

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АМОРФНОЙ СТАЛИ В МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Т.П.Павленко, профессор, д-р техн. наук, М.Н.Токар, аспирант
(НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,
e-mail khpavlenko@yandex.ru, тел.+380577076514)

В работе показаны исследования характеристик аморфной стали марки 7421 с целью определения их возможности применения в сердечниках магнитопроводов трансформаторов тока блока полупроводникового расцепителя автоматического выключателя серии ВА 50.

Ключевые слова: магнитопровод, аморфная сталь трансформатор тока

DEFINITION OF POSSIBILITY OF APPLICATION OF AMORPHOUS STEEL MAGNETIC SYSTEMS OF ELECTRICAL APPARATUS

T. Pavlenko, prof., dr. of tech. sc., M. Tokar, postgraduate student
NTU “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, Ukraine,
e-mail khpavlenko@yandex.ru, тел.+380577076514)

The work shows the research of characteristics of amorphous steel 7421 to determine their applicability in the cores magnetic wire of current transformers block semiconductor release of electrical switch wind series BA 50.

Key words: magnetic core, amorphous steel, current transformer.

Введение. Аморфные стали представляют собой магнитомягкие материалы, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов в пространстве, по сравнению с кристаллическими сталями, что применяются в настоящее время в магнитных системах электротехнических устройств (рис. 1).

Аморфные металлы стали известными, начиная с 60-х годов [1 – 4]. Но, к сожалению, об уникальности их свойств в сочетании не только дорогостоящих элементов, но и вполне широко используемых, таких как железо, германий, никель, алюминий, хром и других стали известны совсем недавно.

Популярность использования аморфных сталей в странах Западной Европы, США, а также в России объясняется их хорошими магнитными свойствами, высокой твердостью и пластичностью, а также непрерывной смешиваемостью различных компонентов в большом интервале концентраций. Это позволяет получать однородные образцы с составами, которые

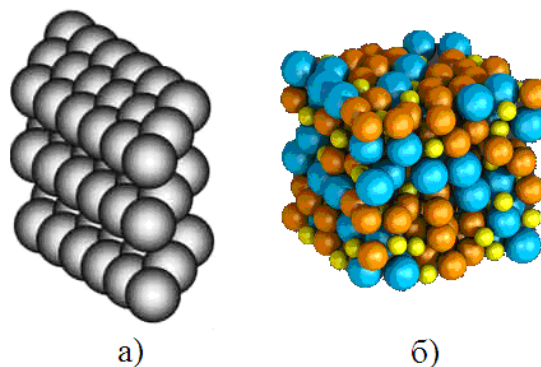


Рис.1. Модель структуры кристаллического (а) и аморфного (б) материала

невозможны для кристаллов из термодинамических соображений, т.к. в них образуется гетерогенная смесь различных фаз и структуры. Формирование аморфной структуры возможных металлов и легирующих составляющих приводит к фундаментальным изменениям магнитных, электрических, механических, сверхпроводящих и других свойств.

Широкое применение аморфных сталей также обусловлено низкими суммарными потерями, которые на порядок ниже, чем у кремнистых электротехнических сталей. Кроме того, отсутствие магнитокристаллической анизотропии в сочетании с высоким электросопротивлением, снижает потери на вихревые токи, в особенности на высоких частотах.

В настоящее время широко используются аморфные стали на основе металлов переходной группы, таких как Fe , Ni , Co в сочетании с металлоидами B , Si , C , которые способствуют быстрой аморфизации с последующим понижением температуры при изготовлении сплава.

Аморфная сталь выпускается в виде ленты (рис. 2) и используется для магнитопроводов устройств силовой электроники, дросселей, феррорезонансных стабилизаторов, трансформаторов и других электротехнических устройств, выполняющих определенные функции.

Существуют различные методы получения аморфных сплавов. В основе любого из них лежит расплав компонентов и быстрая их закалка с последующим охлаждением на поверхности цилиндров (валков), которые вращаются с большой скоростью.

Анализируя многочисленные научные статьи об уникальных свойствах аморфных сплавов и возможности их применения в магнитопроводах магнитных систем, необходимо отметить, что просматривается возможность их применения и в конструкциях магнитных систем электрических аппаратов.

Целью работы является исследование свойств аморфной стали и определение возможности ее применения в электромагнитных системах электрических аппаратов.

Анализ результатов исследования.

Современные сердечники магнитопроводов трансформаторов, которые применяются в конструкциях магнитных систем электрических аппаратов, изготавливаются из текстурированных электротехнических сталей, легированных кремнием. Такие стали являются магнитомягкими и обладают высокой магнитной индукцией насыщения, узкой, по сравнению с другими сталями, петлей гистерезиса. Однако форма петли гистерезиса не является прямоугольной, что приводит к повышенным погрешностям.

В соответствии с поставленной целью были проведены исследования ленты аморфной стали марки 7421 [5] в качестве материала магнитопроводов



Рис. 2 Лента аморфной стали

сердечников трансформаторов тока (ТТ) блока полупроводникового расцепителя автоматического выключателя. Данная сталь имеет достаточно высокие значения магнитной проницаемости, индукции насыщения, низкой коэрцитивной силы, а также прямоугольную петлю гистерезиса.

Блок полупроводникового расцепителя автоматического выключателя работает в схеме с импульсным стабилизатором напряжения. Трансформаторы тока в блоке выполняют функции датчиков тока и источников питания полупроводниковых релейных органов и импульсного питания отключающего электромагнита автоматического выключателя. Специфика работы трансформатора тока в такой схеме заключается в том, что перемагничивание его магнитопровода в зоне малых токов производится по смещенной частной петле гистерезиса (рис. 3). Это обусловлено несимметрией нагрузки ТТ по полупериодам тока в схемах блоков питания с импульсными стабилизаторами напряжения. Такому характеру перемагничивания соответствует форма тока вторичной обмотки трансформатора i_2 (рис. 4, в виде сплошной линии).

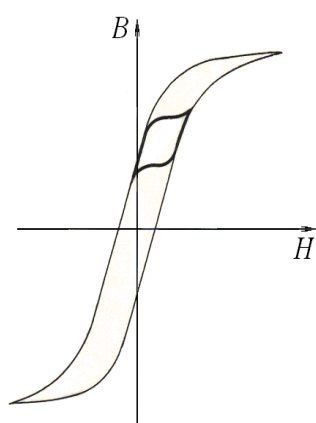


Рис. 3. Характеристика перемагничивания магнитопровода трансформатора тока (электротехническая сталь)

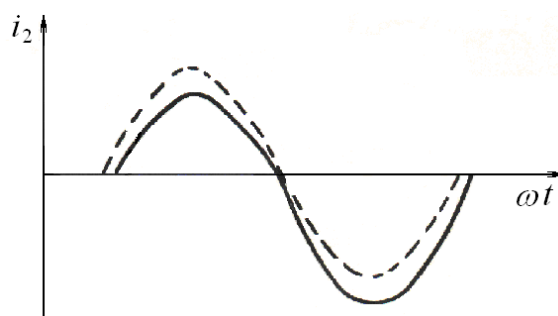


Рис. 4. Форма вторичной обмотки трансформатора тока (сплошная линия); идеальная форма тока вторичной обмотки трансформатора тока (пунктир).

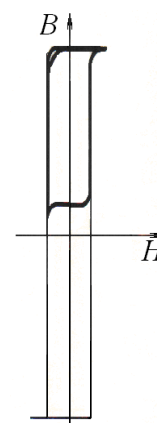


Рис. 5. Характеристика перемагничивания магнитопровода трансформатора тока из аморфного сплава.

Для сравнения на этом же рисунке приведена форма идеальной кривой тока вторичной обмотки трансформатора (пунктирная линия). Различие в форме двух кривых приводит к появлению существенных погрешностей устройств, выполняющих защитные функции.

Исследование (ТТ) блока полупроводникового расцепителя проводилось для автоматических выключателей серии ВА 50. Определение параметров проводилось в зонах малых и максимальных калибруемых кратностей тока. В данном случае испытывались образцы (ТТ) на номинальный ток 160 А, номинальный вторичный ток 1600 А, с площадью сечения магнитопровода 1 см².

Испытания ТТ проводились от стендов-имитаторов сигналов частоты 50 и 400 Гц, генерирующих относительно небольшие токи (20 А). Поэтому ТТ

выполняли с многовитковой первичной обмоткой, имеющей 160 витков, что позволило снизить приведенный номинальный первичный ток ТТ до 1 А.

В ходе испытаний исследовалась зависимость минимального значения величины первичного тока, а также определялась зависимость дополнительной погрешности ТТ, обусловленной наличием стабилизатора напряжения. Результаты исследований приведены в табл.1 – 4.

В табл.1. приведены значения тока включения стабилизатора напряжения при частоте тока 50 Гц в зависимости от величины тока нагрузки для испытуемого ТТ на основе аморфного сплава и шихтованного магнитопровода.

Таблица 1. Зависимость тока включения стабилизатора напряжения от тока нагрузки при частоте первичного тока 50 Гц

Магнитопровод ТТ	Номинальный ток нагрузки, мА					
	4	5	7	10	15	20
	Ток включения, А					
Аморфная сталь марки 7421	17	20	30	39	51	67
Шихтованный магнитопровод	21	25	31	40	50	67

Из приведенных данных табл. 1 видно, что значение токов включения ключевого стабилизатора у обеих схем для больших токов нагрузки близки, поскольку ток включения в основном определяется величиной тока нагрузки и слабо зависит от характеристик магнитопровода. При малых токах нагрузки ток включения у ТТ на основе аморфного сплава меньше, что объясняется влиянием тока намагничивания, который у ТТ из аморфного сплава меньше, чем у ТТ с шихтованным магнитопроводом.

В табл. 2 приведены данные погрешностей для ТТ с магнитопроводом из аморфного сплава и шихтованного магнитопровода при различных значениях токов нагрузки. Испытания проводились при напряжении сети $U_c = 40$ В.

Таблица 2 - Погрешности ТТ при различном токе нагрузки.

Ток включения и погрешность ТТ	Магнитопроводы трансформаторов тока						Ток нагрузки, мА
Магнитопровод из аморфного сплава 7421							
I, A	25	30	40	50	60	80	5
$\delta, \%$	1,2	<1	<1	<1	<1	<1	
I, A	40	50	60	70	80	100	10
$\delta, \%$	1,4	1	<1	<1	<1	<1	
I, A	50	60	70	80	90	100	15
$\delta, \%$	1,6	1,3	1	<1	<1	<1	
I, A	25	30	40	50	60	80	60
$\delta, \%$	3,0	3,0	2,7	2,5	2,0	1,8	
Магнитопровод из стали 3421 (шихтованный)							
I, A	40	50	60	70	80	100	10
$\delta, \%$	4,5	4,0	3,5	3,2	3,0	2,0	

I, A	50	60	70	80	90	100	15
$\delta, \%$	9,0	7,0	6,5	6,0	5,0	3,0	

Из табл. 2 видно, что ТТ на основе аморфного сплава дает существенный выигрыш в уменьшении погрешностей измерения первичного тока, особенно в области больших токов нагрузки.

В табл. 3 показана зависимость амплитуды напряжения от величины тока. Диапазон токов взят исходя из того, что в полупроводниковых расцепителях максимальная калибруемая кратность токов короткого замыкания равна $10I_n$.

Таблица 3. Зависимость напряжения U от отношения токов (сплав 7421).
(I – текущее значение тока, I_n – номинальное значение тока)

I/I_n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, B	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

Из табл. 3 следует, что в диапазоне кратностей токов $1 - 10I_n$ зависимость линейна.

В табл. 4 приведена зависимость токов включения ключевого стабилизатора напряжения от величины тока нагрузки для ТТ на основе аморфного сплава с нетермообработанным и термообработанным сердечником, а также для ТТ с шихтованным магнитопроводом соответственно. Испытания проводились при номинальном токе 160 А.

Таблица 4. Зависимость тока включения от величины тока нагрузки при частоте первичного тока 400 Гц

Значения токов включения, А	Номинальный ток нагрузки, мА						
	5	7	10	12	15	17	20
Магнитопровод из сплава 7421 до термообработки							
$I_{вкл1}$	24	30	42	50	56	70	80
$I_{вкл2}$	70	78	98	110	120	13	140
Магнитопровод из сплава 7421 после термообработки							
$I_{вкл1}$	38	44	50	53	56	68	91
$I_{вкл2}$	38	44	50	53	57	69	92
Магнитопровод шихтованный из стали 3421							
$I_{вкл1}$	30	38	46	53	60	68	75
$I_{вкл2}$	52	60	70	76	81	125	144

Из табл. 4 видно, что при работе ТТ от источника тока частотой 400 Гц при нагрузке на ключевой стабилизатор напряжения наблюдается зона токов, нижняя граница которой $I_{вкл1}$ характеризуется тем, что стабилизатор включается только в один из полупериодов тока, а при верхней границе токов $I_{вкл2}$ стабилизатор включается в работу в оба полупериода тока.

Указанный эффект объясняется тем, что при частоте 400 Гц сердечник магнитопровода получает малое приращение индукции, вследствие чего он перемагничивается вблизи зоны насыщения (рис. 5).

Такая асимметрия и ширина зоны насыщения существенно зависят от магнитных свойств материала магнитопровода. У магнитопроводов ТТ с термообработанным сердечником из аморфной стали ширина токовой зоны уже, чем у ТТ с шихтованным магнитопроводом и нетермообработанным сердечником на основе аморфного сплава.

Для устранения этой токовой зоны у ТТ с магнитопроводом из аморфного сплава необходимо несколько увеличить приращение индукции материала магнитопровода. Этого можно достичь уменьшением сечения магнитопровода. При этом зона работы ТТ с увеличенной погрешностью практически отсутствует. Минимальная величина сечения магнитопровода ТТ ограничена требованием обеспечения линейности ТТ во всем калибруемом диапазоне токов короткого замыкания.

Вывод. Исследования свойств и характеристик магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) блока полупроводникового расцепителя низковольтных автоматических выключателей, выполненных из аморфного сплава марки 7421, показали целесообразность его применения в ТТ, в особенности для работы в цепях с частотой тока 400 Гц. Повышение точности срабатывания полупроводникового расцепителя автоматического выключателя за счет использования в составе ТТ ленточных магнитопроводов из аморфного сплава с уменьшенным сечением по сравнению с ТТ, содержащими шихтованные магнитопроводы, оценивается приблизительно в 1,5 раза, несмотря на то, что перемагничивание сердечника ТТ осуществляется по частной петле гистерезиса (рис. 5).

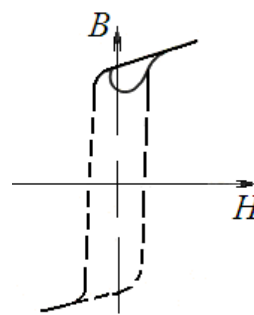


Рис. 5. Перемагничивание магнитопровода ТТ при частоте 400 Гц.

Список литературы

1. Кекало И.Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция. –М.: Высш.шк., 2006. –340с.
2. Золотухин И.В., Бармин Ю.В. Стабильность и процессы релаксации в металлических стеклах. М.: Металлургия, 1991. 158 с.
3. Аморфные металлы <http://tradio-ru.org/wiki>.
4. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы <http://www.mstator.ru/products/amorf>
5. Павленко Т.П., Токарь М.Н. Определение параметров аморфного сплава, предназначенного для электромагнитных систем электрических аппаратов.// Сб. науч. тр.: – ДонГТУ, Алчевск, 2013. – С.