

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PACSnumbers: 61.43.Dq, 61.46.-w, 75.50.Kj, 81.40.Ef, 81.40.Rs, 83.60.Np, 85.70.Ay

Аморфные и нанокристаллические магнитопроводы для высокочувствительных датчиков индукционных магнитометров

В. К. Носенко, В. В. Кирильчук, А. П. Кочкубей, В. З. Балан

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев, Украина*

С использованием индукционно-непрерывного метода определены динамические магнитные характеристики аморфных лент сплава на основе кобальта ММ-5Co (система $(\text{Co}_{72-x-y}\text{Fe}_x\text{Cr}_y)(\text{SiB})_{28}$) и сплава ММ-11Н на основе системы $\text{Fe}_{73}(\text{Nb}, \text{Cu})_4(\text{Si}, \text{B})_{23}$, получаемых по технологии сверхскоростной (10^5 – 10^6 К/с) закалки расплава. Описана методика изготовления монолитных ленточных магнитопроводов стержневой прямоугольной формы из этих сплавов, а также представлен пример их применения в датчиках высокочувствительных индукционных магнитометров. Показано, что чувствительность индукционного зонда с новым нанокристаллическим магнитопроводом превышает чувствительность зонда с пермаллоевым (80НХС) сердечником; при этом вес магнитопровода уменьшается как минимум на 10–15%. Результаты исследований позволяют прогнозировать эффективное использование магнитопроводов, изготовленных по новой методике из нанокристаллической и аморфной ленты, в индукционных магнитометрах различных типов для геофизических исследований, а также для изучения магнитных аномалий в космическом пространстве.

З використанням індукційно-неперервної методи визначено динамічні магнетні характеристики аморфних стрічок стопу на основі кобальту ММ-5Co (система $(\text{Co}_{72-x-y}\text{Fe}_x\text{Cr}_y)(\text{SiB})_{28}$) та стопу ММ-11Н на основі системи $\text{Fe}_{73}(\text{Nb}, \text{Cu})_4(\text{Si}, \text{B})_{23}$, одержуваних за технологією надшвидкого (10^5 – 10^6 К/с) гартування розтопу. Описано методику виготовлення монолітних стрічкових магнетопроводів стрижневої прямокутньої форми з цих стопів, а також наведено приклад їх застосування в датчиках високочутливих індукційних магнетометрів. Показано, що чутливість індукційного зонда з новим нанокристалічним магнетопроводом перевищує чутливість зонда з пермалойовим (80НХС) осердяем; при цьому вага магнетопроводу

зменшується як мінімум на 10–15%. Результати досліджень уможливають спрогнозувати ефективне використання магнетопроводів, виготовлених за новою методикою з нанокристалічної та аморфної стрічок, в індукційних магнетометрах різних типів для геофізичних досліджень, а також для вивчення магнетних аномалій у космічному просторі.

Dynamic magnetic characteristics of amorphous ribbons of cobalt-based MM-5Co alloy $((\text{Co}_{72-x-y}\text{Fe}_x\text{Cr}_y)(\text{SiB})_{28})$ system) and MM-11N alloy based on $((\text{Fe}_{73}(\text{Nb}, \text{Cu})_4(\text{Si}, \text{B})_{23})$ system produced by means of ultrafast melt quenching (10^5 – 10^6 K/s) technology are determined using induction-continuous method. Manufacturing procedure for monolithic ribbon wound rectangular rod-shaped magnetic cores made of these alloys is described, and example of their application in sensors of high-sensitive induction magnetometers is presented. Sensitivity of induction probe with new nanocrystalline magnetic core exceeds the sensitivity of probe with permalloy (80NHS) core. Magnetic core weight decreasing is not less than by 10–15%. Results of the investigation allow predicting effective use of magnetic cores made of nanocrystalline and amorphous ribbons using the new procedure in induction magnetometers of various types for geophysical investigations and study of magnetic anomalies in space as well.

Ключевые слова: нанокристаллический сплав, магнитопровод, индукционный зонд, магнитометр.

(Получено 29 июля 2014 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Индукционные, а также феррозондовые магнитометры являются основными средствами исследования магнитных полей на Земле и в космосе. С помощью этих приборов изучают магнитные аномалии вокруг Земли и других космических объектов, как природных (Луна, Венера, Марс) так и искусственных (спутники и космические орбитальные станции). Учитывая необходимость достижения высокой точности и чувствительности приборов, к магнитопроводам индукционных и феррозондовых датчиков предъявляются жёсткие требования. Прежде всего, это минимизация, так называемого, магнитного шума, а также достижение практически абсолютной повторяемости петли $B(H)$ в широком частотном диапазоне.

Наиболее известными материалами для изготовления магнитопроводов датчиков сейчас являются пермаллой высокого класса (III кл.) 81НМА и 80НХС или их аналоги производства США, ФРГ, Японии. Имея очень высокую начальную проницаемость ($\mu_i > 25000$ на частоте $f < 50$ Гц), низкую коэрцитивную силу ($H_c \cong 0,4$ А/м) и удовлетворяя основным требованиям материала для магнитопроводов, прокатные ленты этих традиционных магнитомягких материалов имеют ряд недостатков. Основным из них является очень низ-

кая стабильность магнитных характеристик относительно механических нагрузок и других внешних воздействий, в том числе термических и радиационных. Поэтому задача создания стойких к влиянию внешних факторов магнитомягких сердечников с индукцией насыщения $B_s = 0,5-1,2$ Тл для изготовления феррозондов и индукционных стержневых датчиков является весьма актуальной. Повышение значимости решения этой задачи связано с всё более широким использованием магнитопроводов в условиях космического полёта для изучения магнитных аномалий в верхних слоях земной атмосферы.

Научная новизна подхода авторов к решению поставленной задачи основывается на использовании в качестве магнитопроводов, разработанных в ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, новых нанокристаллических и аморфных ленточных материалов [1, 2] вместо традиционных кристаллических пермаллоев. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой стабильности магнитных характеристик определённых композиций легированных аморфных сплавов под действием таких внешних факторов как температура, упругие механические нагрузки и радиационное облучение. Специальными обработками легированных аморфных сплавов (лент) можно обеспечить достижение желаемых характеристик магнитопроводов индукционных датчиков магнитного поля.

Использование ленточных магнитопроводов, особенно удлинённой прямоугольной формы, в измерительных приборах космической техники также невозможно без соответствующей их фиксации (замоноличивания). Перегрузки, возникающие в условиях космического полёта (по крайней мере, на старте), накладывают соответствующие ограничения относительно неподвижности ленточных сердечников, используемых в качестве основных элементов датчиков и других преобразующих устройств.

Испытания новых стержневых магнитопроводов в составе индукционных датчиков магнитометров произведены для выяснения стабильности параметров чувствительности в условиях эксплуатации.

Целью настоящей работы являлась разработка методов получения нанокристаллических и аморфных ленточных магнитопроводов стержневой формы с наружным электроизоляционным покрытием, которые характеризуются высокой стабильностью магнитных свойств в диапазоне температур использования 213–378 К.

В рамках настоящей работы решались следующие задачи:

– разработка способов и методики изготовления стержневых прямоугольных сердечников из аморфной ММ-5Co (система Co–Fe–Cr–Si–В) и нанокристаллической ММ-11Н (система Fe–Nb–Cu–Si–В) ленты с изоляционным покрытием на её поверхности;

– разработка методики монолитизации отожжённых аморфных и нанокристаллических сердечников;

– изготовление опытной партии стержневых монолитных нанокристаллических магнитопроводов из сплава ММ-11Н и их апробация в высокочувствительных датчиках магнитного поля индукционных магнитометров взамен ленточных (наборных) сердечников из пермаллоев 80НХС и 81НМА.

Разработка даже одного магнитопровода из аморфного или нанокристаллического сплава и эффективная замена им пермаллоя в сердечниках феррозондовых датчиков позволяет модернизировать или создать новые способы изучения магнитных полей не только в атмосфере, космосе, но и под землёй и под водой. Поэтому наиболее существенный вклад полученные результаты внесут в приборостроение для геологии.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами настоящего исследования были аморфные ленты сплава на основе кобальта ММ-5Со (система $(\text{Co}_{72-x-y}\text{Fe}_x\text{Cr}_y)(\text{SiB})_{28}$) и сплава ММ-11Н на основе системы $\text{Fe}_{73}(\text{Nb}, \text{Cu})_4(\text{Si}, \text{B})_{23}$, получаемые по технологии сверхскоростной (10^5 – 10^6 К/с) закалки расплава [3]. Ленты сплава ММ-11Н аморфные в исходном состоянии в процессе термообработки при 773–823 К кристаллизуются с образованием нанокристаллической структуры, в которой каждый кристаллик твёрдого раствора α -Fe(Si) размером 10–12 нм окружён тонкой прослойкой остаточной аморфной фазы [1, 4]. Так образуется, так называемая, однодоменная магнитная структура (один кристаллик – один домен) с 80% об. кристаллической фазы, которая и определяет уникальное сочетание высоких магнитных свойств магнитомягких сплавов этого класса.

Основные физические и магнитные свойства лент аморфного ММ-5Со и нанокристаллического ММ-11Н сплавов после оптимальной термообработки (ТО) при 723 К, 60 мин. и 813 К, 90 мин., соответственно, представлены в (табл. 1) в сравнении со свойствами пермаллоев 80НХС и 81НМА [5].

Магнитные характеристики измерялись с использованием измерительного комплекса «MS-02 В-Н Анализатор» (производства ОАО «МСТАТОР», г. Боровичи, Россия) индукционно-непрерывным методом на тороидальных образцах $D = 32$ мм, $d = 20$ мм и $h = 10$ мм (где D — внешний диаметр, d — внутренний диаметр, h — высота) с площадью поперечного сечения $S_{\text{т.о.}} \geq 0,4$ см² и коэффициентом заполнения $K_{\text{зап.}} \geq 80\%$, изготовленных из ленты толщиной 22 ± 2 мкм с предварительно нанесённым электроизоляционным покрытием. В качестве покрытия использовалось жидкое стекло, а также некоторые кремнийорганические лаки. Об эффективности электроизоля-

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики сплавов ММ-5Со, ММ-11Н и пермаллоев 80НХС и 81НМА.

Характеристика	ММ-5Со	ММ-11Н	80НХС	81НМА
Плотность, г/см ³	7,7	7,35	8,5	8,7
Толщина ленты, мкм	22 ± 2	22 ± 2	25	20
Удельное электросопротивление, мкОм·см	≥ 135	≥ 115	62	80
Индукция насыщения, Тл	0,46	1,25	0,63	0,5
Магнитострикция насыщения, ×10 ⁶	< 0,5	0,5–1	1,5	0,5
Удельные потери (в тороидальном сердечнике на частоте 10 кГц и $B = 0,2$ Тл), Вт/кг	≤ 3	5	7	8
Начальная магнитная проницаемость (на частоте 1кГц в поле 0,1 А/м)	90000–150000	50000–120000	25000	50000
Диапазон рабочих частот, МГц	0–3,0	0–3,0	0–0,2	0–1,5
Температура Кюри, К	453	873	603	533
Диапазон рабочих температур, К	213–378	213–403	213–353	213–353

ции витков ленты свидетельствовал тот факт, что электросопротивление ленты в сердечнике после отжига составляло не менее $0,8R_i$ (где R_i — сопротивление развёрнутой исходной ленты). При этом было определено, что переход от аморфного к нанокристаллическому состоянию ленты сопровождается уменьшением её удельного сопротивления лишь на 5%.

Как видно из таблицы, основными преимуществами как аморфного, так и нанокристаллического сплавов в сравнении с пермаллоями являются высокие B_s до 1,25 Тл и относительная начальная магнитная проницаемость μ_i до 150000 (измеренная на частоте 1 кГц в поле 0,1 А/м), низкие коэрцитивная сила и потери на перемагничивание в широком диапазоне частот.

В качестве компаунда для монолитизации отожжённых сердечников в прямоугольной форме использовали полимерную композицию КФ-1, разработанную специалистами ПО «КАРАТ» (г. Львов). Основные характеристики этого формообразующего компаунда приведены в (табл. 2). Отличительной чертой этого материала является высокая прочность (на уровне Д16ТА) и электроизоляционная способность.

Контроль магнитных свойств стержневых (прямоугольных) магнитопроводов после ТО, до и после монолитизации компаундом выполнялся с использованием схемы, представленной на (рис. 1).

Готовые сердечники размещались в соленоиде диаметром $\cong 20$

ТАБЛИЦА 2. Свойства полимерной композиции КФ-1.

Характеристика	Значение
Время полной полимеризации при температуре 353 К	≤ 5 часов
Предел прочности на сдвиг	10 МПа
Электрическая прочность	≥ 8 кВ/мм
Коэффициент теплопроводности	≥ 1 Вт/м·К

мм, длиной намотки $L = 750$ мм и с количеством витков $W = 1000$. Измерительная обмотка, размещаемая в центральной части соленоида, длиной $\cong 600$ мм ($0,8L$) имела $W_{\text{изм.}} = 800$ витков. Сопротивление $R = 2$ кОм выбиралось с расчёта $R \gg R_L$, где R_L — индуктивное сопротивление полевой обмотки соленоида на частоте измерения 20 Гц. Это обеспечивало синусоидальность тока и, соответственно, магнитного поля соленоида.

Площадь сечения магнитного сердечника рассчитывалась по формуле:

$$S = m/(\gamma l), \quad (1)$$

где m — масса сердечника, l — длина сердечника, γ — плотность сплава. Измерения чувствительности ($S_{\text{и.з.}} = U_{\text{эф.}}/H$) и приведённой чувствительности ($K_S = S_{\text{и.з.}}/W_{\text{изм.}} \cdot f l^2$) индукционного зонда с использованием испытуемых сердечников выполняли при подаче на полевую обмотку тока 1 мА и фиксируя $U_{\text{эф.}}$ на выводах измерительной обмотки $W_{\text{изм.}}$ вольтметром. При этом напряжённость поля H (Тл) рассчитывалась по формуле:

$$H = \mu_0 i W / l, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, i и W — ток и коли-

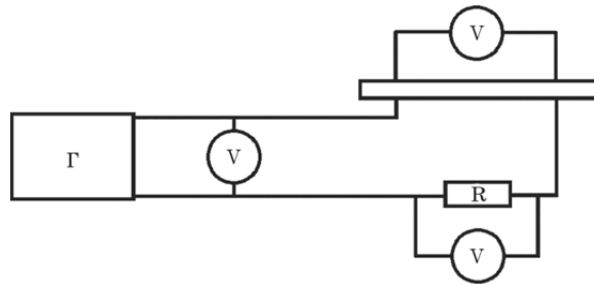


Рис. 1. Схема измерения чувствительности индукционного зонда Г — генератор, V — вольтметры, R — резистор.

чество витков в полевой обмотке соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Технологические особенности и методика изготовления стержневых (прямоугольных) сердечников из лент аморфного ММ-5Со и нанокристаллического ММ-11Н сплавов с изоляционным покрытием на их поверхности

Высокая хрупкость отожжённой ленты ММ-11Н [6] и необходимость защиты её поверхности от образования оксидной плёнки во время отжига в открытой печи на воздухе обуславливают необходимость нанесения изоляционного покрытия на поверхности исходной пластичной ленты и совмещение формирования готового магнитного сердечника с заключительной его термообработкой.

Существуют только ограниченные литературные данные относительно влияния изоляционного покрытия и компаунда (при его затвердевании) на магнитные свойства ленточных сердечников, которые изготавливаются с применением аморфных и нанокристаллических сплавов [7, 8]. Наиболее остро стоит проблема разработки методики изготовления сердечников прямоугольной формы из лент сплавов с ненулевой (по крайней мере, в исходном состоянии) магнитострикцией. При высыхании традиционных покрытий — эмульсий MgO , SiO_2 или других, в поверхностных слоях лент возникают механические напряжения, которые вследствие механомагнитного эффекта приводят к увеличению магнитной анизотропии и соответствующему ухудшению магнитных свойств: увеличению коэрцитивной силы, уменьшению магнитной проницаемости, увеличению ваттных потерь в сердечнике и т.д. [9].

Нанесение жидкого стекла на поверхности ленты осуществлялось губкой (тампоном) во время её непрерывной перемотки. После сушки в потоке тёплого воздуха лента с покрытием наматывалась в форме вытянутого эллипса длиной 850 мм с помощью специального легкоразборного устройства. Недостаточная пластичность ленты нанокристаллического сплава при толщине больше 22 мкм не позволяет полностью автоматизировать нанесение покрытия и смотку необходимого пакета. Однако продуктивность приспособления для смотки ленты в форме вытянутого эллипса массой около 550 г составляет около 1 часа для нанокристаллического сплава и около 0,5 часа для пластичной аморфной ленты сплава ММ-5Со. Скреплённый пакет ленты можно отжигать сжатым между двумя плоскопараллельными пластинами из нержавеющей стали. Однако, вследствие довольно значительной массы материала, даже при минимальной инерционности печи, было довольно трудно обеспечить прецизионное поддержание температуры отжига сердечника, кото-

рый, вследствие выделения теплоты при кристаллизации (для сплава ММ-11Н), способен быстро и почти бесконтрольно разогреваться.

Для обеспечения формирования сердечника заданной геометрии и необходимой стабильности температуры его отжига был использован специальный пенал (рис. 2), который был изготовлен из специальной хромистой бронзы БрХ-0,5, предварительно прокатанной и отожжённой для обеспечения максимальной прочности ($\sigma = 50$ кг/мм²) и теплопроводности ($\cong 0,9\lambda_{\text{Cu}}$, где λ_{Cu} — теплопроводность меди). Пакет ленты довольно свободно размещался в пенале и зажимался верхней рейкой (прижимом) для обеспечения необходимого коэффициента заполнения магнитопровода ($S_{\text{сердечника}} \geq 0,77$ см²). Готовая форма-пенал имеет вес 2840 г, что обеспечивает необходимую её теплоёмкость для поддержания постоянной температуры отжига сердечника. Кроме того, высокая теплопроводность пенала, как свидетельствуют непосредственные исследования, обеспечивает высокую стабильность температуры (± 2 К) вдоль магнитопровода, т.е. фактическую безградиентность термообработки. Средняя скорость нагрева и охлаждения сердечника в пенале составляла 200 К/ч.

Несжатые петли ленты, выходящие с обеих сторон за пределы пенала, обрезались алмазным диском без использования охлаждающей жидкости сразу после завершения термообработки.

После удаления верхней рейки (прижима пенала) отожжённый сердечник прямоугольной формы 11×11×750 мм вынимается практически без какого-либо усилия. Разница в весе партии сердечников $\leq 5\%$ была обусловлена, прежде всего, различной толщиной слоя жидкого стекла на поверхностях ленты вследствие немеханизированного его нанесения и слегка различающейся шероховатости поверхностей ленты микронного уровня.



Рис. 2. Специальные разборные пеналы для безградиентной термической обработки стержневых ленточных сердечников из аморфных и нанокристаллических сплавов.

3.2. Методика монолитизации отожжённых стержневых сердечников

Для придания необходимой прочности готовым ленточным сердечникам для их дальнейшего использования в составе датчиков индукционных магнитометров была разработана методика их монолитизации в прямоугольной форме с помощью полимерной композиции КФ-1.

Отожжённый ленточный сердечник, дополнительно скреплённый клейкой лентой в 3–5 точках, постепенно погружался в форму с компаундом, вытесняя последний. При этом разборную форму (пенал) с размером полости $14 \times 14 \times 760$ мм изготовленную, например, из дюралюминия и выстеленную внутри бумагой или фторопластовой плёнкой, вначале частично заполняли компаундом, а потом, положив сверху сердечник, постепенно заливали до полного его (сердечника) покрытия компаундом. В замоноличенном таким образом сердечнике прямоугольной формы срезали ребра (четыре острых угла компаунда) по всей длине так, чтобы максимальная диагональ сечения составляла не более 18 мм. Таким образом получали сердечник овального (почти круглого) сечения. Следует заметить, что такой сердечник всегда был точно позиционирован в центре компаунда (заливочной формы) специальными дистанционными прокладками из твёрдого компаунда. Процесс затвердевания компаунда длился 5–6 часов. В результате использования открытой горизонтальной формы значительно уменьшается количество воздушных полостей (дефектов), остающихся на поверхности формы и внутри компаунда после его отверждения. После высыхания избыточные части компаунда на краях сердечника обрезались алмазным или абразивным диском, так чтобы длина замоноличенного сердечника составляла $750 \pm 0,5$ мм.

3.3. Проверка свойств партии стержневых магнитопроводов для датчиков индукционных магнитометров

Для аттестации характеристик и дальнейшей апробации была изготовлена опытная партия монолитных магнитопроводов (рис. 3) прямоугольной формы — 20 единиц (в том числе из аморфной ленты ММ-5Со, размером по металлу $12,5 \times 12,5 \times 1200$ мм). Результаты измерений чувствительности и приведённой чувствительности индукционных зондов с использованием 12 нанокристаллических магнитопроводов представлены в табл. 3 вместе с соответствующими данными относительно их массы и площади поперечного сечения, а также результатами измерения индуктивности L (мультиметром Е7-8) на 1000 витках и частоте 1 кГц. При расчётах $S_{и.з.}$ и K_s учтены следующие числовые данные: $H = 1,6755 \cdot 10^{-6}$ Тл ($i = 1$ мА,



Рис. 3. Опытная партия монолитных магнитопроводов.

$W = 1000$, $l = 750$ мм), $W_{\text{изм.}} = 800$, $f = 20$ Гц. Расчётное значение $U_{\text{эф.}} = 2\pi f W_{\text{изм.}} \Phi = 17,9$ мВ получено с учётом магнитной проницаемости формы $\mu\Phi = 1461$, магнитной проницаемости тела сердечника $\mu_{\text{т.с.}} = 1380,37$, минимального значения относительной проницаемости материала сердечника $\mu = 25000$, индукции $B = H\mu_{\text{т.с.}} = 2,31 \cdot 10^{-3}$ Тл и магнитного потока $\Phi = BS = 1,78 \cdot 10^{-7}$ Вб.

По полученным данным трудно установить корреляции между величиной чувствительности индукционного зонда, индуктивностью и площадью поперечного сечения сердечника. Несовершенство данных относительно абсолютных величин чувствительности индукционных зондов на изготовленных сердечниках не мешает констатировать получение высоких значений приведённой чув-

ТАБЛИЦА 3. Свойства индукционных зондов с монолитными магнитопроводами $10 \times 10 \times 750$ мм из сплава ММ-11Н.

Образец №	Вес сердечника, г	Площадь сечения, см ²	$U_{\text{эф.}}$, мВ	$S_{\text{изм.}} \cdot 10^{-3}$, В/Тл	K_S	L , мГн
1	412,5	0,748	22,7	13,548	1,505	162
2	437	0,793	22,0	13,130	1,459	156
3	429	0,778	22,5	13,429	1,492	163
4	427	0,775	23,9	14,264	1,585	166
5	426	0,773	22,6	13,489	1,499	171
6	426	0,773	23,5	14,026	1,558	157
7	426	0,773	23,5	14,026	1,558	167
8	423	0,767	23,5	14,026	1,558	165
9	424	0,769	23,0	13,727	1,525	162
10	424,5	0,770	23,3	13,906	1,545	166
11	424,2	0,769	20,4	12,175	1,353	162
12	366	0,664	20,0	11,937	1,326	163

ствительности и малую их разницу между собой.

Измеренные значения чувствительности и приведённой чувствительности индукционных зондов, изготовленных с использованием аморфных сердечников из более дорогого кобальтового сплава ММ-5Со, оказались лишь немного выше (на 5–7%) значений для нанокристаллических сердечников.

Поскольку именно этот аморфный сплав обладает рекордными значениями начальной проницаемости (до 150 000) и чрезвычайно низкими магнитострикцией ($< 0,5 \cdot 10^{-6}$) и коэрцитивной силой ($< 0,5$ А/м) его целесообразно использовать для создания магнитопроводов датчиков феррозондовых магнитометров.

3.4. Апробация стержневых магнитопроводов из нанокристаллического сплава ММ-11Н в высокочувствительных зондах магнитного поля индукционных магнитометров нового поколения

Испытания работоспособности монолитных сердечников $10 \times 10 \times 750$ мм и $12,5 \times 12,5 \times 1200$ мм, массой (по металлу) 420 и 1000 г соответственно, из ленты сплава ММ-11Н в качестве магнитопроводов высокочувствительных зондов магнитного поля индукционных магнитометров выполнялись в ООО «Лаборатория электромагнитных инноваций» (г. Львов). Полученные значения чувствительности и приведённой чувствительности индукционных зондов с использованием изготовленных нанокристаллических сердечников оказались на 15–17% выше, чем те, которые обычно получают при использовании наилучших ленточных пермаллоев.

Чувствительность индукционного зонда с новым нанокристаллическим магнитопроводом превышает чувствительность зонда с пермаллоевым (80НХС) сердечником и составляет $(12–15) \cdot 10^3$ В/Тл на частоте 20 Гц при величинах магнитного потока $\Phi = (1–20) \cdot 10^{-8}$ Вб, при этом вес магнитопровода уменьшается на 10–15%. Новыми зондами была укомплектована опытная партия сверхнизкочастотных индукционных магнитометров для геофизических исследований ЛЕМІ-120, разработанных ООО «Лаборатория электромагнитных инноваций». Технические характеристики этого магнитометра приведены на рис. 4. К материалам, которые используются в качестве сердечников в этих приборах, предъявляются довольно жёсткие требования относительно температурно-временной стабильности их гистерезисных магнитных свойств. Как видно, магнитометр ЛЕМІ-120 характеризуется исключительно низким уровнем шумов и широким динамическим частотным диапазоном, что делает его пригодным для различных применений в геофизике. Встроенный предварительный МДМ-усилитель с малым потреблением и дифференциальным выходом позволяет применять какую угодно систему

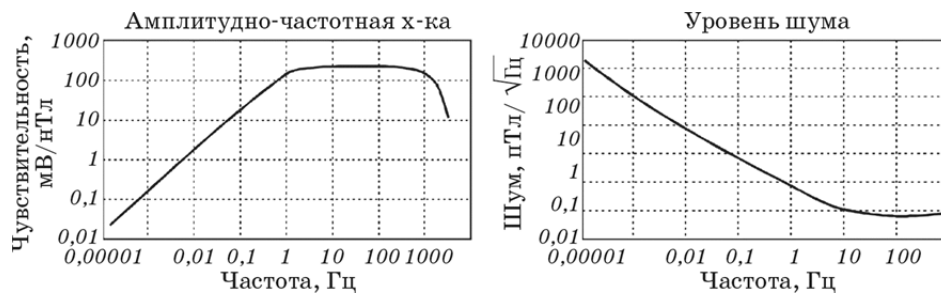


Рис. 4. Основные метрологические характеристики индукционного магнитометра с нанокристаллическим магнитопроводом.

регистрации данных на расстоянии до 200 метров от места установки магнитометра.

Основные особенности ЛЕМІ-120 (рис. 5): сверхширокий диапазон частот, низкий уровень собственных шумов и малое потребление. Прибор может быть также помещён в водонепроницаемый жёсткий корпус и будет готов к работе сразу после подачи на него напряжения.

Полученные результаты относительно ударостойкости и временной стабильности магнитных характеристик сердечников, изготовленных по новой методике из нанокристаллической ленты ММ-11Н, позволяют прогнозировать их эффективное использование вместо высококлассных пермаллоев в измерительных устройствах космической техники.

Таким образом, в результате выполненных исследований на базе ранее разработанных нанокристаллических (ММ-11Н) и аморфных



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Частотный диапазон — 0,0001–1000 Гц.
 Коэффициент преобразования на частотах:
 0,0001–1 Гц — $200 f$ мВ/нТл,
 1–1000 Гц — 200 мВ/нТл.
 Шум на частоте:
 0,001 Гц — < 100 пТл (Гц) $^{-1/2}$,
 0,1 Гц — < 1 пТл (Гц) $^{-1/2}$,
 100 Гц — $< 0,01$ пТл (Гц) $^{-1/2}$.
 Потребляемая мощность — < 220 мВт.
 Вес — $< 6,0$ кг.
 Размеры: диаметр/длина — 85/1340 мм.

Рис. 5. Внешний вид и технические характеристики магнитометра ЛЕМІ-120, f — частота принимаемого сигнала.

(ММ-5Сo) сплавов созданы новые индукционные датчики, в которых необходимое распределение магнитного поля в магнитопроводе реализовано при меньшей массе сердечника и упрощённой конструкции обмоток, что существенно удешевило технологию их изготовления и одновременно уменьшило количество меди в обмотках.

4. ВЫВОДЫ

1. В результате выполненных исследований и разработок предложена новая методика изготовления разомкнутых стержневых (прямоугольных) магнитопроводов из аморфной ММ-5Сo и нанокристаллической ММ-11Н ленты с изоляционным покрытием на их поверхности. Воспроизводимость свойств стержневых магнитопроводов гарантирована безградиентной термообработкой в массивном пенале из хромистой бронзы.

2. Выбранные методы монолитизации довольно хрупкого отожжённого ленточного сердечника с помощью высокотеплопроводной и прочной (после затвердевания) полимерной композиции КФ-1 позволили изготовить магнитопроводы заданной геометрической формы. Высокая чувствительность сердечника после монолитизации компаундом не изменяется.

3. Полученные результаты относительно механической прочности и радиационной стойкости (за рамками данного исследования) магнитопроводов, изготовленных по новой методике из нанокристаллической и аморфной ленты, позволяют прогнозировать их эффективное использование в индукционных магнитометрах различных типов для геофизических исследований, а также для изучения магнитных аномалий в космическом пространстве.

Работа выполнена при поддержке грантом Международного инновационного центра нанотехнологий СНГ (договор гранта № 10888 от 10.05.2011 г.).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Маслов, В. К. Носенко, Л. Е. Тараненко, А. П. Бровко, *Физ. мет. металловед.*, **91**: 47 (2001).
2. V. V. Nemoshkalenko, V. V. Maslov, and V. K. Nosenko, *Mater. Technol.*, **17**: 33 (2002).
3. В. В. Немошкаленко, В. В. Маслов, В. З. Балан, В. К. Носенко, Н. С. Косенко, Д. Ю. Падерно, *Способ непрерывного литья ленты*, Патент Украины № 1304 (МКИ В 22 D 11/06) (*Промислова власність*, № 1: 1994).
4. М. А. Васильев, В. В. Маслов, В. К. Носенко, Г. Г. Галстян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **32**, № 3: 375 (2010).
5. *Прецизионные сплавы: Справочник* (Ред. Б. В. Молотиллов) (Москва:

- Металлургия: 1983).
6. В. В. Маслов, В. И. Ткач, В. К. Носенко, С. Г. Рассолов, *Физика и техника высоких давлений*, **20**: 62 (2010).
 7. Ю. Н. Стародубцев, В. И. Кейлин, В. Я. Белозеров, *Электротехника*, № 8: 48 (1994).
 8. Ю. Н. Стародубцев, В. И. Кейлин, В. Я. Белозеров, *Электротехника*, № 2: 22 (1995).
 9. *Аморфные металлические сплавы* (Ред. Ф. Е. Люборский) (Москва: Metallurgiya: 1987).

REFERENCES

1. V. V. Maslov, V. K. Nosenko, L. E. Taranenko, and A. P. Brovko, *Fiz. Met. Metalloved.*, **91**: 47 (2001) (in Russian).
2. V. V. Nemoshkalenko, V. V. Maslov, and V. K. Nosenko, *Mater. Technol.*, **17**: 33 (2002).
3. V. V. Nemoshkalenko, V. V. Maslov, V. Z. Balan, V. K. Nosenko, N. S. Kosenko, and D. Yu. Paderno, *Sposob Nepreryvnogo Litiya Lenty (Method of Continuous Ribbon Casting)*, Patent No. 1304 Ukraine (MKI B 22 D, 11/06) (*Promyslova Vlasnist'*, No. 1: 1994) (in Russian).
4. M. O. Vasyliyev, V. V. Maslov, V. K. Nosenko, and G. G. Galstyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **32**, No. 3: 375 (2010) (in Russian).
5. *Pretsiionnye Splavy (Precision Alloys): Handbook* (Ed. B. V. Molotilov) (Moscow: Metallurgiya: 1983) (in Russian)
6. V. V. Maslov, V. I. Tkach, V. K. Nosenko, and S. G. Rassolov, *Fizika i Tekhnika Vysokikh Davleniy*, **20**: 62 (2010) (in Russian).
7. Yu. N. Starodubtsev, V. I. Keylin, and V. Ya. Belozеров, *Elektrotekhnika*, No. 8: 48 (1994) (in Russian).
8. Yu. N. Starodubtsev, V. I. Keylin, and V. Ya. Belozеров, *Elektrotekhnika*, No. 2: 22 (1995) (in Russian).
9. *Amorfnye Metallicheskiye Splavy (Amorphous Metallic Alloys)* (Ed. F. E. Luborsky) (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).