

УДК. 621.3+539.213:537.623

Т.П. Павленко, профессор, д-р техн. наук,

М.Н. Токарь, аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002

E-mail: khpavlenko@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Для повышения надежности срабатывания автоматического выключателя предлагается в магнитной системе расцепителя использовать аморфные сплавы. Результаты исследования этих сплавов показали возможность их широкого применения в электромагнитных системах электрических аппаратов.

Ключевые слова: магнитный материал, аморфный сплав, анизотропия, намагниченность, напряженность, электромагнит.

Введение. Производство магнитных материалов и их практическое применение в электромагнитных системах электрических аппаратов постоянно возрастает. Основными параметрами магнитных материалов являются индукция насыщения, магнитная проницаемость и коэрцитивная сила, при этом они зависят от структурного состояния магнитного материала и могут изменяться в тысячи раз [1].

Структура аморфных магнитных сплавов характеризуется отсутствием у них строгой периодичности расположения атомов, присущей кристаллическому строению металлов, а также ионов, молекул на протяжении сотен и тысяч периодов (параметров кристаллической решетки). Исследования различных физических свойств показали, что аморфные магнитомягкие материалы не имеют междоменных границ. Это обуславливает их высокую твердость, прочность, коррозионную стойкость. Расширение области смешиваемости их компонентов позволяет достичь большого разнообразия физических, в том числе механических и химических свойств.

В целом, в аморфных сплавах достигаются весьма высокие для магнитомягких материалов характеристики [2]:

- высокая прочность и твердость (до 1000 HV) вместе с высокой вязкостью и пластичностью, а также малым «эффектом формы»;
- высокие значения магнитной проницаемости (μ_n – до 8000; μ_{max} до 300000–700000);
- низкая коэрцитивная сила (H_c менее 8 А/м);
- достаточная магнитострикция насыщения, регулируемая в широком диапазоне значений;
- высокое удельное сопротивление ($\rho = 1 \dots 1,5$ Ом·мм²);
- низкий коэффициент температурной зависимости, малые потери на гистерезис и вихревые токи (в 3 ... 5 раз ниже кристаллических электротехнических сталей).

В настоящее время, для использования в электротехнических устройствах, интерес представляют аморфные магнитомягкие сплавы на основе железа. Немногочисленные исследования показали, что такие аморфные сплавы могут использоваться в магнитных системах электрических машин и аппаратов.

Цель исследований – определение возможности применения аморфных сплавов в конструкциях электромагнитных систем электрических аппаратов.

Анализ результатов исследований. Для определения области применения аморфных сплавов той или иной марки, необходимо изучить их свойства, параметры или характеристики. Как показали предварительные исследования в магнитном поле, в аморфных сплавах наводится анизотропия, которая может быть результатом образования в них локальной атомной структуры с преимущественной ориентацией. Кроме того, развитие анизотропии может быть также вследствие роста микроскопических зародышей, уже существующих в аморфном сплаве за счет образования при закалке (при получении ленты из расплава) ориентированных пар атомов [2, 3]. Чтобы определить возможности применения аморфных сплавов в магнитных системах электрических аппаратов были проведены исследования их намагниченности насыщения J_s и перпендикулярной анизотропии по трем осям (вдоль, поперек и перпендикулярно ленте) на нетермообработанных образцах ленты с помощью вращающегося анизометра на базе баллистического гальванометра и мощного магнита.

Для исследования свойств выбран образец ленты из аморфного сплава марки 7421. В исходном состоянии ленты индукция насыщения составляет $B_s = 1,2$ Тл; коэрцитивная сила $H_c = 8$ А/м, остаточная индукция B_r – до 0,65 Тл.

Образец из ленты аморфного сплава помещался в однородное магнитное поле, так что на него со стороны поля действовал вращающий момент. Магнитное поле в зазоре изменялось путем изменения

постоянного тока в катушках магнита. При измерениях образец с помощью рамки с током удерживался под некоторым постоянным углом ψ по отношению к внешнему полю напряженностью \bar{H} для определения вектора намагниченности \bar{J}_s (рисунок 1). Как показали результаты исследования, увеличение напряженности поля \bar{H} вызывает отклонение вектора намагниченности \bar{J}_s в сторону магнитного поля при изменении вращающего момента M_r , который компенсируется рамкой с током.

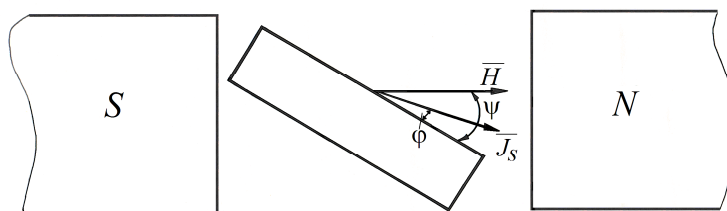


Рисунок 1 – Взаимное расположение векторов напряженности поля и намагниченности

Энергия одноосной анизотропии определяется как

$$E = K_1 \sin^2 \phi, \quad (1)$$

где K_1 – константа перпендикулярной анизотропии; ϕ – угол между вектором намагниченности \bar{J}_s и осью намагничивания.

Из условия равновесия системы (рамки с током и образца на подвесе) при приложенной напряженности магнитного поля H значение перпендикулярной анизотропии равно

$$\frac{H\psi}{M_r} = \frac{1}{J_s V} + \frac{H}{2(2\pi \cdot J_s^2 - K_1) \cdot V}, \quad (2)$$

где V – объем образца.

Результаты измерений для двух образцов размером $0,6 \times 0,3 \times 0,0025 \text{ см}^3$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений $\frac{H\psi}{M_r}$ при $\psi = 8,69 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ (5°)

Номер образца	Величина	Напряженность магнитного поля, А/см							
		1120	2240	3360	4400	5440	7360	9200	10480
1	$\frac{H\psi}{M_r}$	1,33	2,28	2,51	2,7	2,85	3,14	3,45	3,65
2	$\frac{H\psi}{M_r}$	1,84	2,18	2,4	2,58	2,73	3,0	3,31	3,5

Как видно из таблицы 1, полученные результаты имеют небольшое расхождение, которое объясняется приведенной погрешностью устройства.

Исходя из расчетов, по экспериментальным значениям было определено, что намагниченность насыщения составляет $J_s = 1272 \text{ Гс}$, а индукция насыщения равна $B_s = 4\pi \cdot J_s = 1,6 \text{ Тл}$.

Угол ϕ (между векторами приложенного магнитного поля и вектором намагниченности) рассчитывается по соотношению:

$$\phi = \frac{M_r}{V \cdot H \cdot J_s}. \quad (3)$$

Результаты исследований показали, что в поле напряженностью до 1200 А/см при практическом изменении угла ψ , равному $4^\circ 55'$ и 5° соответственно, между плоскостью образца и вектором напряженности поля \bar{H} перпендикулярная анизотропия практически отсутствует. При превышении напряженности поля величины 1200 А/см происходит незначительное отклонение вектора \bar{J}_s в сторону вектора напряженности \bar{H} , при этом происходит уменьшение угла ψ (примерно до 2°), что приводит к развитию анизотропии.

Для улучшения свойств аморфной ленты и повышения необходимых параметров была проведена термомангнитная обработка образцов при 400°C в продольном (по отношению к длине ленты) поле

напряженностью от 800 до 2000 А/м. Результаты исследований показали, что при изменении напряженности поля происходит заметное сужение петли гистерезиса, и, соответственно, увеличение ее прямоугольности. При этом значения необходимых параметров изменяются и достигают значений B_s – до 1,55 Тл, $H_c = 5$ А/м, $B_r = 1,0$ Тл. Удельные потери составляют $P_{1,45/400} = 1,2 \dots 1,5$ Вт/кг, что значительно меньше потерь в электротехнических сталях.

Магнитные свойства (коэрцитивную силу, поля насыщения и т.д.) сплава в продольном и поперечном направлении в плоскости ленты исследовались на нетермообработанных и термообработанных плоских образцах размером $2,5 \times 10$ мм². Исследования проводились с помощью индукционной установки (рисунок 2).

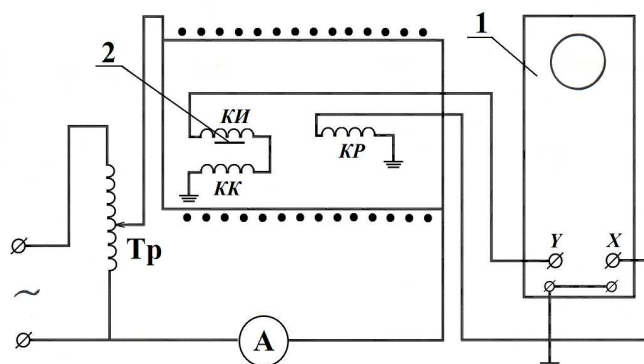


Рисунок 2 – Схема индукционной установки

Здесь показаны основные элементы индукционной установки: ферротестер, соленоид и датчик с катушками измерительной (КИ), компенсационной (КК) и регистрирующей (КР). Образец 2 находился в зазоре КИ и вместе с датчиком помещался внутри соленоида. Материал образца перемещался полем, создаваемым соленоидом, который подключался через автотрансформатор (Тр) к сети переменного тока (частота 50 Гц). При этом в катушке КИ переменным полем возбуждалась электродвижущая сила (ЭДС) индукции, равная

$$E_1' \sim \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} + 4\pi \cdot \frac{dJ_s}{dt}, \quad (5)$$

где Φ – магнитный поток; B – индукция; J_s – намагниченность образца.

Катушки КИ и КК включены встречно. Электродвижущие силы, наводимые в катушках, компенсируются, т.е. $E_1 = E_2 \sim \frac{dH}{dt}$.

Результирующий сигнал, пропорциональный скорости изменения намагниченности dJ_s/dt после интегрирования подавался на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. Таким же способом преобразованный сигнал КР, пропорциональный dH/dt , поступал на горизонтально отклоняющие пластины. На экране возникала петля гистерезиса. По изображению петли с помощью координатной сетки, нанесенной на экран, можно определить величину поля насыщения H_s и коэрцитивную силу H_c образца.

Величина поля насыщения, измеренная вдоль и поперек образцов, вырезанных из одного участка аморфной ленты, практически одинакова (таблица 2), что позволяет сделать вывод об изотропности ленты.

Таблица 2 – Магнитные характеристики плоских образцов аморфного сплава

Вид измерения	Состояние ленты			
	до термообработки		после термообработки	
	H_c , А/м	H_s , А/м	H_c , А/м	H_s , А/м
Вдоль проката ленты	40	3600 ... 4800	40	2240 ... 2600
Поперек проката ленты		3600 ... 4000		2000 ... 2240

Как видно из таблицы 2, после термообработки прямоугольность петли гистерезиса увеличивается, и соответственно, уменьшаются потери при перемагничивании.

Для определения возможности применения аморфных сплавов в электромагнитных системах электрических аппаратов были исследованы характеристики срабатывания электромагнитов расцепителей максимальной токовой защиты в автоматических выключателях. Для сравнения детали

магнитопроводов (рисунок 3 – якорь и сердечник) были выполнены из электротехнической стали 3412 и аморфного сплава (АС) марки 7421.

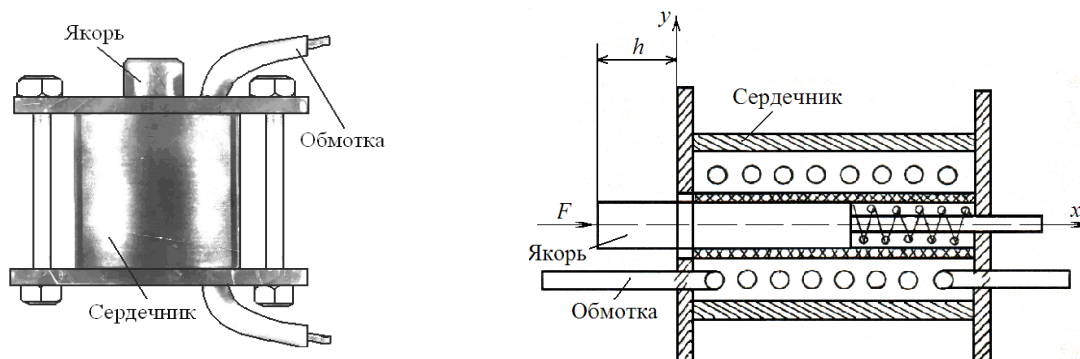


Рисунок 3 – Общий вид и структурная схема электромагнита расцепителя максимальной токовой защиты

Исследования проводились на установке, питание которой осуществлялось от конденсаторной батареи напряжением до 1000 В. По обмотке пропусклся однополярный импульс тока, близкий по форме к синусоиде с амплитудой до 4000 А.

При опытах на электронном осциллографе регистрировались кривые изменения тока и моменты замыкания и размыкания контактных датчиков, срабатывающих при трогании и остановке якоря электромагнита (рисунок 4). На этом рисунке точками обозначен разброс параметров при различных измерениях.

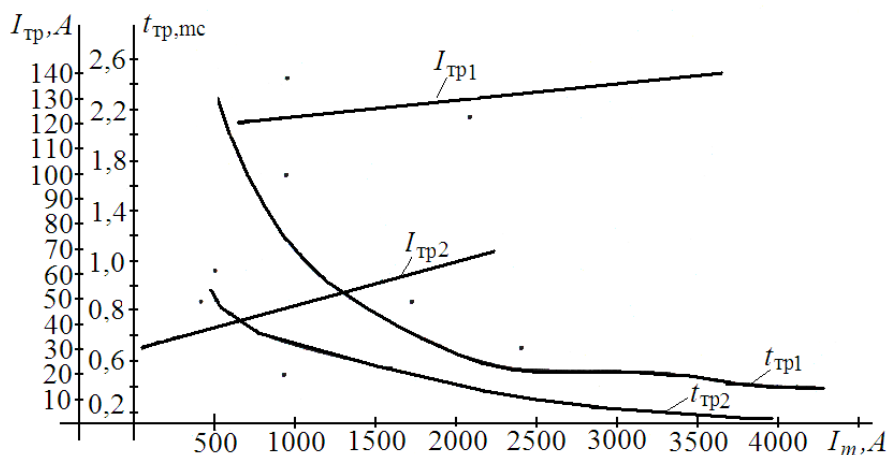


Рисунок 4 – Зависимость тока и времени срабатывания электромагнитов от амплитудного значения тока

Приведенные результаты исследования показали следующее:

- закон движения якоря исследуемых электромагнитов примерно одинаков;
- в среднем ток трогания $I_{тр1}$ якоря магнитопровода стали 3412 в 4 раза больше по сравнению с током трогания $I_{тр2}$ якоря магнитопровода из аморфного сплава ($I_{тр1} = 120$ А; $I_{тр2} = 30$ А соответственно), время трогания $t_{тр1}$ больше по сравнению с временем срабатывания $t_{тр2}$ электромагнитов.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что применение аморфных сплавов в конструкциях токовых электромагнитов максимальной токовой защиты расцепителей вместо традиционно применяемых материалов, позволит без увеличения габаритных размеров снизить его уставку по току срабатывания, или, сохранив уставку, выполнить электромагнит с меньшими габаритами и с меньшим количеством витков обмотки.

Выводы

1. Анализ магнитных свойств аморфного сплава марки 7421 показали возможность их применения в электромагнитных системах электрических аппаратов.

2. Впервые выполненные измерения перпендикулярной анизотропии показали намагниченность насыщения ленты при изменении магнитного поля определенной напряженности, что позволяет определить магнитную анизотропию, формирующую доменную структуру, от которой и зависят магнитные свойства аморфных сплавов. Отсутствие перпендикулярной анизотропии при напряженности поля до 1200 А/см говорит о том, что магнитные свойства аморфных сплавов при изменении напряженности поля не изменяются.

3. Проведенные исследования параметров срабатывания электромагнитов показали преимущества и возможность применения аморфных сплавов в конструкциях электромагнитных систем электрических аппаратов.

Библиографический список использованной литературы

1. Мишин Д.Д. Магнитные материалы / Д.Д. Мишин. — М.: Высш. шк., 1991. — 384 с.
2. Аморфные металлические сплавы / Ф.Е. Люборский [и др.]: пер. с англ. — М.: Metallurgia, 1987. — 584 с.
3. Кекало И.Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция / И.Б. Кекало. — М.: Высш. шк., 2006. — 340 с.

Поступила в редакцию 04.03.2013 г.

Павленко Т.П., Токар М.Н. Дослідження параметрів аморфних сплавів, призначених для електромагнітних систем електричних апаратів

Для підвищення надійності спрацювання розчеплювача максимального струмового захисту автоматичного вимикача пропонується в магнітній системі розчеплювача використовувати аморфні сплави. Отримані результати дослідження параметрів і аналіз властивостей аморфних сплавів показали можливість застосування таких сплавів в електромагнітних системах електричних апаратів.

Ключові слова: магнітний матеріал, аморфний сплав, анізотропія, намагніченість, напруженість, електромагніт.

Pavlenko T.P., Tokar M.N. To study parameters of amorphous alloys intended for electromagnetic systems of electrical appliances

To improve the reliability of the release trip overcurrent protection circuit breakers is available in a magnetic release system to use amorphous alloys instead of the traditionally used electrical steels. The obtained results of the study parameters and analysis of the properties of amorphous alloys have shown the possibility of using such alloys in electromagnetic systems of electric vehicles.

Keywords: magnetic materials, amorphous alloy, anisotropy, magnetization, tensions, the electromagnet.