

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК СКЛАДОВА ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

А. П. Шпак, В. В. Маслов, В. К. Носенко

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ

Надійшла до редакції 25.04.05

Резюме: Описані результати виконання Інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАНУ інноваційного проекту по розробці технології одержання магнітом'яких нанокристалічних стрічкових сплавів на основі заліза шляхом надшвидкого охолодження розплаву, а також виготовлення з них магнітопроводів з високою температурно-часовою стабільністю магнітних властивостей. Наведені приклади впровадження розроблених нанокристалічних магнітопроводів в таких галузях промисловості країни, як енергетика, електротехніка, приладобудування та розглянуті перспективи їх широкомасштабного застосування.

Ключові слова: інновація, нанокристалічні сплави, магнітопроводи, магнітні властивості, ресурсозберігаюча технологія, енергетика, електротехніка, приладобудування.

А. П. Шпак, В. В. Маслов, В. К. Носенко. РЕСУРСОСОХРАНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СОСТАВНАЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ УКРАИНЫ.

Резюме: Описаны результаты выполнения Институтом металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ инновационного проекта по разработке технологии получения магнитомягких нанокристаллических ленточных сплавов на основе железа путем сверхбыстрого охлаждения расплава, а также изготовления из них магнитопроводов с высокой температурно-временной стабильностью магнитных свойств. Приведены примеры внедрения разработанных нанокристаллических магнитопроводов в таких отраслях промышленности страны, как энергетика, электротехника, приборостроение и рассмотрены перспективы их широкомасштабного применения.

Ключевые слова: инновация, нанокристаллические сплавы, магнитопроводы, магнитные свойства, ресурсосохраняющая технология, энергетика, электротехника, приборостроение.

A. P. Shpak, V. V. Maslov, V. K. Nosenko. RESOURCE-SAVING PRODUCTION TECHNOLOGIES OF NANOCRYSTALLINE PRECISION MAGNETIC MATERIALS AS COMPONENT OF INNOVATION DEVELOPMENT OF POWER AND ELECTRIC ENGINEERING BRANCHES OF INDUSTRY OF UKRAINE.

Abstract: Results of execution in the G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the innovation project on development and processing of the soft magnetic nanocrystalline ribbon iron based alloys by rapid melt quenching as well as of the technology for making the magnetic cores with high time and temperature

stability of the magnetic properties are considered. The examples are listed and the prospects are described for the broad application of the developed nanocrystalline magnetic cores in such branches of industry of Ukraine as power engineering, electrical engineering, device-making.

Keywords: innovation, nanocrystalline alloys, magnetic cores, magnetic properties, resource-saving technology, power engineering, electrical engineering, device-making.

1. ПРО ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Галузь електроенергетики України – це високорозвинений комплекс по виробництву, розподілу та збуту електричної енергії. Сумарна встановлена потужність електростанцій України складає близько 60 000 000 кВт. Основна частка (близько 60 %) в структурі виробничих потужностей припадає на теплові електростанції (ТЕС) і близько 30 % – на гідроелектростанції (ГЕС). В останні 15 років основне зростання генеруючих потужностей в енергосистемі України забезпечувалось за рахунок атомної енергетики, що призвело до згортання розвитку теплоенергетики та власної паливної бази. Були істотно скорочені обсяги фінансування та ресурсного забезпечення реконструкції електростанцій. Довготривала експлуатація ТЕС і ГЕС без достатнього поповнення основних виробничих фондів призвели до значного зносу основного та допоміжного обладнання.

Передача та розподіл виробленої електроенергії здійснюється через розгалужену мережу ліній електропередач усіх рівнів напруги. Висока централізація виробництва електроенергії на великих електростанціях визначила розвиток в Україні потужних міжсистемних зв'язків та мереж з напругою від 330 до 750 кВ, довжина яких складає близько 20 000 км. На сьогодні в Україні експлуатується більше одного 1 000 000 км ліній електропередач всіх класів напруги (80 % з них складають розподільчі з напругою від 0,4 до 10 кВ) та близько 195 000 мегаватних трансформаторних потужностей (підстанцій). Значна части-

на мереж та трансформаторів фізично та морально застаріла. Подальший розвиток електромереж передбачає створення нових конструкцій, більш надійних та екологічно безпечних, та забезпечення умов проведення ремонтних робіт під напругою. Модернізації та оновлення потребують електрообладнання, системи автоматики і безпеки (зокрема, обладнання для релейного захисту у високовольтних (ВВ) мережах) та ведення обліку електроспоживання. Для забезпечення національної енергетичної безпеки розробка нових технологій, виготовлення сучасних матеріалів та електротехнічного обладнання повинні проводитися в Україні.

Енергоємність валового національного продукту України на 30–40 % вища, ніж в промислово розвинених країнах; а енергоємність галузей, пов'язаних з виробництвом матеріалів, порівняно з цими ж країнами вища в 2–3 рази. Значною мірою це пов'язано з великим обсягом енергозатратних виробництв у важкій промисловості та низьким ККД споживання енергії в технологічних процесах.

Значних зусиль потребує налагодження системи моніторингу та обліку споживання електроенергії, особливо в найбільш затратних галузях промисловості та побутовій сфері. Технічна досконалість систем комплексної автоматизації електроенергетичних об'єктів – розподільчих пристроїв електростанцій, високовольтних підстанцій енергосистем і споживачів електроенергії є одним із вирішальних чинників ефективного та надійного функціонування електроенергетичної галузі України [1].

В останні роки комерційний облік електроенергії з використанням вимірювальних трансформаторів струму (ТС) в розподільчих мережах енергосистем напругою 0,4 кВ та у споживачів проводився на основі використання однофазних двообмоточних ТС класу 0,5 та індукційних триелементних електрорічильників класу 2,0. В результаті використання застарілих матеріалів в осердях ТС та старої конструкції індукційних лічильників в процесі експлуатації їх похибка зростає до 10–15 % (від'ємна похибка індукційного лічильника збільшується на 1–1,5 % щорічно). Такий енергооблік за умов спаду та значних коливань навантаження споживачів вирізняється великою похибкою, що призводить до недообліку електроенергії та росту комерційних втрат. За різними оцінками, їх частка становить 25–30 % усіх комерційних втрат. Виходом із цієї ситуації є відмова від виробництва всіх без винятку індукційних лічильників другого класу, заміна їх на електронні, а також заміна ТС класу 1,0 та 0,5 на вимірювальні трансформатори класу 0,5S; 0,2 або 0,2S, які використовуються в західних країнах і забезпечують значно менші похибки в широкому діапазоні вимірювання первинного струму.

У сучасних електронних лічильників повна споживана потужність мережею струму не перевищує 0,1–0,5 Вт, що в 4–10 разів менше, ніж у індукційних [2]. Тому заміна індукційних лічильників електронними у всіх випадках покращує режим роботи вимірювальних ТС. З переходом до використання в комерційному обліку електронних (мікропроцесорних) лічильників знижуються вимоги до номінального навантаження ТС: його можна обмежити величиною 5 Вт (у ТС для обліку з індукційними лічильниками воно складає 10–20 Вт та більше), що в кінцевому результаті зменшує технічні втрати електроенергії на приладний облік. Нескладні розрахунки [2] свідчать, що при встановленні в

енергосистемі 100 000 сучасних ТС економія потужності на кожному лише в 10 Вт дасть сумарну економію електроенергії в 1 МВт, а річна економія електроенергії складе 8760 МВт·год і в грошовому еквіваленті становитиме \$350 000 при реальній її вартості \$0,04 за 1 кВт·год.

З огляду на стан проблеми Закон України про енергозбереження передбачає, зокрема, якнайшвидше вирішення проблем створення та впровадження нових енергозберігаючих технологій та виготовлення сучасних новітніх матеріалів електротехнічного та електронного призначення для потреб вітчизняної енергетики та приладобудування відповідного профілю.

Безперечно, вирішення всіх проблем перебудови галузі електроенергетики України можливе лише за умови використання найсучасніших наукових розробок інноваційного характеру, до яких можна віднести і високопродуктивну технологію отримання матеріалів з унікальними магнітними, механічними та хімічними властивостями шляхом надшвидкого охолодження розплаву (НШОР). Впровадження цієї технології в промисловість держава фінансово підтримала в минулому році.

2. НШОР – ЯКІСНО НОВА ТЕХНОЛОГІЯ У СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

2.1. Технологія НШОР як засіб отримання металевих сплавів з особливими структурними станами та фізико-хімічними властивостями

Методи гартування з рідкого стану (надшвидкого охолодження розплавів із швидкостями 10^5 – 10^7 К/с) стали найбільш перспективними методами отримання матеріалів з особливими властивостями. Технології, що

базуються на цих методах, дають змогу в екстремально нерівноважних умовах твердіння реалізувати особливі (аж до аморфного) структурні і фазові стани, які забезпечують таким швидкозагартованим сплавам унікальне поєднання високих характеристик міцності, а також електричних, магнітних, корозійних та інших властивостей, що неможливо при використанні традиційних металургійних технологій.

Пріоритет у цій новій галузі, яка активно розвивається впродовж двох останніх десятиріч і напрощуд вдало об'єднує фундаментальні дослідження в області фізики конденсованого стану з ефективними матеріалознавчими і технологічними розробками, належить українським і американським вченим. Тут не можна не згадати професора І. С. Мірошніченка, який у 50-х рр. минулого століття одним з перших у світі розпочав діяльність по створенню методик надшвидкого охолодження розплавів (НШОР) та отриманню з наступним всебічним систематичним дослідженням швидкозагартованих матеріалів, випередивши на цілий рік публікацією в 1959 р. (ж-л "Заводська лабораторія") публікацію американського професора П. Дувеза ("*J. Appl. Phys.*" [3, 4]). Завдяки цим піонерським роботам швидкозагартовані аморфні та мікрокристалічні сплави (трохи пізніше до них приєдналися і нанокристалічні) виділились в новий самостійний клас матеріалів, а монографія І. С. Мірошніченка "Гартування з рідкого стану" [5] і тепер не втратила своєї значимості для вчених і фахівців в цій області досліджень і розробок.

У випадку кристалічних сплавів використання методів НШОР призводить до істотного зниження хімічної сегрегації; зменшення розмірів зерен у продуктах гартування до величини менше 1 мкм вже у вихідному литому стані (одержати такий розмір і сьогодні є досить серйозною проблемою для існуючих технологій литва та подальших операцій пе-

реробки); істотного збільшення меж взаємної розчинності компонентів сплавів; появи нових метастабільних фаз; значних морфологічних змін у структурі тощо. Перераховані ефекти в сукупності надають інструментальним і конструкційним сталям різного призначення, жароміцним нікелевим суперсплавам, припоєм, висококремністим електротехнічним сталям і сплавам (часто крихким при отриманні їх за традиційними технологіями), а також іншим мікрокристалічним матеріалам властивостей, продиктованих вимогами сучасної техніки і технології [6].

Щодо аморфних металевих сплавів (АМС), то їх утворення є результатом екстремально нерівноважного твердіння розплаву з формуванням, незалежно від концентрації компонентів, однофазної системи з відсутністю трансляційної симетрії в розташуванні атомів і з високим ступенем структурної однорідності. В АМС відсутні такі характерні для кристалічних сплавів дефекти, як вакансії і дислокації, межі зерен, двійники і дефекти упаковки, а також різного роду сегрегації, ліквіація і інші джерела фазової та структурної неоднорідності. Саме це надає аморфним сплавам унікального поєднання фізико-хімічних та механічних властивостей.

У лабораторній та виробничій практиці використовуються найрізноманітніші методи НШОР, які дозволяють одержувати швидкозагартовані сплави у вигляді стрічок, фольги, тонкого листа, проволочи, мікродропу, гранул, порошоків, покриттів і ін. (досить докладний огляд цих методів зроблений нами в [7]). Найпоширенішим серед них завдяки високій продуктивності є так званий метод спінінгування розплаву [8, 9], коли розплавлений у тиглі метал під надлишковим тиском ежектується через сопло певної форми на зовнішню поверхню диска-охолоджувача, що обертається з лінійною швидкістю до 40 м/с. При цьому утворюється стрічка, як це показано на рис. 1. Товщина її для

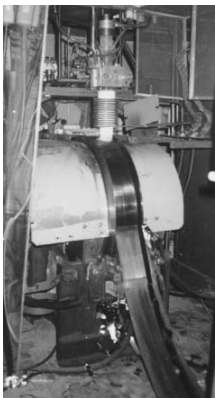
більшості аморфних сплавів не перевищує 50–60 мкм, а ширина може бути більшою 1 м при належному технічному рівні гартувального устаткування.

2.2. Стан досліджень та розробок у галузі створення нових матеріалів та їх отримання з використанням технології НШОР

Систематичні дослідження та розробки, пов'язані із використанням швидкісної заправки з рідкого стану для одержання аморфних, нано- та мікрокристалічних сплавів в Інституті металофізики НАН України було розпочато за ініціативи академіка В. В. Немошкаленка більш як 20 років тому. Створена за цей час експериментально-технологічна база по одержанню швидкозагартованих сплавів методом спінінгування розплаву сьогодні не має аналогів у країні. Проведені в Інституті розробки та всебічні дослідження дали можливість встановити взаємозв'язок між умовами одержання швидкозагартованих стрічок сплавів різного типу та їх якістю (однорідність стрічок по товщині, стан поверхонь та бокових кромок, шорсткість тощо), яка зумовлює особливості структурного стану стрічок та безпосередньо пов'язана з

рівнем і відтворюваністю їх фізико-хімічних властивостей. Були виявлені нові закономірності та механізми утворення і росту кристалів у аморфних сплавах, завдяки чому було знайдено нові шляхи впливу керованого легування на рівень їх термічної стійкості та фізико-хімічних властивостей. Віднайдені при цьому технічні та технологічні рішення захищені авторськими свідоцтвами (на час СРСР) та патентами України.

В останні роки в Інституті активного розвитку набув якісно новий напрямок в матеріалознавстві сучасних прецизійних матеріалів – магнітом'яких нанокристалічних сплавів на основі заліза (до 80 %) типу Finemet (базова система FeSiBCuNb, [10]). Унікальні магнітні властивості цих сплавів зумовлені співвідношенням ($\sim 1 : 3$) аморфної та нанокристалічної фаз α -Fe(Si), що формується при частковій контрольованій кристалізації вихідних аморфних стрічок зі сплавів певного хімічного складу. Зазначимо, що наразі нанокристалічні сплави з розмірами зерен 10–20 нм можна одержувати і безпосередньо з розплаву, а це дає підстави вважати технологію НШОР основною складовою групи нанотехнологій в металургійній галузі, зокрема мікрометалургії. В порівнянні з кристалічними магнітом'якими преци-



а



б



в

Рис. 1. Загальний вигляд установки для гартування розплаву (*а*), процес одержання (*б*) та вигляд (*в*) аморфної стрічки

зійними сплавами, які використовуються в електро- та радіотехніці, електроніці, приладобудуванні (а це провідні для України галузі сучасної техніки та технології) і (за винятком деяких марок феритів) традиційно імпортуються в Україну, нанокристалічні сплави типу Finemet вдало поєднують більш високий рівень властивостей з меншою вартістю.

Готовність Інституту до подальшої активної участі в розробці цього якісно нового і важливого для країни напрямку в сучасному матеріалознавстві з метою створення нових конкурентноздатних нанокристалічних сплавів та до пошуку додаткових резервів підвищення їх властивостей значною мірою зумовили такі фактори, як наявність кваліфікованих кадрів у галузі досліджень та розробки аморфних сплавів, а також необхідної експериментально-технологічної бази з НШОР. Її складовими є плавильне устаткування різної потужності для приготування вихідних сплавів, термічне обладнання для проведення термообробок аморфних стрічок у широкому температурному діапазоні, а також необхідне гартувальне устаткування. На рис. 2 показана автоматизована гартувальна установка закритого типу з комп'ютерною реєстрацією основних параметрів гартування (швидкість обертання диска, зміна тиску ежектуювання в процесі виливу розплаву та зміна його температури тощо) та наявністю зворотного зв'язку, що дає можливість підтримувати ці параметри в ході швидкоплинного процесу на заданому програмною рівні і тим самим одержувати зразки для досліджень в ретельно контрольованих умовах. Важливо, що це обладнання продуктивністю до 0,5 кг/цикл (разовий вилив) дає можливість одержувати в захисній атмосфері (гелій, аргон, вуглекислий газ) якісні аморфні та нанокристалічні стрічки сплавів, що містять активні компоненти. Крім того, гартувальне обладнання з продуктивністю до 3 кг/цикл (процес здійснюється на повітрі, рис. 1, а) дає змогу виготовляти не тільки зразки для досліджень, але й дослідні та дослідно-промислові партії аморфних і нанокристалічних стрічок.



Рис. 2. Виконавчий директор УНТЦ Ів Кармель оглядає автоматизовану установку НШОР для гартування розплаву в захисній атмосфері (2004 р.)

На протязі кількох років в Інституті проводились фундаментальні дослідження взаємозв'язку рівня магнітних властивостей з умовами одержання та особливостями атомної будови вихідних аморфних стрічок сплавів типу Finemet і наноструктурними станами, які формуються в них залежно від хімічного складу в різних умовах термообробки. За результатами проведених досліджень та розробок в Інституті було створено більше 20-и нових економнолегованих високотропних нанокристалічних сплавів на основі заліза, склад яких був оптимізований за співвідношенням як основних компонентів, так і легуючих домішок. Наявність домішок дає можливість здійснювати контрольований вплив на формування потрібних нанокристалічних станів та кількість нанокристалічної фази в аморфній матриці.

Магнітні властивості (індукція насичення, початкова та максимальна магнітна проникність, коерцитивна сила, загальні втрати в осерді в інтервалі частот до 500 кГц) тороїдальних магнітопроводів різної геометрії, виготовлених з цих сплавів, після оптимальних термообробок є більш високими порівняно з відповідними показниками для відомих сплавів цього класу, а також для низки феритів та пермалоїв промислових марок. Геометрія тороїдальних магнітопроводів визначалася існуючими стандартами: внутрішній діаметр/зовнішній діаметр – висота, мм. Добре зарекомендували себе нанокристалічні сплави $(\text{FeSiB})_{96,6}(\text{CuNb})_{3,4}$ – (ММ–1Н) та $(\text{FeSiB})_{96}(\text{CuNb})_4$ – (ММ–11Н).

З урахуванням перспективи промислового виробництва розроблених нанокристалічних сплавів принципово важливою є розробка технології їх приготування не тільки з чистих компонентів, але й з вітчизняної нерафінованої сировини (феробор, феронікель, кремній-сирець, технічне залізо). Проведене коригування оптимальних режимів термообробки сплавів з технічно чистих компонентів забезпечило їм рівень магнітних властивостей не гірший в порівнянні з властивостями сплавів з чистих компонентів однакового хімічного складу. Крім того, значна увага приділялася відпрацюванню технології нанесення на нанокристалічні стрічки електроізоляційних покриттів та виготовлення з них монолітних стрічкових магнітопроводів різних габаритів та геометрій у відповідності з номенклатурою виробів, які виготовляються підприємствами України.

Значною мірою вирішенню конструкторських та технологічних проблем сприяє діяльність малого підприємства ТОВ "МЕЛ-ТА", створеного при Інституті за ініціативи авторів статті, а також академіків В. В. Немошкаленка та В. Г. Барьяхтара, що в різні часи були директорами ІМФ НАНУ і всіляко підтримували розвиток досліджень

аморфних та нанокристалічних сплавів. Безперечно, створення МП було зумовлене тими обставинами, що склалися в країні на початку 90-х років минулого століття і потребували нових форм діяльності науковців для практичної реалізації наукових розробок. Відійшли в небуття такі на свій час цікаві і, безперечно, перспективні форми інтегрування науки у виробництво, як міжгалузеві науково-технічні комплекси (МНТК) на базі таких потужних інститутів Академії, як ІЕЗ ім. Є. О. Патона, ІПМ ім. І. М. Францевича та ін. На жаль, майже повністю була зруйнована і система ДКТБ з дослідними виробництвами, які для багатьох академічних інститутів також були містком між наукою та виробництвом. Але попри розчарування та матеріальні труднощі, які спричинили значний відтік науковців та спеціалістів з установ Академії, залишилися в Інституті справжні ентузіасти, які продовжували провадити наукові дослідження.

Створення такого підприємства на базі хоч і не дуже потужної на той час експериментально-технологічної бази, а також отримані уже позитивні результати створення нових аморфних сплавів та розробки оптимальних технологічних режимів їх одержання давало надію за умови наявності промислового підприємства-замовника розраховувати на матеріальну (хай і невелику) підтримку наукових та інженерно-технічних працівників, що сприяло, без сумніву, збереженню кадрового потенціалу Інституту. Крім того, такі замовлення давали кошти для придбання сировини на виготовлення сплавів та, що найважливіше, на проведення подальших науково-технічних розробок при витратах, значно менших порівняно з установами державної форми власності. Важливим при визначенні основної спрямованості діяльності МП було те, що як на Заході, так і в Росії було вже підтверджено перспективність розробок у галузі матеріалознавства швидкозагартованих

сплавів. Так, у 1990 р. міністрами відомої "дев'ятки" був завізований проект союзної програми "Суперсплав-технологія" по виготовленню та широкомасштабному впровадженню швидкозагартованих аморфних і мікрокристалічних матеріалів на підприємствах міністерств оборонного комплексу у зв'язку з їх конверсією та переорієнтацією на виготовлення високоякісних товарів народного вжитку. Згідно з цим проектом, який внаслідок відомих причин так і не був реалізований, виробництво аморфних сплавів передбачалося вивести в 2005 р. на рівень 60 000 т/рік, у т. ч. аморфних магнітом'яких сплавів для магнітопроводів різноманітного призначення на рівень 20 000 т/рік. Зауважимо, що обсяг виробництва таких матеріалів у 1991 р. лише в США становив більше 100 000 т/рік, в Росії – близько 15 т/рік (в минулому році він становив близько 55 т.) Що ж стосується України, то в ній і на сьогодні відсутнє виробництво навіть простої ізотропної та анізотропної трансформаторних сталей. Для виготовлення різних типів трансформаторів, дроселів та інших елементів силової електроніки така сталь імпортується із Росії. Звідти імпортуються і прецизійні магнітом'які сплави – пермалої та супермалої, що використовуються в Україні для виготовлення електромагнітних екранів, ВЧ-дроселів, магнітних підсилювачів тощо.

За останні 12 років МП ТОВ "МЕЛТА" у відповідності з визначеними основними напрямками діяльності Інституту виконало значний об'єм робіт по створенню нового та модернізації існуючого технологічного обладнання для надшвидкого гартування розплаву, одержанню дослідних та дослідно-промислових партій різних типів прецизійних аморфних та нанокристалічних сплавів, розробці технологій виготовлення з них монолітних стрічкових магнітопроводів різних типів і габаритів з урахуванням вимог до їх масового виробництва, а також різних типів

трансформаторів, дроселів тощо. Зокрема була проведена апробація цих виробів на підприємствах України, що сприяло успішній промисловій реалізації (комерціалізації) розробок ІМФ НАНУ. Так, в останні роки дослідні партії магнітопроводів були з успіхом використані в складі вимірювальних трансформаторів струму серійних електронних одно- та трифазних лічильників електроенергії типу СЕО-1 та СЕТ-11ПА на приладному заводі "Електрон" та Південному радіозаводі (м. Жовті Води), у блоках живлення промислового обладнання для електрофорезу потужністю до 15 кВт на АТ "Форез" (м. Київ), у складі високовольтних (30–60 кВ) високочастотних імпульсних трансформаторів вітчизняних рентгенівських (флюорографічних) апаратів у ТОВ "Меді-рент" (м. Київ) тощо. Нові економічні магнітом'які аморфні та нанокристалічні сплави дають можливість знизити масу перетворюючих пристроїв в 1,5–4 рази з одночасним зниженням кількості міді в їх обмотках до 40 % порівняно з феритами, пермалою та високоякісною трансформаторною сталлю.

Таким чином, до виконання інноваційного проекту в 2004 р., основною метою якого було визначення та відпрацювання в умовах промислового виробництва технологічних параметрів одержання високоякісних стрічок з розроблених нанокристалічних сплавів, а також виготовлення з них тороїдальних стрічкових магнітопроводів з зовнішнім електроізоляційним покриттям, які б мали високу стабільність магнітних властивостей в діапазоні температур використання –60 – +130 °С, Інститут приступив цілком підготовленим, спираючись на наявні матеріалознавчі та технологічні нароби, а також накопичений уже досвід МП ТОВ "МЕЛТА" по впровадженню одержаних результатів у виробництво. У виконанні проекту взяли участь Інститут фізики та Інститут електродинаміки НАНУ, Національний університет

"Львівська політехніка", а також підприємства приватної та колективної форми власності, зокрема, МП ТОВ "МЕЛТА". Саме на нього було покладено завдання впровадження результатів проекту у виробництво на підприємствах України.

3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОСТАБІЛЬНИХ НАНО-КРИСТАЛІЧНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ ЯК СВОЄЧАСНА ІННОВАЦІЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ КРАЇНИ

3.1. Характеристика основних результатів виконання інноваційного проекту

3.1.1. Модернізація гартувального обладнання

До базових етапів проекту слід віднести модернізацію технологічного устаткування для виробництва нанокристалічних стрічкових сплавів. Кошторисом проекту було передбачене придбання сучасного високошвидкісного пірометра фірми "IMPAC" Infratherm ISQ5 (\$5 000) і налагодження цифрової комп'ютерної системи реєстрації вимірюваного сигналу (температури), що й було реалізовано. Завдяки виготовленій системі позиціонування пірометра відносно поверхні гартувального диска стало можливим вимірювання температури розплаву безпосередньо в процесі отримання аморфної стрічки, а це, в свою чергу, дало можливість враховувати та своєчасно компенсувати можливі зміни гідродинамічних характеристик розплаву при зниженні температури на протязі процесу розливки. Крім того, було виготовлено систему позиціонування аналогічного пірометра (модель IP140) для відслідковування для відслідковування такого важливого технологічного параметра, як

зміна температури поверхні гартувального диска в процесі виливу.

Технічний рівень гартувальної установки якісно підвищився за рахунок її комплектації оригінальною прецизійною електронно-оптичною системою візуалізації та безконтактного вимірювання відстані між об'єктами, створеною спеціалістами НУ "Львівська політехніка". Зокрема ця система дала змогу вимірювати величину тонкого зазору між зрізом ливарного сопла і поверхнею гартувального диска з точністю не менше ± 10 мкм. Це стало можливим завдяки тому, що у відхиляючій системі електронно-променевої трубки, яка входить до складу скануючої оптичної системи, було використано осердя із розробленого в Інституті аморфного сплаву. Підтримання величини зазору постійною забезпечувала електромеханічна система з використанням сучасних високоточних двигунів (фірми "Ленце") з приводами керування змінного струму.

Здійснені заходи дозволили суттєво розширити технологічні можливості одержання високоякісних аморфних стрічок в контрольованих умовах. Останню розробку можна розглядати як початковий етап створення в стислі строки низки експортноспроможних систем безконтактного контролю швидкоплинних автоматизованих процесів, зокрема в галузі нанотехнологій.

3.1.2. Виготовлення тороїдальних стрічкових магнітопроводів

У рамках проекту було виготовлене та придбане обладнання для намотування стрічкових магнітопроводів з нанокристалічних сплавів. В процесі виконання цього етапу значна увага приділялася особливостям технології виготовлення (намотування) магнітопроводів з високими показниками температурної стабільності магнітних характеристик на високих (10 кГц – 3 МГц) частотах в

умовах масового виробництва. Зокрема, придбаний автоматизований станок для намотування магнітопроводів "Модуль-30" виробництва ЗАТ "Мстатор" (Росія) (рис. 3) після проведеної модернізації дав можливість здійснювати намотування стрічкових магнітопроводів типових розмірів в діапазоні $3 \times 20 \times 6 \div 32 / 1 \div 10$ (рис. 3.), в т. ч. мінімальних розмірів ($3 \times 6 / 3$; $3,5 \times 8,5 / 1,2$; $6 \times 9,5 / 3$) для телекомунікаційних систем.

Розроблена технологія намотування та термообробки тороїдальних (кільцевих) осердь орієнтована на використання аморфних та нанокристалічних стрічок із сплавів з високими показниками температурної стабільності магнітних характеристик на високих (10 кГц – 3 МГц) частотах.

3.1.3. Технологія нанесення електроізоляційного покриття

Для успішного використання аморфних та нанокристалічних магнітом'яких матеріалів у магнітопроводах дроселів та трансформаторів на частотах 20–200 кГц велике значення має забезпечення надійної міжвиткової ізоляції. Якісна ізоляція повинна мати високу теплопровідність для полегшення відводу тепла, бути достатньо тонкою, щоб не погіршити коефіцієнт заповнення і в той же час без пробою витримувати значний електричний потенціал.

Забезпечення мінімальних витрат електроенергії на перемагнічування, особливо для невеликих нанокристалічних осердь, що призначені для роботи на частотах 100–200 кГц, стало можливим при проживленні їх лаком "chromofix" (ТУ6-15-67.47-77). Після полімеризації замонолічене (зафіксоване) осердя має надійну міжвиткову ізоляцію та одночасно є захищеним від вологи. Останнє особливо важливо при використанні сплавів на основі заліза. Розроблений спосіб замонолічування магнітопроводу дозволяє використовувати



Рис. 3. Автоматизований станок для намотування магнітопроводів "Модуль-30"

його без додаткової ізоляції (каркасу).

Для створення міжвиткової ізоляції у відпалених осердях із нанокристалічних сплавів випробовувались також кремнійорганічні (КО) лаки вітчизняного виробництва. Найкращим з них є лак КО 815, який забезпечував мінімальну втрату (особливо у випадку сплаву ММ-11Н) магнітної проникності після полімеризації, а також її довготривалу та температурну стабільність.

Використання стрічкових магнітопроводів тороїдальної та, особливо, видовженої прямокутної форми у вимірювальних приладах та блоках живлення для авіакосмічної техніки також потребує їх фіксації (замонолічування). Перевантаження, що виникають при старті космічного апарату та на початковій стадії польоту, вимагають підвищеної міцності стрічкових осердь.

У процесі виконання роботи остаточну монолітизацію відпалених осердь із FM-сплавів здійснювали у розбірних циліндричних та прямокутних формах. В якості компа-

унд для замонолічування відпалених осердь використовували полімерну композицію КФ-1, розроблену спеціалістами ВО "Карат" (м. Львів), або більш міцний та термостійкий матеріал, розроблений ТОВ "МЕЛТА" (м. Київ). Відмінними рисами цих матеріалів у порівнянні з іншими випробуваними компаундами є високі показники теплопровідності, міцності та ізоляційної здатності. Розроблена технологія замонолічування дала можливість виготовлювати високоміцні стрічкові магнітопроводи необхідної геометрії (рис. 4), надійно захищені від вологи та електричних пробойів між осердям та обмоткою, що особливо важливо при їх використанні у високовольтних (ВВ) трансформаторах та дроселях.

Для забезпечення високого ступеня температурної та довготривалої стійкості нанокристалічних стрічкових магнітопроводів розроблено продуктивну технологію всебічного нанесення на них електроізоляційних полімерних високотемпературних покриттів з використанням порошкових термотвердіючих полімерів. Покриття з порошкових термотвердіючих полімерів – відносно новий напрямок у розвитку лакофарбової техніки. Фізико-механічні та інші властивості полі-

мерних покриттів значно вищі, ніж лакофарбових, а технологія їх нанесення набагато простіша. Але головними факторами, що наперед визначили перевагу цих покриттів для створення зовнішньої ізоляції магнітопроводів, є фактична відсутність у них розчинників та практична безвідходність технології нанесення покриття. Якщо при отриманні покриття за традиційною мокрою технологією (з використанням фарб, лаків чи епоксидних компаундів) газовиділення (випаровування розчинників) складає 30–70 %, то при використанні порошкових полімерів воно не перевищує 1 %. Це істотно зменшує усадку покриття при полімеризації та, відповідно, знижує рівень стискаючих напружень, що, як правило, погіршують магнітні характеристики нанокристалічних магнітопроводів.

Виготовлене та придбане за кошти проекту обладнання для нанесення всебічного полімерного високотемпературного покриття та його полімеризації дало змогу розробити продуктивну технологію почергового нанесення трибостатичним методом тонких шарів розроблених порошкових композицій із матеріалів на епоксидній, поліефірній та змішаній основах на відносно великі партії

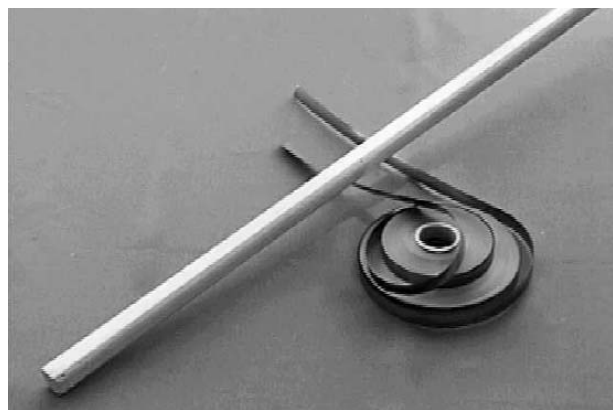


Рис. 4. Зразки монолітних тороїдальних стрічкових нанокристалічних осердь різного розміру, в т. ч. прямокутне стрічкове осердя 14×14/750

нанокристалічних осердь (в т. ч. мініатюрних для телекомунікаційних систем), розміщених на щільній неіржавіючій сітці (каркасі) з швидкою полімеризацією кожного шару. Процес нанесення шарів покриття на обидва боки осердь (перевертання осердь здійснюється після кожного етапу полімеризації) відбувається до досягнення необхідної товщини покриття на кожному з осердь. На рис. 5 показані дослідно-промислові партії тороїдальних магнітопроводів із всебічним полімерним покриттям. Створення високопродуктивної лінії дало можливість отримати дослідні та дослідно-промислові партії нанокристалічних магнітопроводів з міцним електроізоляційним покриттям.

3.1.4. Обладнання для досліджень магнітних властивостей магнітопроводів та їх температурної і часової стабільності

Згідно з технічним завданням проекту була розроблена та виготовлена за участі спеціалістів ПП "НовіТех" автоматизована установка для магнітних вимірювань, складовими якої є малоінерційна безградієнтна піч з регулятором температури до 400 °С для од-

ночасного дослідження магнітної проникності (фактору індуктивності) 2–4 магнітних осердь з ізоляційним полімерним покриттям або капсульованих у пластикові бокси. Запропонована система забезпечувала вимірювання та збереження даних про фактор індуктивності 1–4 осердь у процесі їх нагрівання, охолодження та витримки при встановленій та стабілізованій температурі на протязі до 2 000 годин. Для проведення низькотемпературних досліджень у Інституті фізики НАНУ був виготовлений кріостат з спеціалізованою вимірювальною системою, яка давала можливість вивчати магнітні властивості нанокристалічних магнітопроводів при температурах від кімнатної до температури рідкого азоту.

Експериментальні дані, одержані на створеному устаткуванні, дозволили скоригувати склад нанокристалічних сплавів та технологію термообробки виготовлених з них магнітних осердь. Це, в свою чергу, дало змогу забезпечити постійність магнітної проникності осердь при тих значеннях температури, коли проникність в осердях із традиційних кристалічних матеріалів, таких, як пермалої чи ферити, безповоротно деградує.



Рис. 5. Дослідно-промислові партії тороїдальних магнітопроводів із всебічним полімерним покриттям

3.1.5. Магнітні властивості нанокристалічних осердь та їх термочасова стабільність

Атестація часової стабільності магнітної проникності нанокристалічних тороїдальних стрічкових осердь (магнітопроводів), капсульованих у пластикові бокси, а також із зовнішнім електроізоляційним покриттям при низьких (до -60°C) та підвищених ($100\text{--}130^{\circ}\text{C}$) температурах є необхідною передумовою надійної та стабільної роботи електронних компонентів систем управління, передачі інформації (телекомунікаційних систем), контролю та вимірювань в умовах понижених і підвищених температур.

У процесі виконання проекту вивчалася температурна та часова стабільності таких магнітних характеристик нанокристалічних магнітопроводів, як магнітна проникність, індукція насичення та енерговитрати в осердях. На рис. 6 наведені температурні залежності початкової магнітної проникності для декількох зразків. Із порівняння властивостей нанокристалічних осердь з властивостями Mn-Zn-фериту (рис. 7) впливає безперечна перевага розроблених магнітом'яких матеріалів. Слід відзначити, що температур-

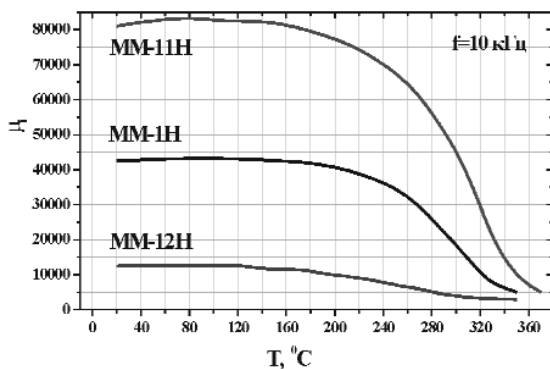
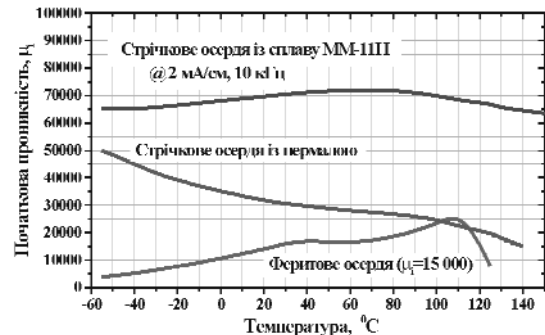
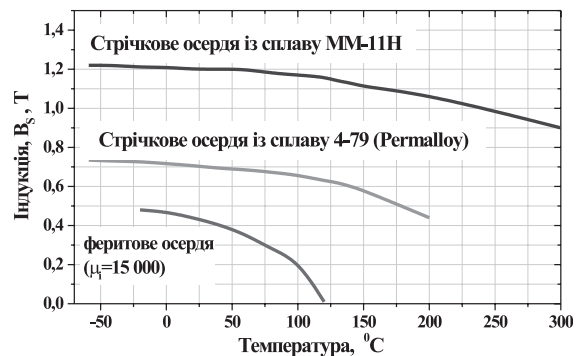


Рис. 6. Температурні залежності μ_i нанокристалічних осердь (12/20-10) із сплавів MM-1H, MM-11H та MM-12H. Швидкість нагрівання близько 5 К/хв

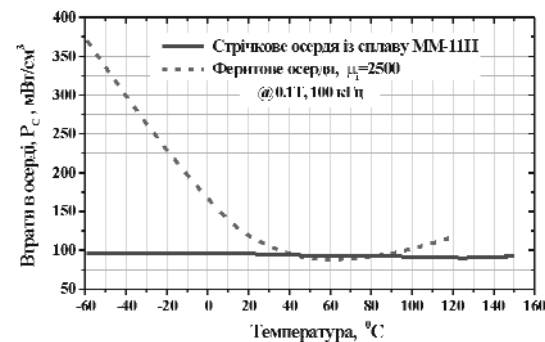
на та часова стабільності магнітних властивостей нанокристалічних сплавів значно вища, ніж аморфних сплавів, в тому числі і на основі Co.



а



б



в

Рис. 7. Температурна стабільність початкової проникності μ_i (а), індукції насичення B_s (б) та втрат в осердї P_c (в), виготовленого з нанокристалічного сплаву MM-11H

Проведені дослідження показали практичну відсутність втрат на перемагнічування в нанокристалічних осердях у процесі їх витримки до 30 год при температурі 150 °С, що свідчить про характерну для них високу часову стабільність і має велике значення, оскільки при роботі силових трансформаторів завжди відбувається їх розігрівання, і втрати при цьому зазвичай зростають.

Магнітні властивості нанокристалічних осердь в малих полях, які визначаються початковою проникністю також характеризуються високою часовою стабільністю в діапазоні кліматичних ($-40 \div +50$ °С) температур. У процесі вивчення характеру змін властивостей нанокристалічних осердь при підвищених та криотемпературах були визначені найбільш температурностабільні сплави та, відповідно, виготовлені з них магнітопроводи, експлуатаційні характеристики яких наведені в табл. 1. Забезпечення високої стабільності магнітних характеристик нанокристалічних сплавів у діапазоні температур $-60 \div +150$ °С та максимальної часової стабільності магнітної проникності при температурах 100–130 °С стало можливим у результаті оптимізації їх хімічного складу, ретельного дотримання умов проведення кристалізаційних відпалів, оптимального добору складу та методів виготовлення зовнішніх електроізоляційних покриттів.

Таблиця 1. Експлуатаційні характеристики розроблених економнолегованих нанокристалічних магнітопроводів

Характеристика	
Індукція насичення, Т	1,15 – 1,20
Відносна початкова магнітна проникність (на частоті 1 кГц)	30 000 – 120 000
Відносна максимальна магнітна проникність (на частоті 1 кГц)	150 000 – 600 000
Температура Кюрі, T_c , °С	560 – 600
Магнітострикція насичення, ppm	0,5 – 1,5
Втрати в осерді на частоті 100 кГц, при $B=0,3$ Т, Вт/кг	100 – 120
Діапазон робочих температур, °С	$-60 \div +130$
Максимальна температура використання, °С	150

Таким чином, нанокристалічні сплави з огляду на їх суттєво вищу порівняно з традиційними прецизійними сплавами температурну та часову стабільності гістерезисних магнітних властивостей до температур ~ 150 °С слід розглядати як магнітом'які матеріали з великими перспективами практичного використання в сучасній енергетиці, електротехніці та високоточному приладобудуванні.

3.2. Апробація та промислове впровадження нанокристалічних магнітопроводів у пристроях та приладах енергетики та електротехніки

Випробування та встановлення експлуатаційних характеристик готових магнітопроводів проводилося спільно зі спеціалістами підприємств-споживачів у відповідності з існуючими стандартами та метрологічними вимогами до серійних виробів підприємств приладобудівного, радіо- та електротехнічного профілю, а також до їх нових і близьких до промислової реалізації перспективних розробок. На протязі другого півріччя 2004 р. було виготовлено та поставлено на вітчизняні підприємства більше 3 000 магнітопроводів із нанокристалічних сплавів. Крім того, були виготовлені дослідні та дослідно-промислові партії вимірювальних ТС різного призначення з нанокристалічними магнітопроводами із сплавів ММ-1Н та ММ-11Н (рис. 8).

3.2.1. Вимірювальні трансформатори струму одно- та трифазних електронних лічильників електроенергії

Нанокристалічні стрічкові магнітопроводи МТ02510С-01-0021 розміром 20/25-10 з цих сплавів були використані замість імпортованих (російських) кільцевих осердь у серійних виробках ВАТ "Енерготерм" (м. Вінниця), зок-

рема, у вимірювальних трансформаторах струму однофазних електронних лічильників безпосереднього (прямого) включення типу ЛМ-1Т, призначених для обліку електроенергії споживання на комунальних та промислових об'єктах. Поставлені ТОВ "МЕЛТА" промислові партії магнітопроводів, що характеризуються високою магнітною проникністю ($\mu_r = 30000-80000$) та індукцією насичення 1,2 Т, цілком задовольняють вимогам виробництва та дозволяють випускати лічильники ЛМ-1Т першого класу точності відповідно до діючого ГОСТу. Зважаючи на високі експлуатаційні властивості нанокристалічних магнітопроводів і довготривалу стабільність їх характеристик, підприємство встановило середній термін служби лічильників протягом 24 років при експлуатації його в температурному діапазоні $-20 \div +55^\circ\text{C}$.

Зацікавленість ВАТ "ЕНЕРГОТЕРМ" та інших приладобудівних і енергетичних компаній нанокристалічними високостабільними магнітопроводами зумовлена переходом провідних у цих галузях підприємств до випуску нових конкурентоспроможних модифікацій мікропроцесорних лічильників відповідно до ГОСТ 30207-94. Виробники лічильників передбачають як високу точ-

ність вимірювань, так і необхідне забезпечення незалежності величини вихідного сигналу (в т. ч. трансформатора струму) від наявності постійної складової в мережі струму, що вимірюється. Створення таких нових вимірювальних ТС можливе на цей час на базі виготовлених ТОВ "МЕЛТА" дослідних партій розрізних (20/25-10 із сплаву ММ-1Н) та відпалених у поперечному магнітному полі (14/17,5-6,5 із сплаву ММ-11Н) нанокристалічних магнітопроводів, стійких до підмагнічування постійним струмом. Успішне завершення розробки дасть можливість замінити трансформатори струму фірми "VAC" (ФРН), які на цей час імпортуються підприємством, на вітчизняні.

3.2.2. Промислові трансформатори струму

Важливою проблемою сучасної електроенергетики є надійність промислових ТС та як можна більш тривалий термін їх експлуатації без втрати властивостей. Основним призначенням таких ТС є, зазвичай, створення пропорційного сильному первинному струму більш слабкого, який є зручнішим для вимірів або може бути використаним для управління різними мережами. Найбільшого



Рис. 8. Дослідні та дослідно-промислові партії вимірювальних трансформаторів струму різного призначення

поширення в енергетиці отримали трансформатори для перетворення струму від 100–1000 А в більш придатний для вимірювання – 1,0–5,0 А. Водночас енергетики відзначають, що при періодичних перевірках ТС з магнітопроводами із електротехнічної сталі через погіршення метрологічних характеристик в результаті так званого магнітного старіння відбраковується, залежно від умов експлуатації, від 20 до 80 % ТС. В той же час нанокристалічні сплави за своїми магнітними властивостями не поступаються навіть перед супермаломом та мають близьку до нуля магнітострикцію, значно вищу початкову та максимальну магнітні проникності (табл. 1) порівняно з магнітною проникністю трансформаторної сталі, для якої ці значення становлять 400 та 8 000 відповідно. Крім того, цим сплавам властиві надзвичайно вузька петля гістерезису (коерцитивна сила становить $H_c < 2,5$ А/м, тоді як для електротехнічних сталей вона дорівнює 65–100 А/м), високий питомий електричний опір (1,2 мкОм·см, що в 2–2,5 вище, ніж у сталі) та, відповідно, суттєво менші втрати на вихрові струми, що не перевищують 4–5 Вт/кг на частоті 20 кГц. Важливо, що нанокристалічні магнітопроводи здатні зберігати рівень властивостей при визначених існуючим стандартом температурах та вологості більше 100 років, що засвідчує екстраполяція результатів досліджень температурної та часової стабільностей їх магнітних характеристик, проведених у процесі виконання проекту. Завдяки такому рівню властивостей тороїдальні осердя із нанокристалічних ММ-1Н- та ММ-11Н-сплавів спроможні забезпечити трансформаторам змінного (до 1 000 Гц) струму клас точності на рівні 0,2–0,5S, що не поступається сучасним західним стандартам. У процесі виконання проекту в Інституті були виготовлені з урахуванням умов експлуатації та необхідної точності дослідні та дослідно-промислові партії монолітних осердь великого розміру

(45/75-35, 60/90-50, 80/120-35 і 90/130-35) для промислових (станційних) знижуючих (100/5-1500/5 А) трансформаторів струму напругою 6 та 10 кВ класу точності 0,2S. Вони були передані ВАТ "Енергопостачальна компанія "ХМЕЛЬНИЦЬКОБЛЕНЕРГО" для вирішення проблеми організації високоточного комерційного обліку споживаної електроенергії. За висновком енергетиків, рівень характеристик нанокристалічних магнітопроводів в поєднанні з їх високою стабільністю дає можливість використовувати їх у виробництві навіть лабораторних та еталонних трансформаторів струму класу точності вище за 0,02. Крім того, проведені експлуатаційні випробування нових ТС з нанокристалічними магнітопроводами засвідчили їх стійкість до підмагнічування постійною складовою струму, яке в умовах експлуатації може бути фактором розкрадання електроенергії. Наявність цієї складової збільшує від'ємну похибку вимірюючого ТС (зокрема, для їх старих моделей) у 2–2,5 рази при навантаженні споживання менше 50 % від номінального. Важливими також є результати проведених у ВАТ "ХМЕЛЬНИЦЬКОБЛЕНЕРГО" випробувань ТС з нанокристалічними осердями в динамічних режимах, моделюючих реальні процеси комутації навантажень та коротких замикань з кратністю струмів 10–25 $I_{ном}$. Будь-яких змін робочих параметрів цих ТС при навантаженнях не відбулося.

3.2.3. Трансформатори струму витоку нових пристроїв захисного відключення (ПЗВ)

Здатність нанокристалічних магнітопроводів забезпечувати високу точність вимірювання малих (до 10–30 мА) струмів дозволила застосовувати їх у датчиках (трансформаторах) струму витоку пристроїв захисного відключення (ПЗВ), що використовуються в енергетиці, промисловому виробництві та в

побутовій техніці. Виготовлена в рамках проекту дослідно-промислова партія таких трансформаторів з магнітопроводами 15/20-6,5 із сплаву ММ-11Н (рис. 8) передана в ЗАТ "Тираспольський електроапаратний завод" (Молдова) для використання в складі диференціальних пристроїв захисту з чутливістю 30 мА. Завдяки високій (більше 40 000) початковій магнітній проникності нанокристалічних магнітопроводів та більш низьким порівняно з пермалоем втратам на перемагнічування, виготовлені трансформатори забезпечили високу чутливість ПЗВ до струму витоку, зменшення їх габаритів та, відповідно, зниження вартості. Повністю успішними були проведені в НДІЕА (м. Ставрополь, Росія) кваліфікаційні та сертифікаційні випробування нових ПЗВ-АВДТ66-29 з трансформаторами ТСВ-220-1/10 ... 100 (ТУ У 21466665.009-04) виробництва ТОВ "МЕЛТА". Вже в березні 2005 р. завод перейшов на серійне виробництво ПЗВ, програма якого розрахована на виготовлення до кінця року 50 000 ПЗВ; трансформатори струму вартістю \$1,3 з нанокристалічними магнітопроводами для їх комплектації здійснюватиме ТОВ "МЕЛТА". Крім того, найближчим часом ЗАТ "Тираспольський електроапаратний завод" розпочинає виготовлення ПЗВ з чутливістю 10 мА на базі трансформаторів з нанокристалічними магнітопроводами ТСВ-220-1/10 ... 100.

3.2.4. Стержневі стрічкові магнітопроводи для індукційних магнітометрів

Для Львівського центру (ЛЦ) Інституту космічних досліджень (ІКД) НАКАУ та НАНУ розроблено технологію виготовлення прямокутних стержневих нанокристалічних магнітопроводів з високою механічною міцністю та стабільністю магнітної проникності в температурному інтервалі $-50 \div +150$ °С. Було виготовлено та передано до ЛЦ ІКД дослід-

но-промислової партію монолітних стержневих магнітопроводів (рис. 4) розмірами $10 \times 10 \times 750$ та $12,5 \times 12,5 \times 1000$ для комплектації створюваних в ЛЦ надчутливих індукційних магнітометрів, призначенням яких є вимірювання малих змін магнітного поля при проведенні космічних та геофізичних досліджень. Отримані значення чутливості індукційних зондів з нанокристалічними магнітопроводами на 15–17 % перевищують чутливість зондів, в яких використовуються найкращі стрічкові пермалої, і саме тому ці нові магнітометри знайшли попит в Японії, Німеччині, Італії та ін.

3.2.5. Нанокристалічні магнітопроводи в узгоджувачих вихідних широкополосних трансформаторах

Виготовлену дослідну партію (50 шт.) узгоджувачих вихідних широкополосних трансформаторів різноманітних систем звукозапису з магнітопроводами 20/32-10 і 25/40-15 із нанокристалічного сплаву ММ-1Н було передано в АТ "Національна радіокомпанія" (м. Київ). Використання трансформаторів з нанокристалічними осердями замість феритових (чи з трансформаторної сталі) в різноманітних системах звукозапису та відтворення забезпечило завдяки їх великому запасу потужності високу якість сигналів у широкому (від 10 Гц до 30 кГц) частотному діапазоні. Більш ефективними порівняно з магнітопроводами із традиційних магнітом'яких сплавів виявилися магнітопроводи з розмірами 4/8-4,5 з всебічним полімерним ізоляційним покриттям із нанокристалічного сплаву ММ-1Н в узгоджувачих широкополосних малогабаритних імпульсних трансформаторах телекомунікаційних систем (ВО "Завод ім. Петровського", м. Київ), а також магнітопроводи з розмірами 3/6-3 в узгоджувачих імпульсних мікротрансформаторах міні-АТС (завод ім. Т. Шевченка, м. Харків).

3.2.6. Монолітні нанокристалічні магнітопроводи в вихідних силових трансформаторах імпульсних джерел живлення

Здійснене в процесі виконання проекту доопрацювання технології виготовлення великогабаритних (90/125-75) монолітних нанокристалічних магнітопроводів масою до 2,5 кг зі стабільними до температур 130 °C властивостями із сплаву ММ-11Н дало можливість виготовити та поставити на Державне підприємство "Дніпропетровський науково-виробничий комплекс "Електровозобудування" дослідно-промислову партію магнітопроводів з метою виготовлення потужних вихідних трансформаторів для надійних та ефективних імпульсних джерел живлення та комплектації ними вітчизняних електровозів. Магнітні, електричні та механічні властивості цих магнітопроводів виявилися на рівні кращих імпортованих аналогів, зокрема магнітопроводів виробництва фірми СІМЕНС, та майже втричі вищими за відповідні властивості феритних магнітопроводів. Силові трансформатори з нанокристалічними магнітопроводами використані в серійному виробництві електровозів.

4. НАСТУПНИЙ ЕТАП ПРОМИСЛОВОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СТВОРЕНИХ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Європейський вибір розвитку економіки України зумовлює необхідність переходу до інноваційної моделі. У розвинених країнах світу посилюються тенденції щодо прискорення темпів розробки та практичної реалізації нових високопродуктивних технологій, спрямованих в першу чергу на ресурсо- та енергозбереження як фактори стійких темпів економічного зростання, розробку та освоєння промислового виробництва абсо-

лютно нових видів матеріалів і обладнання. У цьому зв'язку зазначимо, що в академічному середовищі термін "комерціалізація науки" (точніше, її результатів) поки що не став звичним. А на Заході при обговоренні тих чи інших напрямків фундаментальних досліджень в університетах чи дослідницьких центрах цілком природними є питання щодо можливого "application" майбутніх результатів цих досліджень. Безперечно, що пильна увага до цього боку діяльності науковців є вісннм часу і відображує ті об'єктивні зміни, що відбуваються сьогодні в суспільстві та в різних сферах людської діяльності, включаючи наукову.

Приклади використання результатів наукових розробок нашого Інституту на рівні промислового виробництва в підприємствах енергетичної, електротехнічної та, частково, приладобудівної галузей наведені не тільки для того, щоб проілюструвати ті вагомі переваги, які дає технологія надшвидкого гартування розплавів в одержанні найсучасніших і економічних магнітних матеріалів. Важливим є те, що можливості цієї технології завдяки її багатофункціональності є значно ширшими. Наприклад, вона дозволяє одержувати унікальні аморфні та мікрокристалічні стрічкові припої на основі міді, які замінюють золото-, та срібломісткі припойні матеріали, а також високотемпературні припої на Fe-Cr-Si-B-, Ni-Mn-, Ni-Mn-W-Co-основах для пайки конструкцій із спеціальних (в т. ч. вуглецевих) сталей, стільникових конструкцій з неіржавіючих та жароміцних сплавів, вузлів та деталей газових турбін, тощо.

Своє завдання автори вбачають і в тому, щоб звернути увагу керівників провідних галузей промисловості країни на існування реальних можливостей виводу розгалуженої промисловості України на якісно новий рівень за рахунок інновацій, в основі яких знаходились би набуті вже результати різнопланових фундаментальних досліджень та розробок, які проводяться установами На-

ціональної Академії наук. Вирішити пов'язані з цим проблеми лише власними силами науковці, безперечно, не в змозі, особливо, коли йдеться про широкомасштабне впровадження наукових розробок у виробництво. Так, наприклад, певною проблемою є те, що Інститут разом з МП сьогодні не в змозі задовольнити існуючі запити підприємств України щодо нових аморфних і нанокристалічних матеріалів, а також виробів з них (більшість з яких, до речі, мають подвійне призначення). Виробництво аморфної стрічки в поточному році не перевищить ~2 тон через недостатню потужність гартувального обладнання. І все ж таки це дасть можливість до кінця року знизити імпорتنі поставки магнітопроводів в Україну та здійснити їх експорт (див. табл. 2).

Водночас попит вітчизняних підприємств на такі матеріали та відповідні вироби, чи напівфабрикати (магнітопроводи) з них суттєво зростає. Крім того, на ці вироби уже є попит у країнах Західної Європи, в Росії, Китаї, Сінгапурі, Молдові та ін. На розроблені нашими фахівцями технології виготовлення мініатюрних магнітопроводів для засобів телекомунікації звернули увагу деякі провідні фірми США, зокрема, Beta Transformer Technology Corporation.

Усе вищесказане робить вельми актуальним завдання крупнотонажного виробництва аморфних, нано- і мікрокристалічних сплавів та стрічкових магнітопроводів із них на основі технології надшвидкого охолодження розплаву. Успішне вирішення цієї проблеми прискорило б поступ України до енергетичної незалежності. Розгортання такого виробництва на металургійних гігантах країни навіряд чи можна вважати виправданим, зважаючи на великі капітальні вкладання, зумовлені технічним переоснащенням та досить тривалим терміном їх окупності. На нашу думку, за відповідних умов до промислової реалізації такої великомасштабної інновації

Таблиця 2. Експортні та імпортозамінні можливості створюваної науково-технічної продукції (план 2005 р.)

Назва продукції	Країна	Обсяги експорту або заміна імпорту
Нанокристалічні та аморфні магнітопроводи різного призначення	Росія	заміна імпорту: ≥ 150 000 шт/рік
Нанокристалічні магнітопроводи з високою термочасовою стабільністю магнітних характеристик	Молдова, Росія	експорт: ≥ 50 000 шт/рік

найбільш підготовленим є саме МП ТОВ "МЕЛТА" завдяки його тісному зв'язку з Інститутом, набутому вже досвіду та кваліфікованим кадрам, які є в Україні тільки у нас.

Першочерговою із зазначених умов є створення продуктивного гартувального обладнання потужністю 20–50 кг за цикл розливки (її вартість становитиме близько \$700 000). Необхідною умовою є також створення відповідної "інфраструктури". Вона має складатися з плавильної установки для виплавки вихідних сплавів (вартістю \$250 000); пристосування для намотування одержаної стрічки; машини для її подовжнього розрізування (довжина стрічок при значній масі вихідного сплаву може сягати кілометрів); станків для намотування магнітних осердь різних розмірів; спеціальних печей для термічної та термомагнітної обробки сотень і тисяч осердь; пристрою для упаковки кожного осердя в пластикові бокси і нанесення всебічного ізоляційного полімерного покриття; лінії для розрізування магнітопроводів або формування в них немагнітного зазору та шліфовки їх торцевих частин; стенду для експресного контролю (перевірки і відбраковування) магнітних властивостей термооброблених та упакованих осердь, а також складських приміщень для зберігання сировини і готової продукції. Повна вартість такого проекту становитиме не менше \$1 500 000, термін реалізації – біля 2,5 років з поетапним введенням основних засобів і випуском перших промислових партій продукції через 1,5 роки.

Що стосується робочих приміщень для розміщення такого технологічного комплексу (1 000 кв.м), то (як можливий варіант) вони могли б орендуватися на території технологічного корпусу ІМФ НАНУ.

Проведений маркетинг дає підстави вважати, що найбільшим попитом як на внутрішньому, так і на європейському і світовому ринках користуватимуться магнітопроводи для вимірювальних ТС в електронних лічильниках електроенергії і мініатюрні магнітопроводи для телекомунікаційних трансформаторів. Середня конкурентна ціна магнітопроводу масою до 15 г складе \$1,0 (такою ж може бути ціна магнітопроводу масою 0,5 г), тобто об'єм реалізації від продажу близько 1 400 000 магнітопроводів масою 15 г, виготовлених з 20–22 тон аморфної стрічки, становитиме близько \$1 400 000. При виробництві нанокристалічних магнітопроводів масою 2–3 г по ціні \$0,8–0,9, або готових вимірювальних ТС з магнітопроводами масою близько 30 г (~ 700 000 шт/рік) по ціні не менше \$3–3,5 за трансформатор, окупність проекту складатиме близько 3 років.

Виконання інноваційного проекту, пов'язаного з розширенням об'ємів та номенклатури магнітопроводів, можливе лише за умови супроводу його відповідними інвестиціями (наприклад, це міг би бути безвідсотковий банківський кредит, чому могла б посприяти держава). Тим самим був би задоволений попит вітчизняних підприємств на ефективні магнітом'які матеріали, що звільнило б підприємців від примх та високої вартості імпорту. При цьому відкрилися б нові можливості створення найсучасніших приладів, обладнання та устаткування для енергетики, електроніки, електро- і радіотехнічних галузей промисловості.

На закінчення хочеться висловити надію, що приклад ІМФ НАНУ, як і інших інститутів Академії, які в стислі терміни впровадили низку важливих для країни розробок за

результатами виконання інноваційних проектів у 2004 р., сприятиме тому, що підупала останніми роками увага влади до проблем академічної науки та науковців зростає. Є надія, що держава звернеться до великих і ще багато в чому не використаних можливостей практичної віддачі науки. Це єдино вірний та ефективний шлях інтенсивного розвитку економіки, на який уже давно і впевнено стали розвинені країни, а наздоганяти, як відомо, завжди важко...

ЛІТЕРАТУРА

1. **Танкевич Є. М.** Первинні вимірювальні канали систем комплексної автоматизації електроенергетичних об'єктів // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук / ІЕД НАНУ, Київ, 2004, 37с.
2. **Гуртовцев А. Л., Бордаев В. В., Чижонков В. И.** Низковольтные однофазные измерительные трансформаторы тока // Электрические сети и системы. – 2004. – № 3. – С. 44–53.
3. **Мирошніченко И. С., Салли И. В.** Установка для кристаллизации сплавов с большой скоростью охлаждения // Заводская лаборатория. – 1959. – т. 25. – № 11. – С. 1398–1399.
4. **Duwez P., Willens R. H., Klement W.** Continuous series of metastable solid solutions in silver-copper alloys // J. Appl. Phys. – 1960. – v. 31. – № 6. – P. 1136–1139.
5. **Мирошніченко И. С.** Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982, 167 с.
6. **Ефимов Ю. В., Варлимонт Г., Мухин Г. Г. и др.** Метастабильные и неравновесные сплавы. – М.: Металлургия, 1988, 383 с.
7. **Маслов В. В., Падерно Д. Ю.** Получение аморфных металлических сплавов // В кн. Аморфные металлические сплавы. – К.: Наук. думка, 1987, С. 52–86.
8. Pat. 3862658 USA/ Extended retention of melt-spun ribbon on quenching wheel // J.R.Bedell. – Publ. 28.01.75.
9. **Libermann H. H., Graham C. D.** Production of amorphous alloy ribbons and effects of apparatus parameters on ribbon dimensions // IEEE Trans. Magn. – 1976. – MAG-12. – № 6. – P. 921–923.
10. **Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K.** New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine graine structure // J. Appl. Phys. – 1988. – v. 64. № 10. – P. 6044–6046.