

УДК 620.424.1

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ
В МАГНИТОПРОВОДАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ****Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушчак В.С., Копейкина Т.В.***ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Камышин, e-mail: kopeikina.tania@yandex.ru*

В статье представлена целесообразность применения трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов, по сравнению с трансформаторами с традиционными магнитопроводами из электротехнических сталей. Рассмотрены схемы устройств для получения аморфных сплавов закалкой из жидкого состояния. Приведены сведения о сравнении усредненных потерь холостого хода для силовых трансформаторов с магнитопроводом из трансформаторной стали и с магнитопроводом из аморфного сплава. Распределительные трансформаторы мощностью 25 – 630 кВА напряжением 6 – 10 кВ – наиболее массовая серия производимых и эксплуатируемых трансформаторов в нашей стране и за рубежом. Общее количество распределительных трансформаторов в России составляет более 4 млн. шт. Ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 900 миллиардов кВт·ч, при этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 7,5 миллиардов кВт·ч и примерно 50 % – это потери в магнитопроводах. Наиболее перспективный путь снижения затрат на производство и эксплуатацию распределительных трансформаторов – это применение магнитопроводов из аморфных (нанокристаллических) сплавов, при этом обеспечивается более чем пятикратное снижение потерь холостого хода трансформаторов по сравнению с традиционными магнитопроводами из электротехнической стали.

Ключевые слова: аморфный сплав, магнитопровод, трансформатор, электротехническая сталь, энергоэффективность

**MODERN TRENDS IN THE APPLICATION OF AMORPHOUS ALLOYS
IN THE MAGNETIC CORES OF POWER TRANSFORMERS****Khavronichev S.V., Sozinov A.G., Galushchak V.S., Kopeikina T.V.***FGBOU VPO «Volgograd State Technical University» Kamyshin institute of technology (branch)
of FGBOU VPO «Volgograd State Technical University», Kamyshin, e-mail: kopeikina.tania@yandex.ru*

In the article the expediency of application of transformers with magnetic cores made of amorphous alloys in comparison with transformers with conventional magnetic cores of electrical steel. The schemes of devices for producing amorphous alloys by quenching from the liquid state. Provides information about the comparison of the average no-load losses for power transformers with magnetic core of transformer steel and a magnetic core made of amorphous alloy. Distribution transformers with power 25 – 630 kVA, voltage 6 – 10 kV – the most mass produced series of transformers and exploited in our country and abroad. The total number of distribution transformers in Russia is over 4 million PCs. The annual consumption of electricity in Russia is at the level of 900 billion kW·h, the total energy losses in distribution transformers are estimated at 7.5 billion kW·h and about 50 % are losses in magnetic cores. The most promising way of reducing the cost production and operation of distribution transformers is the use of magnetic cores made of amorphous (nanocrystalline) alloys, this provides a more than fivefold reduction of losses of idling of transformers compared with traditional magnetic circuits of electrical steel.

Keywords: amorphous alloy, magnetic core, transformer, electrical steel, energy efficiency

В последнее время приняты важные государственные документы, касающиеся энергосбережения. Это, во-первых, Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», предусматривающий введение нормативов энергоэффективности оборудования мощностью свыше 3 кВт для установления стимулирования применения энергоэффективного электрооборудования. И, во-вторых, Распоряжение Правительства РФ от 1 декабря 2009 г. № 1830-р «План мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации». В указанном плане правительству РФ дано указание на

формирование предложений по ограничению (запрету) оборота энергетических устройств, характеризующегося неэффективным использованием энергоресурсов. Одно из таких предложений – замена распределительных трансформаторов с магнитопроводами из электротехнической стали на энергоэффективные трансформаторы.

**Аморфные сплавы в магнитопроводах
силовых трансформаторов**

Аморфный сплав – это определенный вид прецизионного сплава. Его отличительной характеристикой от сплавов кристаллической структуры, является целый комплекс физических и химических свойств. Одним из основных отличий аморфного сплава от электротехнической стали – отсутствие пе-

риодичности в расположении атомов. А так же эти сплавы отличаются от кристаллических сплавов большей устойчивостью к коррозии, они прочнее в несколько раз и обладают лучшей электромагнитной характеристикой [1].

В настоящее время, для использования в электротехнических устройствах наибольшее распространение получили аморфные сплавы на основе металлов переходной группы железо – 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.

Аморфное состояние достигается подбором химического состава сплава и использованием специальной технологии сверхбыстрого охлаждения со скоростью выше критической, для чего исходный расплав выливается на быстро вращающийся диск (рис. 1). При попадании на поверхность диска расплав охлаждается со скоростью около 10^6 К/с и превращается в ленту толщиной от 15 до 60 мкм, имеющей аморфную структуру, аналогичную структуре стекла. Лента навивается в кольцевые, U-образные сердечники или формируется в виде стержней. Технология наливки позволяет получать сердечники с диаметром от нескольких миллиметров до 500 мм.

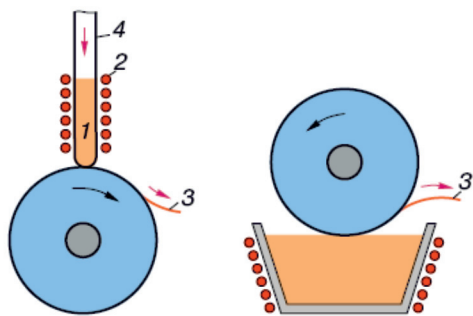


Рис. 1. Схемы устройств для получения аморфных сплавов закалкой из жидкого состояния: а – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр; б – извлечение расплава вращающимся диском; 1 – расплав; 2 – нагревательное устройство (индукционная печь); 3 – лента аморфного сплава; кварцевая трубка

Придание материалам специфических свойств (например, петля гистерезиса определенной формы) достигается термо- или

термомагнитной обработкой (ТМО), в результате которой структура ленты может остаться аморфной, стать частично кристаллизованной или нанокристаллической.

На рис. 2 в качестве примера представлены петли гистерезиса аморфного сплава АМЕТ-2НСР типа Т (с линейной петлей гистерезиса) [2].

Особенностью нанокристаллических сплавов является их сверхмелкокристаллическая структура. Размер кристаллов (наночастицы) в этих сплавах составляет от 1 до 10 нм. Нанокристаллические и аморфные сплавы по своим свойствам во многом похожи. Во – первых, они имеют структурное сходство. Как известно, структура аморфных сплавов имеет ближний порядок, т.е. состоит из упорядоченных микрогруппировок атомов, размеры которых близки к размерам нанозёрен нанокристаллических сплавов. Во – вторых, это технология получения. В настоящее время наиболее распространённым методом получения наноструктуры является регулируемая кристаллизация из исходного аморфного состояния. Таким образом, «материнской» основой нанокристаллического сплава является сплав аморфный. Структура нанокристаллического сплава представляет собой двухфазную систему, одной из фаз которой являются нанокристаллы, а другой – остаточная аморфная матрица.

Нагрузочные потери в трансформаторах в зависимости от увеличения нагрузок вариативны, в то время как потери холостого хода имеют постоянную величину. Ключ к решению проблемы потери энергии – снижение потерь холостого хода [3].

Для снижения потерь холостого хода в магнитопроводах силовых трансформаторов применяют сложенную в пятеро ленту из аморфного сплава типа $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$.

По данным американской компании Metglas потери за год в силовых трансформаторах распределительных сетей, в которых используется магнитопровод из электротехнической стали, составляют около 8% их закупочной стоимости. В таблице приведены усредненные потери холостого хода для силовых трансформаторов на номинальное напряжение 10 кВ и мощностью от 25 до 2500 кВА [4].

Как видно из таблицы, использование в магнитопроводах аморфных материалов, вместо традиционной трансформаторной стали позволяет сократить потери холостого хода в 4-5 раз. Энергоэффективные распределительные трансформаторы с магнитопроводами из нанокристаллических материалов, по данным энергетических компаний США и Японии, окупаются у покупателя примерно за три года [5].

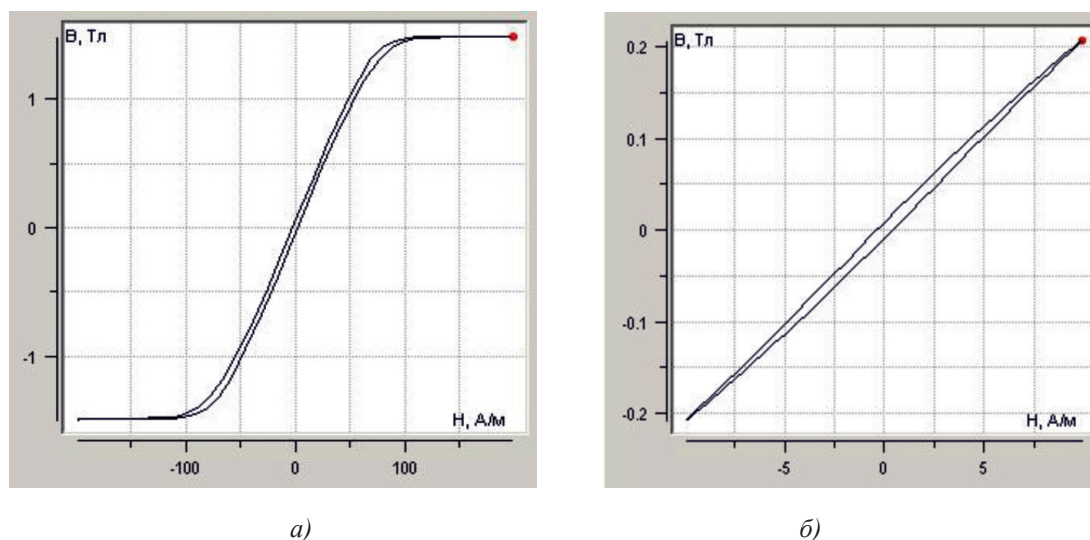


Рис. 2. Петли гистерезиса сплава 2HCP (тип T). а – предельная петля;
б – частная петля при индукции 0,2 Тл

Усредненные потери холостого хода для силовых трансформаторов

Мощность трех- фазного трансфор- матора 10 кВ	Усредненные потери ХХ, магнитопровод – трансфор- маторная сталь SiFe	Усредненные потери ХХ, магнитопровод – аморф- ный сплав	Сравнительное сниже- ние потерь, %
25 кВА	100	28	72%
40 кВА	140	39	72%
63 кВА	180	50	72%
100 кВА	260	66	75%
250 кВА	520	150	71%
630 кВА	1000	280	77%
1000 кВА	1700	350	80%
1600 кВА	2100	490	77%
2500 кВА	2700	550	80%

Кроме снижения потерь в магнитопроводе из нанокристаллических сплавов также уменьшается значение тока намагничивания. В результате при снижении потерь холостого хода и снижении тока намагничивания в трансформаторах:

- 1) снижается температура трансформатора и увеличивается его срок службы;
- 2) в несколько раз снижаются затраты при передаче электроэнергии потребителю;
- 3) имеет место общее сокращение энергопотребления в энергетике страны; и как результат общее существенное снижение объема сжигания органического топлива для выработки электроэнергии и вредных выбросов в атмосферу.

За рубежом первые распределительные трансформаторы мощностью 630 – 1000 кВА с аморфным сердечником были изготовлены более 10 лет назад. В данном направлении более всех продвинулись

США, Китай и Индия. Начиная с 2009 года, ряд европейских распределительных компаний также установили в опытную эксплуатацию несколько трансформаторов мощностью 400 кВА с сердечником из аморфной ленты. В 2012 году первой в России к выпуску силовых трансформаторов с аморфными сердечниками АТМГ приступила группа «Трансформер» (рис. 3) [6].

Организация выпуска трансформаторов АТМГ на российском предприятии полностью соответствует плану мероприятий по импортозамещению в отрасли энергетического машиностроения, кабельной и электротехнической промышленности Российской Федерации, утвержденному приказом Минпромторга России от 31 марта 2015 г. № 653. Согласно этому плану максимальная плановая доля импорта трансформаторов на напряжение 6–35 кВ к 2020 г. должна составить 0% (в 2014 г. – 15%).



а)



б)

Рис. 3. Трансформатор АТМГ ПГ «Трансформер». а – внешний вид; б – магнитопровод с катушками

Выводы

1. Произведенный анализ показал, что трансформаторы с магнитопроводами из аморфных сплавов, более энергоэффективны, чем трансформаторы с традиционными магнитопроводами из электротехнических сталей.

2. Необходимо наращивать производство аморфных сплавов и осуществлять постепенный переход на применение их в магнитопроводах современных трансформаторов различного назначения.

3. Дальнейшее изучение свойств аморфных сплавов позволит определить целесообразность их применения не только в статических электромагнитных аппаратах, но и в электромагнитных системах электрических машин.

Список литературы

1. Аморфные сплавы и экономия // Энергетика, оборудование, документация // URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html>.

2. В.И. Печенкин, к.т.н., руководитель НИОКР группы «Трансформер» // «Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем» // Рекламно-информационный журнал «Электротехнический рынок» № 5–6 (47–48) Сентябрь–Декабрь 2012; URL: <http://market.elec.ru/nomer/44/silovye-amorfnye-transformatory-budushee-v-nastoya/>

3. Каталог продукции Открытого акционерного общества «Ашинский металлургический завод» // Магнитопроводы из аморфных сплавов // URL: <http://www.amet.ru/buyers/product/amorf>.

4. Компании Metglas Inc.(США), HEINRICH GEORG GmbH MASCHINENFABRIK (Германия), ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина «Энергосберегающие трансформаторы с магнитопроводами из аморфных сплавов» // материал VI Международной конференции ТРАВЭК «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности», Москва, 17–18 марта 2010 года. URL: <http://ukrm.ru/content/view>.

5. Трансформаторы с аморфным магнитопроводом // Энергетика, оборудование, документация // URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/transformatory-s-amorfny-magnitoprovodom.html>.

6. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов. Публикация Европейского института меди. Проект № STR -1678-98-BE. Энергосбережение № 6/2003. URL: http://tgk.khstu.ru/lib/artic/energy/2003/6/5/6_5.html.