

Мехдили Адиль Абдулазим,
Директор предприятия, Транс -Т.С. ООО
Mehdili Adil Abdulazim,
Director, Trans-T.S. LLC

Сафиев Эльшад Сулейман,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности
Safiyev Elshad Suleyman,
Associate Professor of the Department of Electromechanics,
Azerbaijan State University of Oil and Industry

**ПРЕИМУЩЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРОВ
С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОГО СПЛАВА
ADVANTAGES OF AMORPHOUS ALLOY CORE TRANSFORMERS**

Аннотация. Экономия электроэнергии – важное направление развития современных электрических сетей и систем электроснабжения. Одним из способов экономии электроэнергии является снижение потерь энергии в сетях. Важным методом снижения потерь является применение инновационного электротехнического оборудования, в том числе распределительных трансформаторов с сердечниками из аморфной стали. 25-30% технических потерь в энергосистемах приходится на распределительные трансформаторы. Полностью исключить их невозможно. Часть энергии уходит на нагрев проводов (потери короткого замыкания), другая часть – на намагничивание (потери холостого хода). В течение суток, а также в разное время года, потери холостого хода в 2-4 раза превышают потери короткого замыкания. Следует также учитывать, что трансформатор работает непрерывно, и потери холостого хода присутствуют постоянно. В статье представлен обширный материал об аморфных магнитных материалах, проанализирован процесс их производства. Показана экономическая выгода от применения аморфных металлов в качестве сердечников трансформаторов. Также отражены технологические трудности, возникающие при использовании этого материала в производстве трансформаторов. Отмечено, что для улучшения магнитных свойств в состав аморфного металла вводят добавки, в том числе нанодобавки. Показана экологическая значимость производства таких трансформаторов.

Abstract. Electric power saving is an important area of development of modern electrical networks and power supply systems. One of the ways to save electricity is to reduce energy losses in networks. One of the important methods for reducing losses is the use of innovative electrical equipment, including distribution transformers with amorphous steel cores. 25-30% of technical losses in power systems are accounted for by distribution transformers. It is impossible to completely eliminate them. Part of the energy is spent on heating the wires (short-circuit losses), the other part – on magnetization (no-load losses). During the day, as well as at different times of the year, no-load losses are 2-4 times higher than short-circuit losses. It should also be taken into account that the transformer operates continuously, and no-load losses are present constantly. The article presents extensive material on amorphous magnetic materials and analyzes their production process. The economic benefit of using amorphous metals as transformer cores is shown. The technological difficulties that arise when using this material in the production of transformers are also reflected. It is noted that additives, including nano-additives, are introduced into the composition of the amorphous metal to improve magnetic properties. The environmental significance of the production of such transformers is shown.



Ключевые слова: Аморфный металл, быстрое охлаждение, кристаллическая структура, сердечник трансформатора, режим холостого хода, потери энергии.

Keywords: Amorphous metal, rapid cooling, crystalline structure, transformer core, idle mode mode, energy losses.

Аморфные металлы (также называемые металлическими стеклами) – относящиеся к классу уникальных материалов, характеризуются нерегулярной атомной структурой. В отличие от металлов с кристаллической структурой, в которой расположены правильные, повторяющиеся атомы, аморфные металлы не имеют никакого порядка (рис. 1), что обуславливает их различные свойства. Отсутствие кристалличности приводит к высокой прочности, эластичности и коррозионной стойкости, что отвечает современным требованиям к применению аморфных металлов в различных областях.

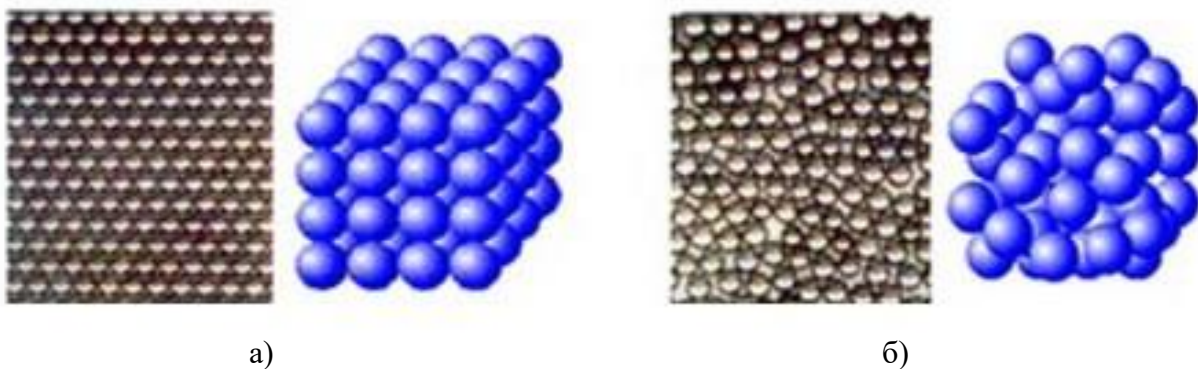


Рисунок 1. Металл с кристаллической структурой (а) и металл с аморфной структурой (б)

Аморфный металл был впервые обнаружен в 1960 году в Калифорнийском университете в сплаве золота и кремния. В 1974 году компания AlliedSignal разработала аморфный сплав на основе железа, и в том же году компания General Electric обнаружила, что он обладает очень низкими удельными потерями (удельные потери на частотах 1,5-60 Гц составляли 0,44 Вт/кг). С тех пор трансформаторная промышленность сосредоточилась на использовании аморфных сплавов в качестве материалов для магнитных сердечников распределительных трансформаторов. Аморфные сплавы являются предметом обширных исследований в материаловедении с 1980-х годов. Аморфные металлы обычно получают путем быстрого охлаждения расплавленного металла, что не позволяет упорядоченно расположить атомы. Наиболее распространенные методы:

– *Формирование сплава*: расплавленный металл заливают на вращающийся диск (барабан) (рис. 2). При соприкосновении с поверхностью диска сплав охлаждается со скоростью около 10^6 К/с и превращается в ленту толщиной 15-60 мкм, имеющую аморфную (стекловидную) структуру. Лента наматывается на U-образные сердечники и формируется в ленту. Технология намотки позволяет получать сердечники диаметром от нескольких миллиметров до 500 мм. Этот метод широко используется для получения магнитопроводящих лент из аморфных металлов для трансформаторов и другого электрооборудования.



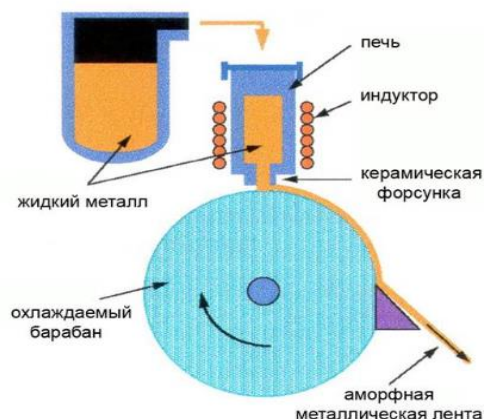


Рисунок 2. Схема установки для получения аморфных сплавов

– *Распыление*: капля расплавленного металла быстро охлаждается между двумя холодными поверхностями, в результате чего образуется тонкий плоский диск из аморфного металла. Этот метод используется в лабораторном анализе материалов и мелкосерийном производстве.

– *Физическое осаждение из паровой фазы*: атомы металла осаждаются на подложку в вакуумной среде, что позволяет контролируемо формировать аморфные слои. Этот метод широко используется в электронной промышленности для получения тонких пленок со специфическими магнитными или оптическими свойствами.

Аморфные металлы обладают уникальными свойствами, включая высокую прочность, пластичность и коррозионную стойкость.

– *Высокая механическая прочность*: аморфные металлы часто имеют более высокую трещиностойкость, чем их кристаллические аналоги, из-за отсутствия границ зерен. Например, трещиностойкость металлического сплава Vitreloy 1 составляет 1,9 ГПа, что значительно выше, чем у обычной стали.

– *Упругость*: эти металлы имеют большую деформацию (1,5%-2,5%), чем кристаллические металлы (0,2%), обладают высокой пластичностью (вязкостью) при сжатии и изгибе.

– *Коррозионная стойкость*: отсутствие границ зерен и однородная структура обеспечивают высокую коррозионную стойкость. Например, металлические стекла на основе циркония обладают высокой коррозионной стойкостью в соленой среде, что делает их идеальными для использования в морской среде.

– *Магнитные свойства*: некоторые аморфные металлы обладают мягкими магнитными свойствами, что делает их очень подходящими для использования в сердечниках трансформаторов. Например, аморфные сплавы на основе железа имеют гораздо меньшую коэрцитивную силу и потери в сердечнике, чем кристаллическое железо, и их использование значительно повышает энергоэффективность трансформаторов.

Придание материалам особых свойств (например, получение петли гистерезиса определенной формы) достигается термической или термомагнитной обработкой (ТМО), в результате которой структура ленты может оставаться аморфной, частично кристаллизоваться или стать нанокристаллической. Структура аморфного сплава, отличающаяся от кремниевой стали, приводит к его высокой магнитной проницаемости, хорошей намагниченности и размагничиванию этого материала.



В качестве примера на рис.3 показаны петли гистерезиса аморфного сплава Т-типа 1ГЦП (с линейной петлей гистерезиса).

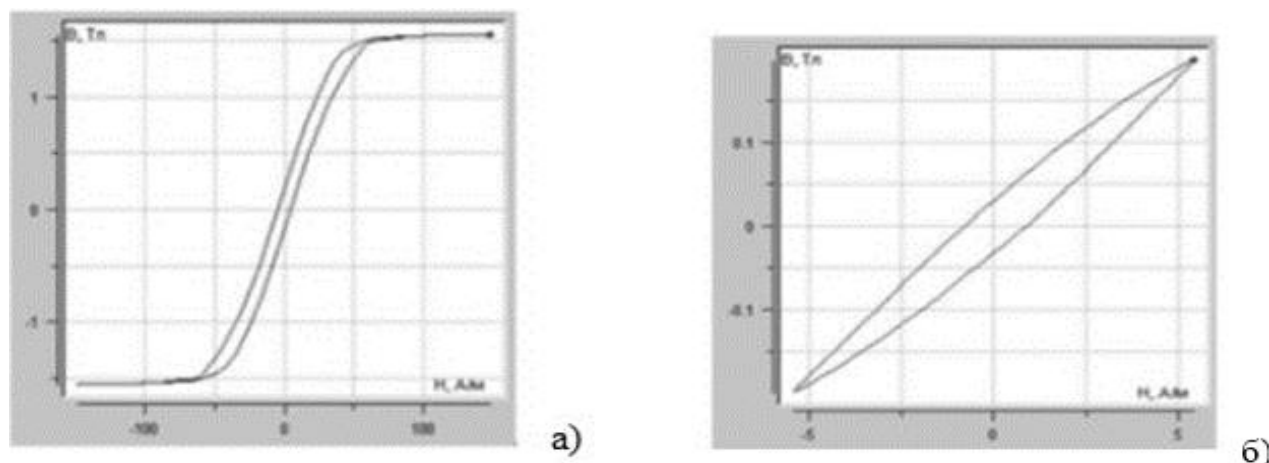


Рисунок 3. Петли гистерезиса сплава 1НСП (Т-типа)
а) ограниченная пределами петля; б) петля при индукции 0,2 Тл

Отличительной особенностью нанокристаллических сплавов является их чрезвычайно малая кристаллическая структура. Размер кристаллов (наночастиц) этих сплавов варьируется в пределах 110 нм. Нанокристаллические и аморфные сплавы во многом схожи по своим свойствам. Во-первых, они обладают структурным сходством. Как известно, структура аморфных сплавов имеет краткий порядок, то есть состоит из упорядоченных микрогрупп атомов, размеры которых близки к размерам наночастиц нанокристаллических сплавов. Второе сходство – технология производства.

В настоящее время наиболее распространенным методом получения наноструктуры является контролируемая кристаллизация из исходного аморфного состояния. Таким образом, основой нанокристаллического сплава является аморфный сплав. Структура нанокристаллического сплава представляет собой двухфазную систему, одной фазой которой являются нанокристаллы, а другой – остаточная аморфная матрица.

– Электрическое сопротивление: высокое электрическое сопротивление является одним из основных свойств аморфных металлов, что позволяет изготавливать из них некоторые элементы, например, резисторы и магнитофоны. Температурный коэффициент сопротивления невелик. Ряд проблем, связанных с аморфными металлами, препятствует их широкому применению. Основные препятствия включают в себя стоимость производства, размеры и хрупкость. Каждая из этих проблем ограничивает их применение в различных областях.

Главная проблема – высокая стоимость производства. Процесс быстрого охлаждения для предотвращения кристаллизации расплавленного металла требует специального оборудования и точного контроля, что усложняет и увеличивает стоимость производственного процесса. Другим ограничением является сложность изготовления крупномасштабных компонентов из аморфных металлов. По мере увеличения размеров компонентов быстрое охлаждение становится еще более сложным для поддержания аморфной структуры. Поэтому аморфные металлы в настоящее время доступны в небольших формах – лентах, проволоке или тонких листах. Кроме того, хрупкость этих металлов остается критической проблемой. Это особенно заметно, когда аморфные материалы подвергаются большим нагрузкам и деформациям. Хотя аморфные металлы обладают высокой механической прочностью, их структура обуславливает хрупкость и может привести к разрушению при определенных условиях.



В настоящее время в электротехнических приборах используются аморфные сплавы, представляющие собой соединения на основе переходных металлов железо-никель-кобальт (Fe; Ni; Co), взаимодействующих с металлоидами бор-кремний-углерод (B; Si; C), которые снижают температуру плавления и обеспечивают более легкий доступ к температуре стеклования аморфных сплавов при охлаждении. В этих сплавах исчезают границы между доменами, что приводит к высокой твердости, прочности и коррозионной стойкости таких материалов.

Трансформаторы с аморфными сердечниками – это новый тип энергосберегающих трансформаторов, в которых в качестве сердечника используются листы аморфного металла. Эти трансформаторы не только энергосберегающие, но и экологически чистые. Они активно используются для модернизации распределительных сетей. Потери железа в трансформаторах с аморфными сплавами (т.е. потери в режиме холостого хода) на 70-80% меньше, чем потери в традиционных трансформаторах, использующих кремниевую сталь в сердечнике. Наряду со снижением потерь, снижается потребность в электроэнергии и, соответственно, сокращаются выбросы вредных газов, таких как углекислый газ. Потери нагрузки в трансформаторах изменяются с увеличением нагрузки, в то время как потери холостого хода имеют постоянное значение. Решение проблемы потерь энергии заключается в снижении потерь при работе в режиме холостого хода. Для снижения потерь холостого хода в магнитных проводниках силовых трансформаторов используется многослойная лента из аморфного сплава типа Fe₇₈B₁₃Si₉. Сравнительные свойства этого сплава приведены в таблице 1. По данным американской компании Metglas, ежегодные потери в силовых трансформаторах для распределительных сетей, использующих магнитные сердечники из электротехнической стали, составляют около 8% от их покупной цены.

Таблица 1

Сравнительные свойства аморфных и обычных магнитопроводящих сплавов

Свойства	Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ (толщина 0,025мм)	GO Fe-Si (толщина 0,23 мм)
Плотность (кг/м ³)	7,18 x 10 ³	7,65 x 10 ³
Модуль упругости (ГПа)	150	120
Предел текучести (МПа)	>700	<300
Предел прочности при разрыве (МПа)	2800	350
Относительное удлинение при разрыве (%)	2,5	25
Твердость – по Виккерсу (Н)	800	180
Удельное электрическое сопротивление (Ом.м)	137 x 10 ⁻⁸	45 x 10 ⁻⁸
Коэффициент ламинации (%)	<90	95
Температура Кюри (°C)	415	740
Поляризация насыщения	1,56	2,03
Магнитострикция насыщения	37 x 10 ⁻⁶	25 x 10 ⁻⁶
Постоянная коэрцитивная сила	2	5
Максимальная относительная проницаемость	2 x 10 ⁵	8 x 10 ⁴
Мощность потерь – при 1,4 Тл и частоте 50 Гц (Вт/кг)	0,25	0.7

В таблице 2 показаны средние потери холостого хода для силовых трансформаторов с номинальным напряжением 10 кВ и мощностью от 25 до 2500 кВА. Как видно из таблицы, использование аморфных материалов в магнитном сердечнике вместо традиционной трансформаторной стали позволяет снизить потери холостого хода в 4-5 раз. По информации энергетических компаний США и Японии, эффективные распределительные



трансформаторы, магнитные сердечники которых изготовлены из нанокристаллических материалов, окупаются в течение трех лет.

Наряду со снижением потерь в магнитном сердечнике из нанокристаллических сплавов, снижается и стоимость намагничивающего тока. В результате снижения потерь холостого хода и намагничивающего тока в трансформаторах:

- 1) снижается температура трансформатора и увеличивается срок его службы;
- 2) в несколько раз снижаются затраты на передачу электроэнергии потребителю;
- 3) наблюдается общее снижение энергопотребления в энергетическом секторе страны, в результате чего значительно уменьшается объем органического топлива для производства электроэнергии и количество вредных газов, выбрасываемых в атмосферу.

Таблица 2

Сравнительные средние потери холостого хода в силовых трансформаторах

Мощность трехфазного трансформатора 10 кВ, кВА	Средние потери в режиме холостого хода, магнитный проводник-трансформаторная сталь, SiFe	Средние потери в режиме холостого хода, магнитный проводник – аморфный сплав	Сравнительное снижение потерь, %:
25	100	28	72
40	140	39	72
63	180	50	72
100	260	66	75
250	520	150	71
630	1000	280	77
1000	1700	350	80
1600	2100	490	77
2500	2700	550	80

В некоторых странах первые распределительные трансформаторы с аморфным сердечником мощностью 630-1000 кВА были изготовлены 10 лет назад. Наибольшего прогресса в этом направлении достигли США, Китай и Индия. С 2009 года ряд европейских распределительных компаний установили в тестовом режиме несколько трансформаторов с аморфными ленточными сердечниками мощностью 400 кВА.

В России первыми начали производство силовых трансформаторов АТМГ с аморфными сердечниками в 2012 году группа компаний «Трансформатор» (рис 4). В таблице 3 представлены сравнительные характеристики трансформаторов с аморфными сердечниками и стандартными железо-кремниевыми сердечниками мощностью 400 кВт.

Таблица 3

Сравнение трансформаторов мощностью 400 кВт

N	Показатели		Значения	
	Группа свойств	Вид свойства	Аморфная сталь 260SA1 Fe78B13Si9	Стандартная трансформаторная сталь 30P140 Fe87Si13
1	Магнитные свойства	Потери при работе без нагрузки P_0 (потери в железе)	0,17 Вт/кг	0,86 Вт/кг
2		Плотность магнитного потока (магнитная индукция)	1,56Тл	2,03Тл



3		Максимальная магнитная проницаемость	$>2010^4$ Гн/м	$4 \cdot 10^4$ Гн/м
4		Температура Кюри	415°C	745°C
5		Константа насыщения магнитострикции	$20 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$
6	Физические свойства	Плотность	7,18 г/см ³	7,65 г/см ³
7		Коэффициент заполнения	$>75\%$	$>94\%$
8		Температура кристаллизации	550°C	-
9		Предел прочности при растяжении	>150 кг/мм ²	>150 кг/мм ²
10		Твердость	860 кг/мм ²	860 кг/мм ²
11	Габаритные размеры	Ширина	~213 мм	~950 мм
12		Длина	0,02 – 0,03 мм	0,23 – 0,3 мм
13	Другие параметры	Обработка	После нагрева в магнитном поле при температуре 380-400 °С готово к дальнейшей обработке	750°C – 850°C



а)



б)

Рисунок 4. Трансформатор группы «Трансформер». а – внешний вид;
 б – магнитопровод с обмотками

Заключение

1. Анализ показывает, что трансформаторы с магнитными сердечниками из аморфных сплавов обладают более высокой энергоэффективностью, чем традиционные трансформаторы с магнитными сердечниками из электротехнических сталей.

2. Важно организовать производство аморфных сплавов и постепенно переходить к их использованию в магнитных сердечниках современных трансформаторов с различными гарантиями.

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



Список литературы:

1. Səfiyev E.S., Mehdili A.Ə. Amorf maqnitkeçirici nüvəli transformatorlar. Energetikanın problemləri, Elmi-texniki jurnal, 2024, №3, s.73-77.
2. Safiyev E.S., Aslanov Y.F. Transformers with amorphous magnetic conductive core. Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ», № 3 (84), 2025 г., с.638 – 647.
3. Safiyev E.S., Shikhaliyeva S.Y. Prospects for application of amorphous and nanocrystalline metals in transformers. The 21st Internationale Conference on Technical and Physical Problems of Engineering ICTPE-25 31 October 2025 International Organization of IOTPE, p.1-7.
4. <https://applied-research.ru/article/view?id=7986>
5. <http://ru.scotech-electrical.com/info/what-is-amorphous-alloy-transformer-and-its-ad-79239563.html>
6. https://insights.made-in-china.com/ru/A-Brief-Discussion-on-the-Difference-Between-Silicon-Steel-and-Amorphous-Alloy-in-Power-Transformers_jApfUqrumEHt.html
7. https://ru.tstytransformer.com/News_detail/30.html
8. Печенкин, В. И. Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем / В. И. Печенкин // Электротехн. рынок. – 2012. – № 5/6 (47, 48). – с. 46–47.
9. Войтюлевич, О. А. Трансформаторы с аморфным магнитопроводом / О. А. Войтюлевич, С. Г. Гапанюк // Актуальные проблемы энергетики: материалы науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2017 г. / Белорус.нац.техн. ун-т. – Минск, 2017. – с.409–412.
10. Сорока, А. В. Применение распределительных трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали / А. В. Сорока, В. Н. Радкевич // Актуальные проблемы энергетики: материалы науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. Минск, 2017. – с. 494–499.
11. UCLA News (2021, March 31). Century-old problem solved with first-ever 3D atomic imaging of an amorphous solid. Retrieved August 20, 2024, from <https://newsroom.ucla.edu/releases/first-ever-3d-atomic-imaging-amorphous-solid>.

