нанотехнологій слід очікувати передусім в енергетиці, оскільки вони відкривають шлях до істотної, в масштабах країни, економії електроенергії та, відповідно, до зменшення енергетичної залежності нашої держави.

Ми сподіваємося, що наведені приклади використання результатів наукових розробок Інституту металофізики на рівні промислового виробництва привернуть увагу керівників провідних підприємств до наявності реальних можливостей виведення промисловості України на якісно новий щабель за допомогою готових до впровадження інноваційних технологій, які вже сьогодні пропонують установи НАН України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов. — Европейский ин-т меди. Проект № STR-1678-98-BE // Энергосбережение. — 2003. — № 6. — С. 66—71.
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. — Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071.
3. JFE 21 An introduction to iron and steel processing. — http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_1/1d_2.html.
4. Маслов В.В., Ткач В.И., Носенко В.К. и др. Термически обусловленное охрупчивание аморфных сплавов Fe-Si-B-Cu-Nb // Физика и техника высоких давлений. — 2010. — Т. 20, № 1. — С. 62—70.

5. *Davies H., Gibbs M.* Amorphous Alloys // Handbook of Magnetism and Advanced Materials. — V. 4. — London: John Wiley & Sons, 2007. — 1801 p.
6. *Шпак А.П., Маслов В.В., Носенко В.К.* Ресурсозберігаючі технології виробництва нанокристалічних прецизійних магнітних матеріалів як складова інноваційного розвитку енергетичної та електротехнічної галузей промисловості України // Наука та інновації. — 2005. — Т. 1, № 3. — С. 92—111.
7. *Маслов В.В., Ильицкий А.Г., Носенко В.К. и др.* О структуре расплава, ее наследовании при аморфизации и влиянии на магнитные свойства аморфного сплава $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ // Физика и техника высоких давлений. — 2005. — Т. 15, № 2. — С. 105—115.
8. *Mogilny G.S., Shanina B.D., Maslov V.V. et al.* Structure and magnetic anisotropy of rapidly quenched FeSiB ribbons // J. Non-Cryst. Sol. — 2011. — V. 357. — P. 3237—3244.
9. *Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K.* New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // J. Appl. Phys. — 1988. — V. 64. — P. 6044—6046.
10. *Маслов В.В., Носенко В.К., Тараненко Л.Е., Бровко А.П.* Нанокристаллизация в сплавах типа Finemet // Физика металлов и металловедение. — 2001. — Т. 91, № 5. — С. 47—55.
11. *Herzer G.* Nanocrystalline soft magnet materials // J. Magn. Magn. Mat. — 1996. — V. 157, N 8. — P. 133—136.
12. *Herzer G.* Grain Structure and Magnetism of Nanocrystalline Ferromagnets // IEEE Trans. Magn. — 1989. — V. 25. — P. 3327—3329.
13. *Herzer G.* The random anisotropy model: a critical review and update // Properties and applications of nanocrystalline alloys from amorphous precursors. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005. — P. 15—34.
14. *Herzer G.* Anisotropies in soft magnetic nanocrystalline alloys // J. Magn. Magn. Mat. — 2005. — V. 294. — P. 99—106.
15. *Fujimori H.* Magnetic Anisotropy // Amorphous Metallic Alloys. — London: Butterworth, 1983. — P. 300—316.
16. *Makino A.* Soft magnetic FeSiBPCu heteroamorphous alloys with high Fe content // J. Appl. Phys. — 2009. — V. 105. — P. 07A308.
17. *Ohta M., Yoshizawa Y.* High B_s nanocrystalline $\text{Fe}_{84-x-y}\text{Cu}_x\text{Nb}_y\text{Si}_4\text{B}_{12}$ alloys ($x = 0.0-1.4$, $y = 0.0-2.5$) // J. Magn. Magn. Mat. — 2009. — V. 321. — P. 2220—2224.

В.К. Носенко

Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова Национальной академии наук Украины
бул. Академика Вернадского, 36, Киев, 03680, Украина

АМОРФНЫЕ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены результаты разработки технологии получения магнитомягких аморфных и нанокристаллических ленточных сплавов на основе железа методом сверхбыстрого охлаждения расплава, а также изготовления из них магнитопроводов с высокой термической стабильностью магнитных свойств. Приведены примеры внедрения разработанных нанокристаллических магнитопроводов, трансформаторов и дросселей на их основе в таких областях промышленности, как энергетика, силовая электроника, приборостроение. Проанализированы перспективы их широкомасштабного использования.

Ключевые слова: аморфные и нанокристаллические сплавы, технология сверхбыстрого охлаждения расплава, приборостроение, энергосбережение.

V.K. Nosenko

Kurdyumov Institute for Metal Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
36 Vernadsky Prospect, Kyiv, 03680, Ukraine

AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE ALLOYS FOR INSTRUMENT MAKING AND ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGIES

The results reveal the development of technology for production of soft magnetic amorphous and nanocrystalline iron-based ribbon alloys by rapid melt quenching and manufacture of magnetic cores from them with high thermal stability of magnetic properties. The examples of implementation of the developed nanocrystalline magnetic cores, transformers and chokes on their base in such home industry fields as energy, power electronics, instrument making are presented and the prospects of their widespread application are reviewed.

Keywords: amorphous and nanocrystalline alloys, rapid melt quenching technology, instrument making, energy saving.