

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Розглянуто та проаналізовано властивості аморфних сплавів з метою використання їх у магнітних системах електричних апаратів замість магнітом'яких електротехнічних сталей. Дослідження, що були проведені, показали можливість використання цих сплавів в конструкції магнітопроводу трансформатора струму імпульсного стабілізатора напруги напівпровідникового роз'єднувача автоматичного вимикача.

Рассмотрены и проанализированы свойства аморфных сплавов с целью использования их в магнитных системах электрических аппаратов вместо магнитомягких электротехнических сталей. Проведенные исследования показали возможность применения таких сплавов в конструкции магнитопровода трансформатора тока, который применяется в импульсном стабилизаторе напряжения полупроводникового расцепителя автоматического выключателя.

ВВЕДЕНИЕ

В магнитных системах электрических аппаратов в основном используются кристаллические электротехнические стали, обладающие высокой индукцией насыщения, низким значением коэрцитивной силы, малыми потерями при перемагничивании. В некоторых электрических аппаратах, например, таких как устройствах защитного отключения, применяются магнитомягкие материалы, такие как пермаллой, имеющие высокую магнитную проницаемость. К сожалению, свойства электротехнических сталей и пермаллоя в процессе работы электромагнитных систем могут изменяться в тысячи раз, т.к. они зависят от структурного состояния магнитного материала.

Производство новых магнитных материалов (сплавов) и их практическое применение в электромагнитных системах электрических аппаратов постоянно возрастает. Но, вместе с тем проявляются до сих пор недостаточно изученные многочисленные физические явления. Например, не до конца определен механизм намагничивания и перемагничивания магнитного материала, который обусловлен распределением спиновой плотности электронов, энергетической зонной структуры междоменных границ и его реальной кристаллической решеткой при расщеплении энергетических уровней внешним магнитным полем.

Но в то же время известно [1], что выше перечисленные явления определяются самопроизвольной намагниченностью, магнитокристаллической анизотропией и магнитострикцией, химическим составом металла, а также дефектной структурой кристаллической решетки, что в свою очередь влияет на изменение магнитной доменной структуры материала.

Известно, что кристаллические металлы и сплавы характеризуются строго закономерным периодически повторяющимся в трех измерениях расположением структурных составляющих, имеющих дальний порядок в расположении атомов, образующих кристаллическую решетку (рис. 1,а).

Особенностью аморфных сплавов является отсутствие у них дальнего порядка в расположении атомов. Структура аморфных магнитомягких сплавов характеризуется отсутствием у них в аморфном состоянии строгой периодичности, присущей кристаллическому строению в расположении атомов, ионов, молекул (рис. 1,б) на протяжении сотен и тысяч периодов (параметров кристаллической решетки) [2, 3].

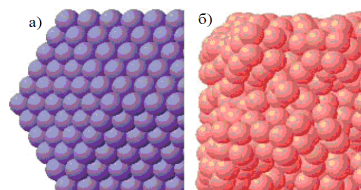


Рис. 1. Модели структуры дальнего и ближнего порядка расположения атомов: а) кристаллического сплава; б) аморфного сплава

Считается, что отсутствие дальнего порядка в расположении атомов в аморфном состоянии приводит к изотропии магнитных свойств [2, 3].

В реальном состоянии аморфные сплавы подвержены изменению магнитных свойств, которые зависят от различных режимов термообработки. Это значит, что аморфные сплавы обладают анизотропией структуры, которая после термомагнитной обработки снижается [3].

В свою очередь анизотропия структуры аморфных сплавов, а также остаточные напряжения определяют магнитную анизотропию, формирующую доменную структуру, от которой и зависят магнитные свойства аморфных сплавов. В частности, от соотношения различных магнитных доменов зависят максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , индукция насыщения B_s , коэрцитивная сила H_c , начальная магнитная проницаемость μ_0 .

Для получения сплава в аморфном состоянии его необходимо охладить ниже определенной температуры, называемой температурой стеклования. На процесс аморфизации сплава влияют легирующие элементы, входящие в его состав, которые замедляют процесс диффузии.

В настоящее время, для использования в электротехнических устройствах [4], интерес представляют аморфные магнитомягкие сплавы. Наибольшее распространение получили аморфные сплавы на основе металлов переходной группы железа – никель – кобальт ($Fe; Ni; Co$), взаимодействующие с металлоидами бор – кремний – углерод ($B; Si; C$), которые понижают температуру плавления и обеспечивают более легкое достижение температуры стеклования аморфного сплава при его охлаждении. В результате исчезают междоменные границы, что приводит к высокой твердости, прочности и коррозионной стойкости таких материалов.

Одним из важнейших преимуществ аморфных сплавов, по сравнению с кристаллическими составами металлов, является непрерывная смешиваемость различных их компонентов в большом интервале концентраций. Это позволяет получать однородные составы магнитного материала, которые невозможно получить для кристаллических металлов, т.к. в кристаллах образуется гетерогенная смесь фаз различного состава и структуры.

Расширение области смешиваемости компонентов аморфных сплавов позволяет достичь большого разнообразия физических, в том числе механических и химических свойств.

В результате многочисленных исследований [1-3], получены аморфные сплавы различных марок, обладающие:

- высокой прочностью и твердостью (до 1000 HV);
- высокой магнитной проницаемостью;
- низкой коэрцитивной силой (H_c менее 8 А/м);
- достаточной магнитоотрицательной насыщения, регулируемой в широком диапазоне значений;
- высоким удельным сопротивлением;
- низким коэффициентом температурной зависимости,
- малыми потерями на гистерезис и вихревые токи.

Кроме того, аморфные сплавы имеют прямоугольную петлю гистерезиса и выпускается в виде ленты толщиной ~25-35 мкм (рис. 2).

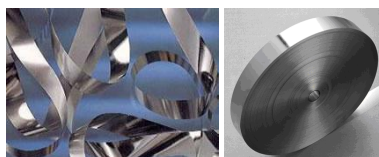


Рис. 2. Лента аморфного сплава

Таким образом, благодаря своим уникальным магнитным свойствам аморфные сплавы все больше находят свое применение в различных электротехнических устройствах. Целью работы является определение целесообразности применения аморфных сплавов в электромагнитных системах электрических аппаратов исходя из исследований их свойств. Разработанные методы исследований, позволяют определить:

- степень намагниченности и константу перпендикулярной анизотропии;
- удельные потери и индукцию насыщения при различной напряженности магнитного поля;
- магнитные характеристики аморфных сплавов при анизотропии свойств в поперечном, продольном направлениях ленты;
- физико-химические, механические и технологические свойства ленты из аморфного сплава и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения намагниченности, индукции насыщения, остаточной индукции, константы перпендикулярной анизотропии вдоль и поперек проката аморфной ленты использовался сплав марки 7421. Исследования проводились как в исходном состоянии аморфной ленты, так и после термомагнитной обработки при температуре 400 °С в продольном (по от-

ношению к длине ленты) и поперечном полях напряженностью от 800 до 2000 А/м с воздушным охлаждением образцов (по нестандартным методикам).

Магнитная индукция образцов аморфной ленты марки 7421 определялась методом вибрационного магнитометра с применением эталонного образца. Форма петли гистерезиса аморфной ленты той же марки определялась с помощью гистерезисграфа и ферротестера со специальными датчиками, а также баллистическим методом в квазистатических полях напряженностью 0,25-2500 А/м.

Для более точного определения коэрцитивной силы, остаточной индукции и коэффициента прямоугольности петли гистерезиса проведены исследования аморфной ленты во взаимно перпендикулярных направлениях на не термообработанных и термообработанных плоских образцах размером 2,5×10 мм в открытой цепи с помощью индукционной установки (рис. 3).

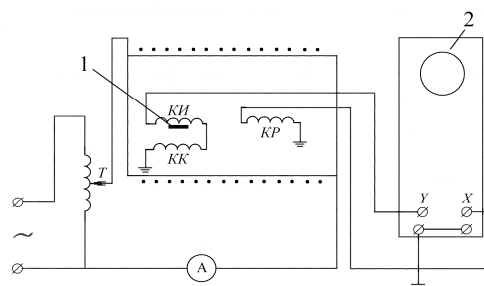


Рис. 3. Схема индукционной установки

Основными элементами индукционной установки являются: ферротестер, соленоид и датчик с катушками – измерительной (KI), компенсационной (KK) и регистрирующей (KP). Образец 1 ленты аморфного сплава находился в зазоре KI и вместе с датчиком помещался внутри соленоида. Перемагничивание материала образца осуществлялось полем, создаваемым соленоидом, который подключался через автотрансформатор (T) к сети переменного тока. При нахождении образца ленты в KI возбуждалась э.д.с. индукции:

$$E \sim \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} + 4\pi \cdot \frac{dJ_s}{dt},$$

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

Результирующий сигнал, пропорциональный скорости изменения намагниченности dJ_s/dt после интегрирования подавался на вертикально отклоняющие пластины осциллографа 2. Таким же способом преобразованный сигнал от катушки KP, пропорциональный dH/dt , поступал на горизонтально отклоняющие пластины того же осциллографа. На экране возникла петля гистерезиса. По изображению петли, с помощью координатной сетки, нанесенной на экран определялась величина поля насыщения H_s и коэрцитивная сила H_c образца аморфной ленты.

Результаты приведенных исследований показали, что величина поля насыщения, измеренная вдоль и поперек проката образцов магнитной ленты аморфного сплава, практически одинакова, что позволяет сделать вывод об изотропности ленты аморфного сплава.

Существенное влияние на изменение коэрцитив-

ной силы и индукции (насыщения, остаточную) оказывает термомагнитная обработка магнитопровода из аморфного сплава. Результаты исследований образцов показали, что коэрцитивная сила уменьшилась более чем в два раза и составляет менее 5 А/м. Кроме того, уменьшается поле насыщения до 930 А/м, при котором достигается индукция насыщения сплава $B_s = 1,55$ Тл и, соответственно, возрастает прямоугльность петли гистерезиса до 63 % по сравнению с 45 % до термообработки магнитопровода.

Исследования магнитопроводов из аморфного сплава марки 7421 и электротехнической стали марки 3421 в трансформаторах тока полупроводникового расцепителя автоматического выключателя показали, что перемагничивание материала магнитопровода из электротехнической стали в зоне малых токов происходит по смещенной частной петле гистерезиса (рис. 4,а), что обусловлено несимметрией нагрузки трансформатора по полупериодам тока. В результате увеличивается погрешность тока и происходит неточное срабатывание устройства.

Результаты исследования магнитопроводов трансформаторов из аморфного сплава показали, что прямоугльность петли гистерезиса и малые потери на перемагничивание, могут существенно уменьшить погрешности тока, несмотря на то, что и здесь перемагничивание сердечника трансформатора тока осуществляется по частной петле гистерезиса (рис. 4,б).

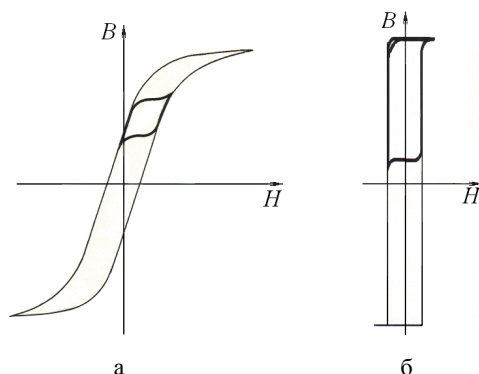


Рис. 4. Характеристики перемагничивания магнитопроводов трансформаторов тока: а) электротехническая сталь; б) аморфный сплав

Дальнейшие исследования аморфных сплавов, согласно приведенным методам, и изучения их свойств продолжаются. Результаты исследований будут отражены в последующих публикациях.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ свойств аморфных сплавов показал возможность применения их в электромагнитных системах электрических аппаратах.

2. Разработаны методы исследования свойств аморфных сплавов, определяющие основные параметры такие как намагниченность, индукция насыщения, остаточная индукция, константа перпендикулярной анизотропии вдоль и поперек проката аморфной ленты. Перечисленные параметры определяют свойства материала магнитопровода.

3. В результате проведенных экспериментов было определено, что на прямоугльность петли и повышения индукции насыщения влияет термомагнитная обработка магнитопроводов.

4. Дальнейшее изучение свойств аморфных сплавов дает возможность определения их применения не только в электромагнитных системах электрических аппаратов, но и в электромагнитных системах электрических машин мощностью до 1 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.; ил.
2. Аморфные металлические сплавы / Под ред. Люборского Ф.Е.: Пер. с англ. – М.: Metallurgiya, 1987. – 584 с.
3. Кекало И.Б. Атомная структура аморфных сплавов и ее эволюция. – М.: Высш.шк., 2006. – 340 с.
4. Павленко Т.П. Применение аморфных сплавов в устройствах защитного отключения. // Сб. научн. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. – Алчевск: Дон ГТУ. – 2008. – Вып. 26. – С. 343-347.

Bibliography (transliterated): 1. Mishin D.D. Magnitnye materialy. – M.: Vyssh. shk., 1991. – 384 s.; il. 2. Amorfnye metallicheskie splavy / Pod red. Lyuborskogo F.E.: Per. s angl. – M.: Metallurgiya, 1987. – 584 s. 3. Kekalo I.B. Atomnaya struktura amorfnyh splavov i ee `evolyuciya. – M.: Vyssh.shk., 2006. – 340 s. 4. Pavlenko T.P. Primenenie amorfnyh splavov v ustrojstvah zaschitnogo otklyucheniya. // Sb. nauchn. tr. Donbasskogo gosud. tehn. un-ta. – Alchevsk: Don GTU. – 2008. – Vyp. 26. – S. 343-347.

Поступила 29.03.2013

Павленко Тетяна Павлівна., д.т.н., проф.

Токар Максим Миколайович

Національний технічний університет

"Харківський політехнічний інститут"

кафедра електричних машин

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

тел. (044) 7076844, e-mail: khpavlenko@yandex.ru

Pavlenko T.P., Tokar M.N.

Analysis and study of amorphous alloys properties.

The paper reviews and analyzes properties of amorphous alloys for the purpose of their application in magnetic systems of electrical apparatus instead of high-permeability electric steels. The studies have shown a possibility of utilizing these alloys in the magnetic structure of a current transformer in the pulsed voltage stabilizer of an automated circuit-breaker semiconductor release.

Key words – amorphous alloys, magnetic properties, anisotropy, magnetic circuit, current transformer.