

---

# Нанокристаллические магнитные сплавы

Веклич А.В,  
Ерушевич Д.А,  
Борисов Р.А,  
Рачек В.Б.

Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ  
660074, Красноярск, ул. Киренского 26.  
E-mail: [veklich95@mail.ru](mailto:veklich95@mail.ru)

*В данной статье рассматриваются основные представления о нанокристаллических магнитных сплавах принцип создания, спектр их применения на производстве.*

Ключевые слова: Нанокристаллические магнитные сплавы, Аморфные сплавы

*This article discusses the basic concepts of magnetic nanocrystalline alloys, the principle of creation, the range of their application in the workplace.*

Keywords: Nanocrystalline magnetic alloys, amorphous alloys.

Нанокристаллические сплавы (НКС) представляют собой сплавы со смешанной аморфно-кристаллической структурой. Такая структура может состоять из кристаллов твердого раствора кремния в  $\alpha$ -Fe размером 10 — 20 нм (нанокристаллы) и аморфной фазы, образующей тонкую (в несколько атомных слоев) оболочку вокруг этих кристаллитов.

В последние годы так называемые нанокристаллические мягкие магнитные материалы получают все более широкое распространение в проектах современной силовой электроники. Наряду с неоспоримыми достоинствами данных материалов в части качества функционирования данному распространению способствует благоприятный уровень цен в сочетании с доступностью из нескольких источников в глобальном масштабе.

Для того, чтобы раскрыть понятие о нанокристаллических магнитных сплавах, нужно сначала ознакомиться с понятием об аморфных сплавах. Аморфные сплавы — новый особый класс прецизионных сплавов, отличающийся от кристаллических сплавов структурой, способом изготовления, областью существования на температурно-временной диаграмме и свойствами.

Рассмотрим принцип создания аморфных сплавов. Для изготовления аморфных сплавов в виде лент обычно используется способ охлаждения, при котором струя жидкого металла с определённой скоростью направляется на поверхность быстро вращающегося цилиндра, изготовленного из материала с высокой теплопроводностью. Аморфные сплавы при нагревании переходят в кристаллическое состояние. Для стабильной работы изделий из аморфных сплавов необходимо, чтобы их температура не превышала для каждого сплава максимальной рабочей температуры. В настоящее время наибольшее распространение получили магнитомягкие аморфные сплавы, в которых сочетаются высокие магнитные и механические свойства. Магнитомягкие аморфные сплавы — ферромагнитные сплавы с узкой петлёй гистерезиса. Особенностью магнитомягких аморфных сплавов по сравнению с кристаллическими является большое (около 20 %) содержание немагнитных элементов, как бор, кремний, углерод, фосфор и прочие, необходимых для сохранения аморфной структуры. Наличие этих элементов снижает максимальные значения индукции насыщения в аморфных сплавах по сравнению с кристаллическими и увеличивает температурный коэффициент магнитных свойств. Эти же элементы увеличивают электросопротивление, повышают твёрдость и прочность аморфных сплавов, а также их коррозионную стойкость. В радио и электротехнических изделиях с начала

---

восьмидесятых годов стали широко применяться аморфные материалы, которые используются вместо пермаллоев, ферритов, электротехнических сталей, магнитодиэлектриков.

Вторым представителем нового класса метастабильных быстроохлаждённых сплавов и активным соперником аморфных сплавов являются нанокристаллические сплавы. Их особенность — сверхмелкокристаллическая структура. Размер кристаллов (наночастицы) в этих сплавах составляет от 1 до 10 нм. Нанокристаллические и аморфные сплавы — ближайшие родственники. Их «родство» основано на двух обстоятельствах. Во — первых, это 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. Свойства наносплава зависят от состава, размера и количества нанокристаллов, а также их соотношения с аморфной фазой. Основой экономичного сырья являются кремний и железо. Имея высокую индукцию насыщения (1.2 Т), хорошую температурную стабильность в широком диапазоне температур от  $-60$  до  $180^{\circ}\text{C}$ , новый нанокристаллический материал имеет отличные характеристики в высокочастотной области на уровне аморфных сплавов на основе кобальта. При этом новый сплав является намного более экономичным. Точное управление параметрами отжига навитых из ленты тороидов позволяет в широких пределах регулировать требуемые свойства материала (например, форму петли гистерезиса, уровень магнитной проницаемости, коэффициент прямоугольности, удельные потери). Одновременно, хорошее качество по доступной цене становится все более весомым показателем конкурентоспособности нанокристаллического материала в сравнении с ферритами и пермаллоями.

В настоящее время силовая электроника развивается в сторону повышения частот и уменьшения габаритов, или повышения плотности рассеиваемой мощности. Влияние этих факторов привело в последние годы к появлению в силовой электронике широкого разнообразия прикладных систем и к непрерывному росту спроса на новые варианты применения. Разнообразные дроссели и трансформаторы используются в таких вариантах реализации, как:

- Фильтры ЭМС/электромагнитных помех (EMC/EMI) для переключаемых источников питания (SMPS) и инверторных приводов
- Импульсные источники питания
- Источники питания для электрической сварки
- Генераторы рентгеновского излучения
- Зарядные устройства аккумуляторных батарей
- Солнечные генераторы
- Преобразователи тока (выпрямители или конвертеры DC/DC)
- Источники питания для автомобильной техники (на напряжение 42 В)
- Системы железнодорожного транспорта
- Электронные измерители мощности (ватт-часов)
- Прерыватели цепи короткого замыкания на землю

---

Одним из самых важных вариантов применения нового материала являются в настоящее время синфазные дроссели для фильтров электромагнитных помех (EMI) в конвертерах переключаемых источников питания любого вида (включая приводы с переменной скоростью). Достигается наиболее заметное сокращение объема сборки благодаря тому, что такие свойства данного материала, как магнитная проницаемость и бросок потока намагничивания, являются существенно более высокими, чем у ферритов, традиционно использовавшихся по данному назначению до настоящего времени.

Другими базовыми вариантами применения являются силовые трансформаторы в импульсных двухтактных источниках питания для диапазонов мощности от нескольких сотен ватт до нескольких сотен киловатт, подавители всплесков напряжения (молниеотводы), магнитные усилители, пусковые трансформаторы для IGBT-транзисторов, сердечники трансформаторов для независимых от электросети прерывателей цепи короткого замыкания на землю и трансформаторы тока в современных электронных измерителях мощности (ватт-часов). В ближайшем будущем ожидается существенное расширение областей применения новых материалов — в частности, в силовых преобразователях новых топологий и во вновь разрабатываемых системах автомобильного производства.

### **Список литературы**

1. *Д-р Мартин Ферч, MAGNETEC GmbH, Лангензельболд, Германия.*
2. <http://www.mstator.ru/>
3. <http://uas.su/>