

# **МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

---

**Магнитотвердые  
материалы**

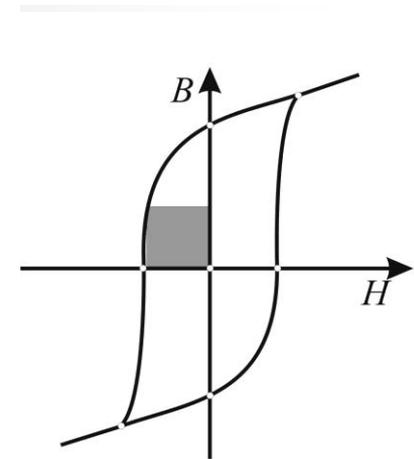
# Магнитотвердые материалы

- **Магнитотвердыми материалами** называются магнитные материалы с коэрцитивной силой  $H_c$  по индукции не менее 4 кА/м, используемые для изготовления постоянных магнитов.
- Магнитотвердые материалы после намагничивания должны создавать внешние постоянные магнитные поля, нечувствительные по возможности к различным возмущающим факторам.
- Основное требование к магнитотвердым материалам – высокое значение удельной магнитной энергии ( $BH$ ), позволяющее при прочих равных условиях значительно уменьшить объем и массу конструктивных элементов различных устройств.
- Выполнение этого требования достигается высокими значениями остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_c$ , коэффициента выпуклости  $\beta = (BH)_{\max} / B_r H_c$  и малым значением проницаемости возврата  $\mu_{\text{возв}}$ .
- В существующих технических магнитотвердых материалах  $\beta = 0,25 \div 0,75$ .

# 1. Классификация

## магнитотвердых материалов

- В основе классификации магнитотвердых материалов лежат различия в химическом составе, природе высококоэрцитивного состояния и технологии изготовления.
- **Магнитотвердые материалы:**
  - стали – закаливаемые на мартенсит углеродистые стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом;
  - дисперсионно-твердеющие сплавы;
  - диффузионно-твердеющие сплавы на основе системы железо–никель–алюминий с добавками кобальта, меди, титана;
  - сплавы с участием благородных металлов типа Pt–Co, Pt–Fe, Ag–Mn–Al;
  - сплавы кобальта с редкоземельными металлами (РЗМ);
  - магнитотвердые ферриты бария, стронция, кобальта;
  - композиционные.



Область  
применения

# 2. Мартенситные стали

- Магнитотвердые материалы с умеренными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии могут быть получены легированием углеродистой стали (с содержанием углерода около 1 %) хромом (ЕХ3), вольфрамом (ЕВ6), хромом и кобальтом (ЕХ5К5), хромом, кобальтом и молибденом (ЕХ9К15М2). Магнитные свойства этих материалов в значительной степени определяются термической обработкой. Эта зависимость объясняется тем, что высококоэрцитивное состояние этих материалов обусловлено магнитоупругим взаимодействием. Например, для кобальтовых сталей при увеличении содержания кобальта одновременно возрастают магнитострикция и коэрцитивная сила.
- **Высококоэрцитивное состояние в мартенситных сталях обеспечивается неоднородной двухфазной структурой после закалки на мартенсит (в виде мелкодисперсных пластинок цементита, равномерно распределенных в феррите) и обусловлено сочетанием магнитокристаллической и магнитострикционной анизотропий.**

## 2.1. Применение

- Постоянные магниты из мартенситных сталей имеют меньшую температурную и временную стабильность по сравнению с магнитами других групп. Несмотря на относительно низкие магнитные свойства, мартенситные стали обладают **преимуществами**: они дешевы и допускают обработку на металлорежущих станках. Применяют их в тех случаях, когда к магнитным системам не предъявляются требования по габаритам и массе, а также в качестве «полутвердых» магнитных материалов для изготовления элементов магнитных систем, в которых магнитная индукция в рабочем зазоре должна переключаться, т.е. менять направление при подаче управляющего сигнала не слишком большой мощности.
- $B_r = 0,8 \div 1,0$  Тл;  $H_c = 4,8 \div 11,9$  кА/м

# 3. Дисперсионно-твердеющие сплавы

- К дисперсионно-твердеющим сплавам относятся сплавы на основе систем Fe-Ni-Cu – кунифе, Fe-Ni-Cu-Co – кунико, Fe-Co-V – викалой, Fe-Co-Mo – комоль, Fe-Cr-Co, подвергающиеся холодной и горячей механической обработке давлением. Их оптимальные магнитные свойства возникают в результате создания мелкодисперсной (обычно метастабильной или даже неравновесной) структуры, образующейся при выделении избыточной фазы, которая отличается от матрицы намагниченностью насыщения.
- **Как и у мартенситных сталей, высококоэрцитивное состояние этих сплавов обусловлено задержкой смещения доменных границ в результате сочетания магнитокристаллической и магнитострикционной анизотропии.**
- Часть сплавов кунифе, кунико и комоль потеряла свое значение и выпускается в ограниченных масштабах по техническим условиям предприятий ввиду разработки более высококачественных сплавов системы ЮНДК. Несколько шире применяются сплавы Fe-Co-V и сплавы Fe-Cr-Co.

# 3.1. Применение

- **Сплавы викалой** являются пластически деформируемыми. До окончания термической обработки викалой по пластичности приближается к Cu, а после обработки – к стали. Эти сплавы приобретают магнитотвердые свойства только после холодной деформации на 70÷90 % (прокатка, волочение) и последующего отпуска. Из этих сплавов, ввиду их высокой стоимости, изготавливают очень мелкие магниты сложной или ажурной конфигурации, сердечники активной части гистерезисных двигателей и высокопрочные ленты и проволоки. В этом преимущество сплавов викалой, так как из других магнитотвердых материалов (за исключением еще более дорогого сплава системы Co-Pt) изготовить изделия такой сложной формы очень сложно или невозможно из-за низких пластичности и прочности. ( $B_r = 0,9\div 1,1$  Тл;  $H_c = 12\div 24$  кА/м)
- **Сплавы Fe-Cr-Co** применяются в магнитных системах замкнутого типа в тех случаях, когда форма магнита затрудняет его изготовление методом литья и требуется значительная механическая обработка, или когда к магнитам предъявляются повышенные требования по прочности. Применение этих сплавов ограничено высокой стоимостью и дефицитностью Co. ( $B_r = 0,8\div 1,25$  Тл;  $H_c = 20\div 52$  кА/м)

# 4. Диффузионно-твердеющие сплавы

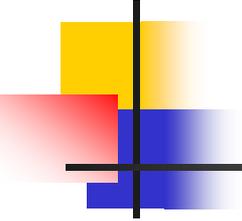
- Сплавы системы Fe-Ni-Al-Co, получившие в отечественной промышленности название **сплавов ЮНДК**, имеют наилучшие магнитные свойства, а также – самые стабильные среди магнитотвердых материалов и способны работать при самой высокой температуре. (Так, при испытаниях в течение года при температуре 500 С структурных изменений в них не наблюдается.)
- Механизм магнитного твердения сплавов ЮНДК имеет принципиальное отличие: **в этих сплавах основную роль играет анизотропия формы выделений сильномагнитной фазы, когерентно связанных со слабомагнитной, почти немагнитной матрицей.** В термообработанном состоянии эти сплавы представляют собой фактически совокупность однодоменных анизотропных по форме частиц, разделенных немагнитными прослойками, что и определяет механизм перемагничивания.
- В зависимости от режима термической обработки коэрцитивная сила этих сплавов может меняться в сотни раз.

## 4.1. Применение и недостатки

- Магниты из сплавов ЮНДК применяются в электродвигателях, электроизмерительных, радиотехнических и других приборах.
- **Недостатки** сплавов ЮНДК – их **высокая твердость и хрупкость**, поэтому они могут обрабатываться только шлифованием. Магниты из этих сплавов изготавливают либо методом литья, либо методами порошковой металлургии. Прочность металлокерамических сплавов в 3÷6 раз больше, чем у литых.
- ( $B_r = 0,5\div 1,4$  Тл;  $H_c = 40\div 96$  кА/м)

# 5. Сплавы с участием благородных металлов

- **Высококоэрцитивное состояние материалов этой группы связано со структурными напряжениями** (магнитострикционная анизотропия), возникающими при переходах неупорядоченной фазы в упорядоченную (сплавы Pt-Co), **или с магнитокристаллической анизотропией** мелкодисперсных выделений магнитной фазы (сплав системы Ag-Mn-Al).
- Сплавы системы Pt-Co имеют очень высокие значения коэрцитивной силы при достаточно высоких значениях остаточной индукции, а следовательно, очень высокие значения максимальной удельной магнитной энергии. При этом им свойственна высокая пластичность, допускающая вытяжку в тонкую проволоку.



## 5.1. Применение

---

- Сплавы Pt-Co по сочетанию своих свойств являются почти идеальными магнитотвердыми материалами для магнитов в так называемых открытых магнитных цепях, т.е. в магнитных системах без магнитопроводов, например, в точных электроизмерительных приборах с подвижными магнитами в качестве «магнитных пружинок», а также для многополюсных роторов миниатюрных шаговых двигателей и т.п.
- Недостатки: стоимость этих сплавов очень велика, что ограничивает их применение лишь специальными случаями.
- ( $B_r = 0,65 \div 0,80$  Тл;  $H_c = 240 \div 400$  кА/м;  $(BH)_{\max} = 29 \div 48$  кДж/м<sup>3</sup>)

# 6. Сплавы Co с РЗМ

- Сплавы Co с Pr и Sm представляют собой интерметаллические соединения **с исключительно высокой кристаллографической анизотропией**. На основе этих сплавов разработаны магнитотвердые материалы с рекордными значениями всех основных магнитных свойств при удовлетворительных характеристиках температурной и временной стабильности.
- Высокая энергоемкость, очень большие значения  $H_c$ , способность работать в мощных размагничивающих полях, независимость магнитных параметров от статических и динамических нагрузок, удовлетворительная стабильность магнитов из сплавов Co-РЗМ – все это позволяет применять их в любых условиях.
- Недостатки: дефицитность основных компонентов и высокая стоимость ограничивают область применения этих магнитов системами специального назначения.
- ( $B_r = 0,8 \div 0,9$  Тл;  $H_c = 500 \div 560$  кА/м;  $(BH)_{\max} = 55 \div 73$  кДж/м<sup>3</sup>)

# 7. Магнитотвердые ферриты

- Магнитотвердые ферриты Ba, Sr и Co являются ферримагнетиками. **Высококоэрцитивное состояние в них обусловлено большой магнитокристаллической анизотропией и мелкозернистой структурой, обеспечиваемой методами порошковой металлургии.**
- Недефицитность и дешевизна исходных компонентов совместно с возможностью изготовления магнитов по безотходной технологии порошковой металлургии и с высокими магнитными характеристиками обеспечили магнитотвердым ферритам большой удельный вес (более половины) в производстве постоянных магнитов.
- Недостатки: хрупкость, высокая твердость, низкая прочность, что исключает их использование в качестве несущих элементов. Вследствие пористости ферритовых магнитов их следует оберегать от попадания влаги с последующим ее замерзанием.
- ( $B_r = 0,2 \div 0,4$  Тл;  $H_c = 125 \div 215$  кА/м;  $(BH)_{\max} = 3 \div 14$  кДж/м<sup>3</sup>)

# 8. Магнитотвердые композиты

- Ввиду высокой деформируемости и низкой стоимости очень перспективны для массового применения **композиционные магнитотвердые материалы**, в которых матрицей служит пластмассовая (магнитопласты) или каучуковая (магнитоэласты, магнитная резина) связка, а дисперсной составляющей – дискретные частицы магнитного наполнителя (порошки магнитотвердых ферритов, реже порошки диффузионно-твердеющих сплавов и сплавов кобальта с РЗМ).
- Преимущества: изготовление постоянных магнитов сложной формы.
- Магниты из магнитотвердых композиций широко применяются в шаговых и синхронных электродвигателях; в телевизионной и акустической аппаратуре; для производства магнитных панелей, способных удерживать символы из магнитомягкого материала; для элементов при макетном проектировании, в бытовых товарах (магнитные уплотнения холодильников, замки, ключи, игры).