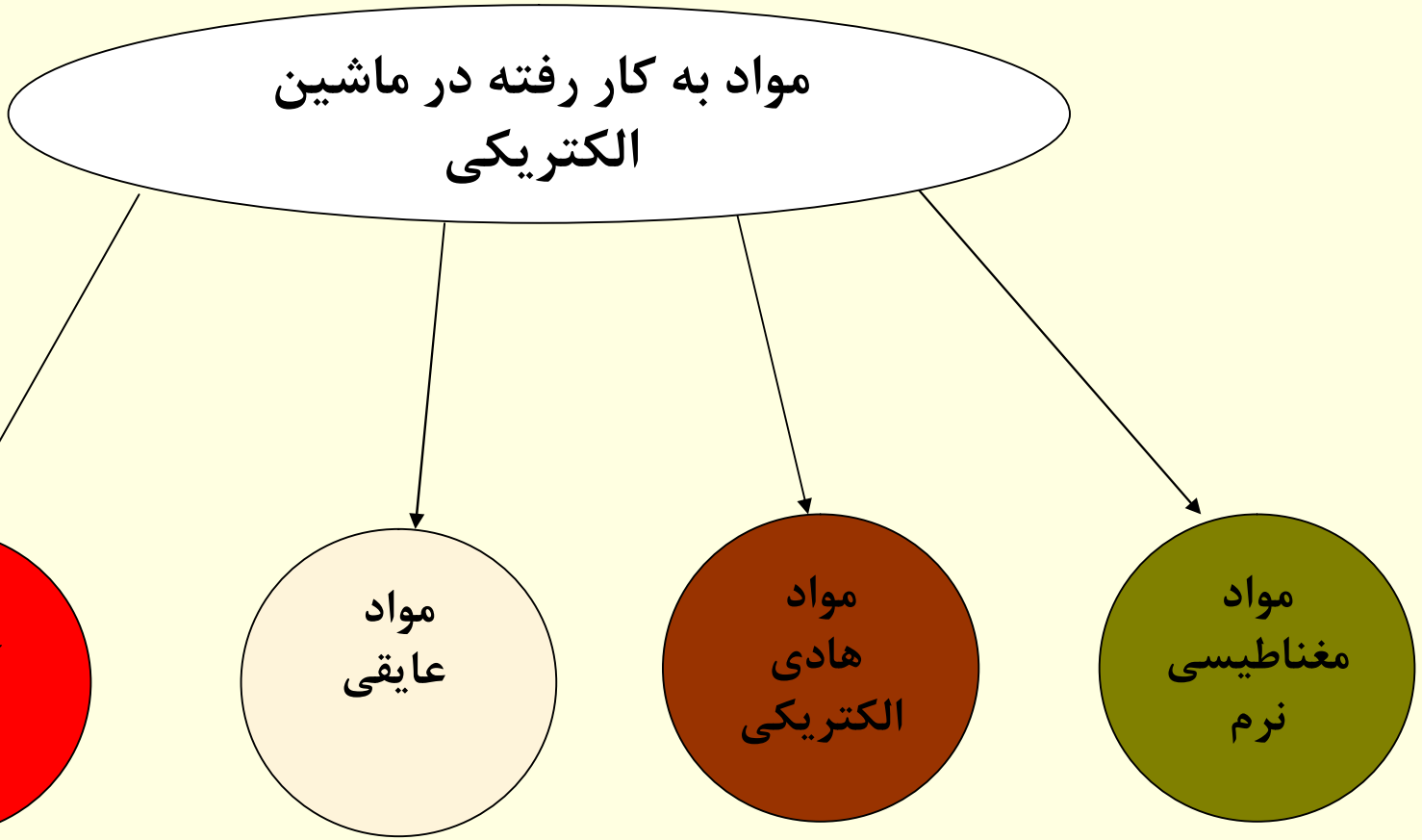
**بنام خدا**

# طراحی ماشینهای الکتریکی

طراحی ماشینهای الکتریکی

# مواد مهندسی برق



# مواد مهندسی برق

**ماده ایده ال برای مدار مغناطیسی، ماده ای است که بالاترین نفوذ پذیری، بالاترین چگالی شار اشباع و نیز کمترین تلفات هسته را دارا باشد.**
**ملاحظات اقتصادی، همراه با خصوصیات عملکرد ماشین، ماده ای را که باید برای یک کاربرد معین مورد استفاده قرار گیرد، تحمیل می کنند.**

**موتور کسراسب بخار** ← **مواد مغناطیسی نرم بدون سیلیکون و نسبتاً ارزان با مشخصات متوسط**

**موتور فرکانس بالا** ← **مواد گران تر با عملکرد بهتر به منظور محدود کردن ابعاد و تلفات ماشین**

دانشگاه علم وصنعت ایران

# مواد مهندسی برق

**یکی از شاخصهای مهم در انتخاب مواد مغناطیسی نرم تلفات آهنی است :**

**تلفات آهنی**

**تلفات هیسترزیس** : تلفات هیسترزیس ناشی از نوعی اصطکاک درون مولکولی است. این تلفات در هر سیکل با سطح احاطه شده توسط حلقه هیسترزیس دریک ماده متناسب است

$$P_n = \eta B^n f$$

**تلفات جریان گردابی** : جریانهای الکتریکی گردشی که در یک ورق هادی در معرض میدان مغناطیسی متناوب، القاء می شوند، توانی را تولید می کنند که به صورت گرما تلف می شود

$$P_e = \frac{\pi^2 B^2 t^2 f^2}{\rho \beta}$$

روش کاهش تلفات در فرکانس ۵۰هرتز، استفاده از ورقهای عایق شده با ضخامت بین ۰/۳۵-۰/۶۵ mm میباشد.

در فرکانس ۴۰۰ هرتز، ورقهای نازکتری که از آلیاژهای مخصوص یا از فولادهای الکتریکی جهت دار ساخته شده است، به کار برده می شود.

# مواد مهندسی برق

**خواص ایدآل مواد مغناطیسی نرم به کار رفته در ماشینهای الکتریکی:**

- نفوذ پذیری بالا (برای کاهش مقاومت مغناطیسی مدار)
- چگالی شار اشباع بالا (برای به حداقل رساندن حجم و وزن قطعات آهن)
- تلفات پایین (به دلیل تأثیرگذاری تلفات روی راندمان و افزایش دما)

در عمل، بهینه سازی همه این ویژگیها در یک ماده تنها غیر ممکن است. بعلاوه بین داشتن تلفات کم و نفوذ پذیری زیاد، تضاد و ناسازگاری وجود دارد.

# مواد مهندسی برق

جریان گردابی (فوکو) کم
- مقدار زیاد آلیاژ
- اندازه ریز ذرات
- ماده نازک
- بافت خوب

تلفات هیسترزیس کم
- ماده ضخیم
- ناخالصی کم
- اندازه درشت ذرات
- بی نظمی های کم در سطح
- مقدار کم آلیاژ

نفوذ پذیری زیاد
- اندازه ریز ذرات
- بافت خوب
- ناخالصی کم

دانشگاه علم و صنعت ایران

# مواد مهندسی برق

افزودن درصد کمی سیلیکون به آهن نرم موجب بهبود چندین ویژگی در آهن خواهد شد:

- مقاومت افزایش می یابد
- نیروی پسماند زدا به طور چشمگیری کاهش می یابد
- پایداری خواص مغناطیسی برای مدت زمان خیلی بیشتری افزایش خواهد یافت.

- اگر چه وجود سیلیکون باعث می شود که چگالی شار اشباع به اندازه ناچیزی کاهش یابد اما، مقاومت اهمی آهن آلیاژی با ۳ درصد سیلیکون نسبت به آهن خالص، ۴ برابر است.

- افزودن تقریباً بیش از ۵ درصد سیلیکون به آهن آن را شکننده می کند و کار با آن بسیار سخت خواهد شد. این مسئله ماکزیمم مقدار سیلیکون را در مواد تجاری به میزان ۳/۴ درصد محدود می کند (مقدار مینیممی در حدود ۲/۲ درصد برای فولاد جهت دار )

# مواد مهندسی برق

خواص فولادهای جهت دار آرمکو

| نام تجاری | ضخامت (mm) | تلفات هسته در ۱/۵T و ۵۰ Hz | تلفات هسته در ۱/۷T و ۵۰ Hz |
|---|---|---|---|
| Armco oriented | ۰/۱۸ | ۰/۷۰ | -- |
| | ۰/۲۳ | ۰/۷۷ | -- |
| | ۰/۲۷ | ۰/۸۵ | ۱/۲۴ |
| | ۰/۳۵ | ۱/۱۱ | ۱/۵۷ |
| Tran-CorH | ۰/۲۳ | -- | ۱/۰۱ |
| | ۰/۲۷ | -- | ۱/۱۱ |

# مواد مهندسی برق

## استانداردهای فولادهای الکتریکی

| کشور | غیر جهت دار | جهت دار |
|---|---|---|
| بین المللی | Euronorm106 (1984 ) | Euronorm107 (1984 ) |
| بین المللی | IEC 404-8-4 (1986) | IEC 404-8-5 (1986 ) |
| فرانسه | NF C 28-900 (1983) | NF C 28-920 (1983) |
| آلمان | DIN 46 400. Pt. 1 (1983) | DIN 46 400. Pt. 3 (1983) |
| ژاپن | JIS C 2552 (1978) | JIS C 2553 (1978) |
| انگلیس | BS6404. Pt. 8, 8.2-8.4 (1986) | BS6404. Pt. 8, 8.7 (1986) |
| آمریکا | ASTM, A677, A677M (1984 | ASTM, A665 (1984) |

# مواد مهندسی برق

براساس IEC 404-86، هر ماده با دو عدد که خط فاصله بین آنهاست و یک حرف که عددی همراه آن است شناخته می شود.

A5 35 – 250

نوع و کلاس ماده :
حروف A،D و E به ترتیب نمایانگرمواد غیر جهت دار: پرداخته کامل، نیمه پرداخته و ورق آلیاژی
حروف N، S و P به ترتیب برای مواد جهت دار: با تلفات معمولی، با تلفات کاهش یافته و با نفوذ پذیری بالا

۰/۱ فرکانس

100 برابر ضخامت ورق برحسب میلی متر

100 برابر تلفات (w /kg)

# مواد مهندسی برق

N5 27 – 089

ماده جهت داربا تلفات معمولی

تلفات 0/89 (w /kg)

فرکانس ۵۰ هرتز

ضخامت ورق 0/27 میلی متر

** کد جدید برای ماده نوع M4

# مواد مهندسی برق

**آلیاژهاي ویژه و ورقهاي فرکانس بالا:**

آلیاژهای آهن- کبالت (پرمندور) بیشترین چگالی شار اشباع، به طور معمول 2/35 تسلا را دارا می باشند.
دو نوع متمایزدارند: پرمندور 24 و پرمندور 49

آلیاژ پرمندور 24 شامل 24% کبالت است ساخت و فرم دهی قطعات پیچیده، مانند قطعات قطب مغناطیسی امکان پذیر است. نسبت به پرمندور 49 ارزانتر است

آلیاژ پرمندور 49 شامل 49% کبالت و 2% وانادیوم است. خواص مکانیکی بهتری دارد.. چنین آلیاژی علیرغم هزینه بالای آن، کاربردهای مهمی در ژنراتورهای هواپیما و بعضی موتورهای 400 هرتز دارد که در آنها چگالی شار اشباع بالا، صرفه جویی در حجم و وزن را ممکن می سازد. نفوذ پذیری نسبی پرمندور 49 به طرز قابل توجهی بیشتر می‌باشد.

# مواد مهندسی برق

**خواص معمول آلیاژهای پرمندور**

| آلیاژ / مشخصه | پرمندور ۴۹ | پرمندور ۲۴ |
|---|---|---|
| شار اشباع (T) | ۲/۳۵ | ۲/۳۵ |
| ماکزیمم نفوذ پذیری نسبی | ۷۰۰۰ | ۲۰۰۰ |
| مقاومت مخصوص $(\mu\Omega m)$ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ |
| چگالی $(kg/m^3)$ | ۸۰۷۰ | ۷۰۹۵ |

# مواد مهندسی برق

آلیاژهای آهن- نیکل (Permalloy) که بین 30 تا 80 درصد نیکل و مقدار کمی از فلزات دیگر را شامل می شوند. در بین همه مواد تجاری شده، آلیاژهای مذکور بالاترین نفوذپذیری و کمترین پسماند مغناطیسی را دارند.

چگالی شار اشباع آنها بسیار پایین است. معمولاً بین 0/7 تسلا (برای 36 درصد نیکل) تا 1/3 تسلا (برای 78 درصد نیکل)

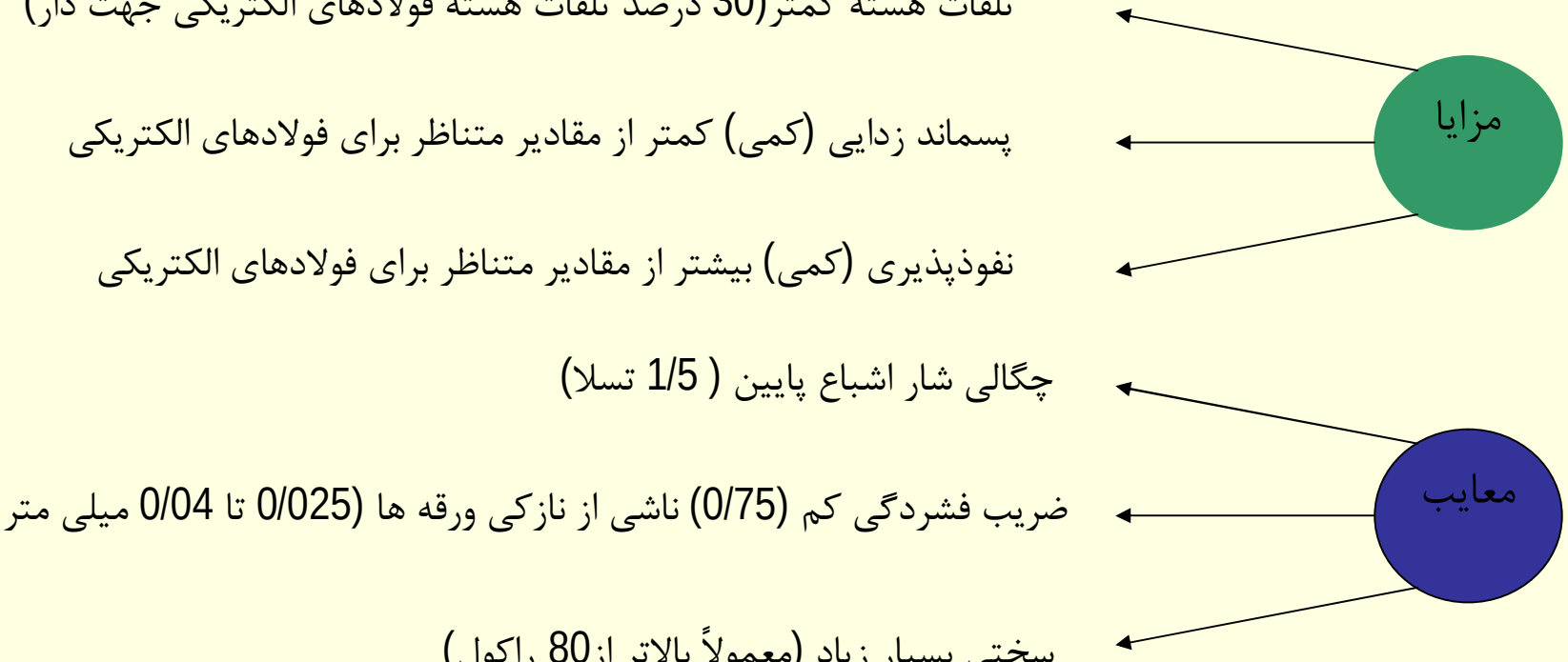
بعضی از سروموتورهای دو فاز ac که عمدتاً برای کاربردهای دفاعی و کار در فرکانس 400 هرتز طراحی شده اند، از ورقهای آهن – نیکل استفاده می کنند

در این قبیل کاربردها، مزایای تلفات کم و مقاومت زیاد در برابر فرسایش و خوردگی، در مقابل معایب قیمت بالا و سطوح اشباع پائین از اهمیت بیشتری برخوردار است.

# مواد مهندسی برق

**فلزات غیر بلورین:**

این مواد از آلیاژهای آهن (حدود ۸۰ درصد)، نیکل و یا کبالت همراه با یک یا چند تا از شبه فلز(بورون، سیلیکون و کربن )هستند که از طریق خنک سازی سریع تولید می‌شوند.



# مواد مهندسی برق

اکر چه کاربرد فلزات غیربلورین، در ترانسفورماتورها معمول شده است اما بخاطر دشواریهای ماشینکاری از آنها در موتورها استفاده نشده است.

اولین تلاشها در این زمینه برای موتورهای تکفاز بود. تلفات هسته بین 30 تا 40 درصد از کل تلفات بار کامل در موتورهای تک فاز، و معمولاً 15 درصد در ماشینهای چند فاز را شامل می شود. این مسئله بیانگر این امر است که به کارگیری هسته های غیر بلورین در موتورهای تک فاز منافع بیشتری را در بر خواهد داشت.

مقایسه ای بین عملکرد دو موتور القایی تک فاز، 4 قطب، 60 هرتز و 370 وات صورت گرفته است، که یکی از آنها از هسته فولاد الکتریکی مرسوم ( با ضریب فشردگی 0/93) بهره می گیرد و دیگری از هسته غیر بلورین ( باضریب فشردگی 0/67)

# مواد مهندسی برق

مقایسه بین دو موتور 370 وات با هسته های معمول و غیر بلورین

| موتور / مشخصه | با هسته فولاد الکتریکی | با هسته غیر بلورین |
|---|---|---|
| طول (mm) | 44/4 | 88/9 |
| وزن هسته (kg) | 3 | 3/8 |
| راندمان بار کامل (%) | 65 | 78 |
| راندمان یک چهارم بار (%) | 38 | 64 |

# مواد مهندسی برق

## جمع بندی :

انتخاب مواد هسته بگونه ای صورت میگیرد که تا حد امکان اقتصادی بوده و مشخصات فنی مورد نظر را برآورده نماید. بنابر این :

- برای موتورهای کسر اسب بخار وسایل خانگی که بازده معمولا پایین داشته و قیمت پائین و مناسب برای تولید انبوه، دارای اهمیت نخست می باشد، از مواد غیر جهت دار، عاری از سیلیکون و نیمه پرداخته مانند D5 50-890 استفاده میشود.
- اگر چه برای موتورهای القایی ۳ فاز معمول( بازده زیر W ۲۵۰ معمولاً در حدود ۷۰ درصد است و برای موتور های بالاتر به بیش از ۹۰ درصد افزایش می یابد)، عموماً از فولادهای الکتریکی باتلفات کم و غیر جهت دار با تلفات هسته ای در حدود ۴ وات بر کیلوگرم استفاده میشود..

- کاربرد فولادهای الکتریکی جهت دار و آلیاژهای ویژه، به ماشینهای با فرکانس ۴۰۰ هرتز محدود می گردد. در بعضی از توربوژنراتورها و ماشینهای بزرگ با راندمان بالا نیز به کار می روند.

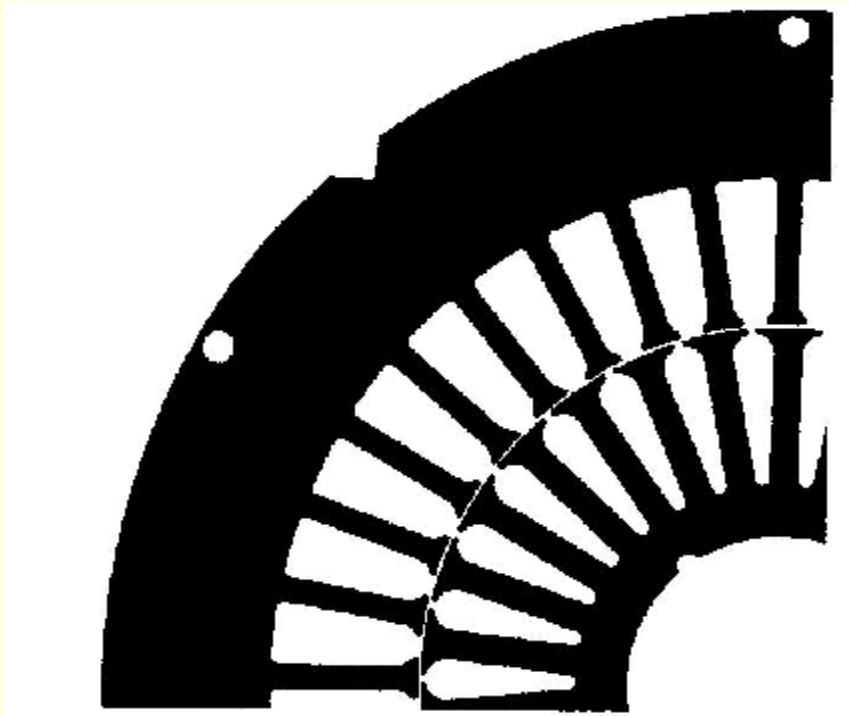
# مواد مهندسی برق

• موتورهای پله ای و سروموتورهای dc معمولاً با چگالی شار بالا (1/8 تسلا) طراحی می‌شوند و بازده (راندمان) به عنوان یک پارامتر اولیه طراحی به ندرت مورد بررسی قرار می گیرد. این موتورها معمولاً از فولادهای الکتریکی نازک غیر جهت دار استفاده می کنند. اما برخی از طراحان از ورقهای مغناطیسی جهت دار استفاده می کنند

•مواد هسته غیر لایه لایه و به صورت یکپارچه معمولاً در بخشهایی از مدار مغناطیسی که حامل شار ثابت می باشند مانند قطب های میدان ماشینهای dc، مورد استفاده قرار می گیرند. این مواد خصوصاً در مقادیر زیاد چگالی شار باید از نفوذپذیری بالایی برخوردار باشند. در این موارد مواد اصلی که مورد استفاده اند، عبارتند از: چدن (در قطبهای میدانی که کاهش هزینه مهم بوده و اضافه وزن قابل تحمل می باشد) آهن خالص و آهن سیلیکون دار (در کفشکهای قطب آهنرباهای الکتریکی dc)، فولاد نرم (قابها) و فرو کبالت (اجزاء قطب).

# مواد مهندسی برق

•معمولا تولید کنندگان موتورهای الکتریکی ورقهای پانچ شده را تهیه میکنند. این کار اقتصادی تر میباشد



شکل ۱-۳ ورق روتور و استاتور موتور القایی کوچک

# مواد مهندسی برق

- **روکشهای عایقی فولادهای مغناطیسی**

| نوع روکش / خواص | صمغ فنلی | صمغ مصنوعی | فسفات |
|---|---|---|---|
| روکش | 1 یا 2طرفه | 1 یا 2 طرفه | 2 طرفه |
| ضخامت روکش $(\mu m)$ | ۲-۸ | ۱-۲ | ۱ |
| مقاومت (یک طرف) $(\Omega cm^2)$ | ۵۰ | >۹۰ | ۱۰ |
| مقاومت گرمایی (به طور دائم) | 180 درجه | 180 درجه | 850 درجه |
| مقاومت در برابر فرسایش و خوردگی | خیلی خوب | خوب | خوب |
| قابلیت جوش خوری | کم | خوب | خوب |

# مواد مهندسی برق

مواد هادی در ماشین الکتریکی، مدارات و اتصالات الکتریکی را تشکیل می دهند.
ماده ایده ال برای این منظور، ماده ای است که خواص زیر را داشته باشد :

- بالاترین هدایت الکتریکی
- کمترین ضریب مقاومت حرارتی
- استحکام مکانیکی کافی جهت ساخت سیمهاو سایر قطعات پیچیده (مثل تیغه های کموتاتور)
- قابلیت جوشکاری و لحیم کاری خوب برای اتصال مطمئن همراه با مقاومت الکتریکی پائین

مواد هادی مورد استفاده عموما مس و آلیاژهای آن و آلومینیوم میباشند.

دانشگاه علم وصنعت ایران

# مواد مهندسی برق

## مس و آلیاژهای آن:

- مس فلزی است به شدت نرم و قابل کشش که قابلیت قالب ریزی، چکش کاری، غلتک کاری و پرداخت را دارد. به سبب رسانایی الکتریکی بالا و خواص مکانیکی عالی، مس رایج ترین هادی الکتریکی در سیم پیچی ماشینهای الکتریکی است.

- اگر چه رسانایی بالای مس یک مزیت است اما دارای اهمیت کمتری است. گاهی اوقات آلیاژهایی با مقاومت بیشتر و پرداخت شوندگی بهتر نسبت به مس، مورد استفاده قرار می‌گیرند

- به طور کلی برای سیم پیچهای ماشینهای الکتریکی کوچک از سیمهای مسی گرد با روکش عایقی استفاده می شود. هادیهای مستطیلی معمولاً برای ماشینهای کوچک با ولتاژ پائین (تا حد 500 ولت) به کار برده نمی شوند

- برای ساخت تیغه های کموتاتور در موتورهای با کموتاتور ac و dc، نیز مس به کار برده می شود. دلیل این امر اساساً به آن خاطر است که رعایت تلورانس های لازم برای ساخت دقیق، توسط مس امکان پذیر بوده و ضمناً در تماس با جاروبکهای کربنی نیز رفتار خوبی دارد.

# مواد مهندسی برق

## آلیاژهای مس:

- افزودن 1 تا 2/5 درصد بریلیوم به مس، آلیاژی با مقاومت بهتر در برابر فرسایش و خوردگی تولید می کند که می تواند به شکل فنر و نوار درآید. مقاومت چنین آلیاژی بین 3 تا 6 برابر مقاومت مس می باشد و برای ساختن فنرهای حامل جریان و نگهدارنده های جاروبک به کار می رود.
- آلیاژ مس - کادمیوم، شامل 1/1 درصد کادمیوم، خشک تر، سخت تر و دارای نیروی کشش بیشتری نسبت به مس کاملاً کشیده شده هستند. مقاومت آنها نسبت به مقاومت مس کمی بیشتر است، و با شعله لحیم کاری می شوند. مس کادمیوم دار گاهی اوقات برای ساخت تیغه های کموتاتور و میله های قفس روتور به کار برده می شود.
- دیگر آلیازهای مس شامل آلیاژ مس - نقره و آلیاژ برنز (66 درصد مس و 34 درصد روی) است که معمولاً در ماشینهای الکتریکی کوچک به کار برده نمی شوند.

# مواد مهندسی برق

آلومینیوم :

- آلومینیوم سبکتر و ارزان تر از مس می باشد و دمای ذوب پایین تری دارد (برای قالب ریزی ساده تر است).
- رسانایی آلومینیوم خالص فقط در حدود 60 درصد رسانایی مس است
- استحکام مکانیکی کمی دارد و نمی تواند مثل سیمهای نازک و ظریف کشیده شود.

# مواد مهندسی برق

| خواص فیزیکی | مس | آلومینیوم |
|---|---|---|
| وزن مخصوص $\left(g/cm^3\right)$ | ۸/۸۹ | ۲/۷۰ |
| نقطه ذوب $\left(^{o}C\right)$ | ۱۰۸۳ | ۶۵۸ |
| مقاومت مخصوص $\left(\Omega m\right)$ | $۱/۱۷\times۱۰^{-۸}$ | $۲/۸۷\times۱۰^{-۸}$ |
| ضریب دمایی مقاومت در $۳^{o}C$ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۰۰۴ |
| ضریب انبساط خطی در $20^{o}C$ | $۱۷\times۱۰^{-۳}$ | $۲۳\times۱۰^{-۳}$ |
| گرمای ویژه $\left(cal/g^{o}C\right)$ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۹۳ |

# مواد مهندسی برق

- در گذشته استاندارد مشخصات سیمهای آلومینیومی و مسی مورد استفاده در ایالات متحده امریکا، استاندارد **AWG** بوده و در انگلستان از استاندارد **SWG** استفاده می شده است.

- امروزه برای سنجش قطر سیم از استاندارد بین المللی (**IEC 182-1**) استفاده میشود.

دانشگاه علم وصنعت ایران

# مواد مهندسی برق

**مواد عایقی:**

- **مواد عایقی دماهای تحمل پایین تری نسبت به مواد فعال دارند.**
- **کاهش چگالی بارهای الکتریکی و مغناطیسی، گرمای تولید شده و تلفات ماشین را کاهش می دهد، اما این امر اقتصادی نیست.**
- **راه حل بهتر آن است که از مواد فعال، به شکل کامل استفاده شده و در ضمن سیستمهای عایقی و خنک سازی مناسب فراهم شود.**
- **پیشرفتهای اخیر در زمینه صمغهای مصنوعی و مواد پلاستیکی مختلف تاثیر قابل توجهی روی ابعاد ماشینهای الکتریکی داشته است.**

# مواد مهندسی برق

بر طبق استانداردهای بین المللی (IEC 85,1994) مواد عایقی به 7 کلاس (Y, A, E, B, F, H, C) تقسیم بندی می شوند. هر یک از این کلاسها با یک محدوده دمایی، مشخص شده اند:

•کلاس Y تا دمای مجاز 90 درجه سانتی گراد شامل: کاغذ خشک، پنبه یا ابریشم، ترکیب اوره و فرمالدئید، کائوچوی طبیعی محکم و مواد مختلف ترموپلاستیک که نقاط نرم شدگی مشخصی دارند.

•کلاس A تا دمای مجاز 105 درجه سانتیگراد شامل: کاغذ، پنبه یا ابریشم آغشته به روغن یا اندود شده با روغن جلا، یا ورقهای لایه لایه ای که با خشک کردن طبیعی روغنها و صمغها یا فنل فرمالدئید روی هم قرار داده شده اند، فیبرهای سلولزی که به نمک اتری تبدیل تبدیل شده اند، پلی آمیدها و روغنهای آلی مختلف به کار گرفته شده برای روکش سیمها.

•کلاس E تا دمای مجاز 120 درجه سانتیگراد شامل: فنل فرمالدئید و ملامین فرمالدئید که قالب بندی شده و به صورت لایه لایه همراه با مواد سلولزی روی هم قرار داده می شوند، ترکیب پلی وینیل، پلی اورتان، صمغها و روغنهای اپوکسی، تری استات سلولز، تری فتال پلی اتیلن، روغن تبدیل شده به الکید.

# مواد مهندسی برق

•کلاس B تا دمای مجاز 130 درجه سانتی گراد شامل: مواد نرم و انحنا پذیر معدنی (از قبیل میکا، ترکیبات و الیاف سنگ معدن یا شیشه)، که با صمغهای آلی مناسب: قیر مخصوص لاک، الکید، اپوکسی، فنل یا ملامین فرمالدئید آمیخته شده و استحکام یافته اند.

•کلاس F تا دمای مجاز 155 درجه سانتیگراد. مشابه کلاس B اما صمغهای ارائه شده برای این کلاس عبارتند از: الکید، اپوکسی، سیلیکون-الکید، و سایر چیزها.

•کلاس H تا دمای مجاز 180 درجه سانتیگراد. مشابه کلاس B اما با صمغهای سیلیکون، کائوچوی سیلیکون. اخیراً چند ماده دیگر نیز عرضه شده اند که در ذیل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

•کلاس C بالاتر از دمای 180 درجه سانتیگراد. میکا، سنگ معدن، سرامیک، شیشه (به تنهایی یا با چسبها یا صمغهای سیلیکون معدنی)، پلی آمیدها و پلی تترافلور و اتیلن.

# مواد مهندسی برق

**عایق مخصوص هادی:**

- ملزومات اصلی مورد نظر در ماده عایق هادی عبارتند از: نازکی، به کارگیری ساده، مقاومت بالا در برابر سایش و خراشیدگی و البته توانایی تحمل فشارها و تنشهای حرارتی

- امروزه، این ملزومات بوسیله لایه روغن یا لایه روغنهای جلا دهنده مصنوعی مختلف (لعابها ) برآورده می شود.

- سیمهای مستطیل شکل و گرد نیز ممکن است بوسیله لایه های روی هم نوارهای عایق بندی از قبیل نوارهای با الیاف شیشه و نوارهای کاغذ آمید، عایق بندی شوند.

- با این وجود، اغلب ملزومات عایق هادیهای به کار گرفته شده در ماشینهای الکتریکی کوچک بوسیله لعابها برآورده می شود.

# مواد مهندسی برق

**عایق شیار**:

مواد عایق کاری به کار گرفته شده در هر شیار ماشین الکتریکی کوچک را می توان در موارد زیر خلاصه کرد :

۱. لایه پوشش شیار (آستر )
۲. روکش لغزنده (دریچه شیار)
۳. گوه شیار
۴. جدا کننده شیار (واسطه لغزان در سیم پیچی های چند لایه )

- ضمن تامین خواص مکانیکی و حرارتی مورد نیاز، حجم سیستم عایق کاری شیار باید در مینیمم مقدار ممکن نگهداشته شود تا حجم ماده هادی فعال و موثر در شیار بتواند ماکزیمم شود.

# مواد مهندسی برق

**کاغذهای عایقی:**

کلاس A: کاغذهای فشرده را می توان با فشرده سازی و تحت حرارت قرار دادن لایه های مرطوب الیاف پنبه که مشابه سایر کاغذهای الکتریکی پردازش شده، تهیه نمود. این مواد با حداقل ضخامتی در حدود mm 1تولید می شوند. کاغذهای فشرده الکتریکی آغشته با صمغها، به عنوان آستر و روکش های شیار (با ضخامت 5-25mm ) در بعضی از موتورهای کوچک مورد استفاده قرار می گیرند. دمای مجاز این مواد 105 درجه سانتی گراد است اما می توانند برای مدت کوتاه دماهای بسیار بالاتر را نیز تحمل کنند.

کلاس B: ورقه هایی از ماده شبیه پشم مبتنی برتری فتال پلی اتیلن که دارای میل ترکیبی و جذب با عوامل آغشته سازی می باشند که این خاصیتی است که در مواد مرکب به کار رفته در عایق شیار مورد توجه قرار می گیرد. نوارهای این مواد در فرم بافته شده و هنگامی که با لعاب آغشته می‌شود، ممکن است در مرحله آخر و تکمیل کلی سیم پیچی مورد استفاده قرار گیرند.

# مواد مهندسی برق

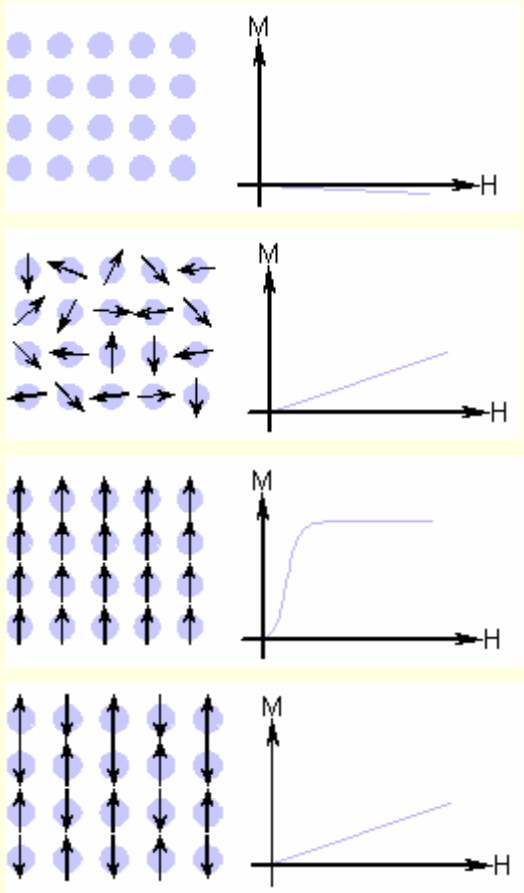
کلاس F: محصول تغلیظ و تراکم یافته گلیکول اتیلن و اسید تری فتالیک، یک لایه پلاستیک است که به عنوان لایه پلی استر شناخته می شود. این لایه خواص حرارتی و مکانیکی فوق العاده ای دارد. لایه های پلی استر خواص خود را تا دمای 175 درجه سانتی گراد حفظ می کنند و دارای شاخص دمای 155 درجه سانتی گراد می باشند.

کلاس H: کاغذهای پلاستیکی مبتنی بر پلی آمید آروماتیک (کاغذ آرامید )، در ابتدا توسط شرکت " Du Pont" تحت نام تجاری NOMEX معرفی و مطرح شدند، که دارای خواص شیمیایی و حرارتی استثنایی بودند.

کلاس C: لایه های پلی آمید در ابتدا توسط شرکت "Du Pont" با نام تجاری KAPTON معرفی و مطرح شدند، که تا دمای 220-240 درجه سانتی گراد خواص فوق العاده ای را ارائه نمودند. لایه های نازک پلی آمید با ضخامت 25 تا 50 میکرومتر هم اکنون به صورت گسترده به عنوان یک ماده کلاس C موجود و قابل دسترسند..

# مواد مهندسی برق

**انواع مواد از نظر مغناطیسی :**



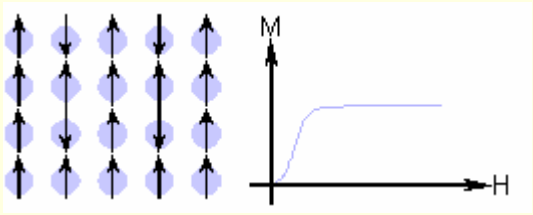

دیامغناطیسها

پارامغناطیسها

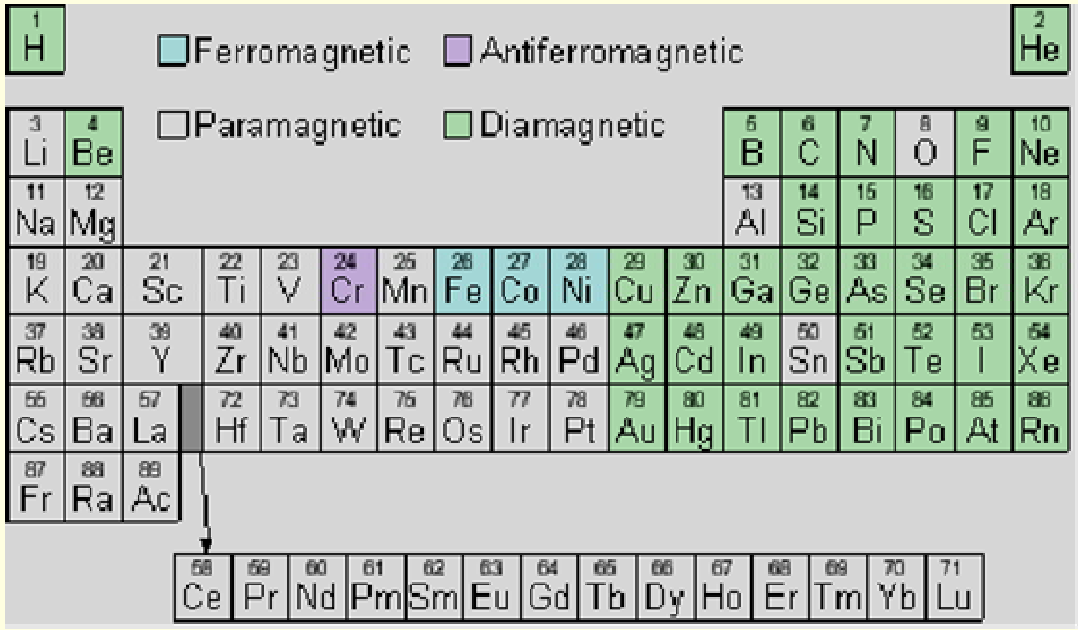
فرومغناطیسها

آنتي فرومغناطیس

# مواد مهندسی برق




فري مغناطيس



# مواد مهندسی برق

## مواد آهنرباي دائم:

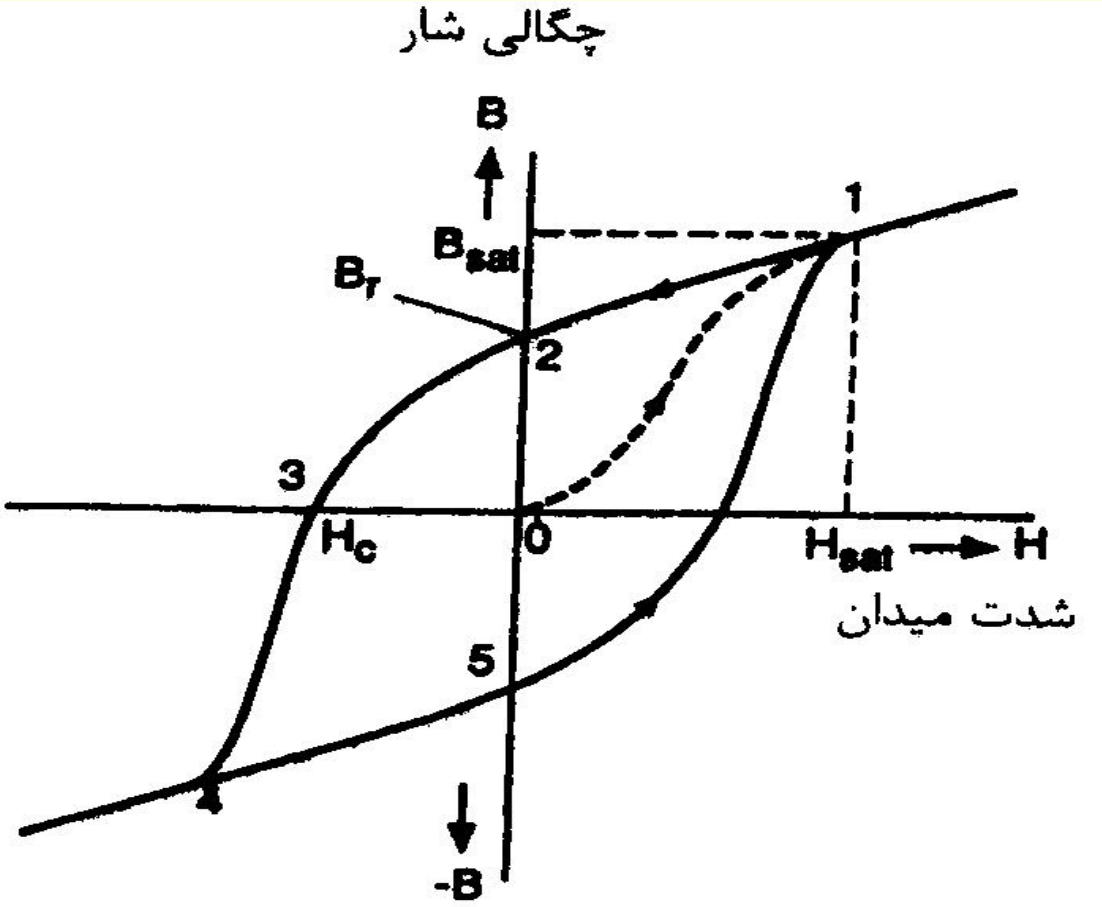
- نقشی که انرژی و میدان مغناطیسی در ماشینهای الکتریکی ایفا می کند قابل مقایسه با یک کاتالیزور در یک واکنش شیمیایی است.
- میدان مغناطیسی از طریق دو نوع آهنربا میتواند ایجاد شود : آهنربای الکتریکی و آهنربای دائم
- هنگامی که میدان مغناطیسی با استفاده از آهنربای الکتریکی ایجاد شود، اگر چه انرژی میدان تحریک همچنان باقی می ماند اما با این حال قدری انرژی، تلفات اهمی جریان تحریک، از بین خواهد رفت
- بخاطر برخی مزایا آهنرباهای دائم در دسته ای از ماشینهای الکتریکی برای ایجاد میدان تحریک، مورد استفاده قرار گیرند.

دانشگاه علم و صنعت ایران

# مواد مهندسی برق

- آهنرباهای دائم در واقع مواد مغناطیسی سخت با حلقه‌های هیسترزیس بزرگ می باشند.
- زمانی که یک ماده آهنربا در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد رفتار چگالی شار با تغییر شدت میدان مغناطیسی در ماده، مبین خواص ماده مغناطیسی ماده میباشد.
- مقدار چگالی شار در نقطه 2 روی حلقه هیسترزیس (H=0) به عنوان چگالی شار باقیمانده یا پسماند ماده آهنربا شناخته شده، و نشان دهنده مقدار شار مغناطیسی است که ماده می تواند تولید کند.
- حلقه هیسترزیس در ربع دوم به عنوان منحنی مغناطیس زدایی نرمال شناخته می شود که مهمترین ناحیه مشخصه آهنربا می باشد.
- مقدار میدان مغناطیسی که در آن چگالی شار در آهنربا به صفر می رسد به عنوان پسماند زدایی یا نیروی پسماند زدا شناخته می شود.

دانشکده مهندسی برق
طراحی ماشینهای الکتریکی/ دکتر ابوالفضل واحدی/ بهار ۸۴
دانشگاه علم وصنعت ایران




شکل ۱-۵ حلقه هیسترزیس آهنربای دائم.

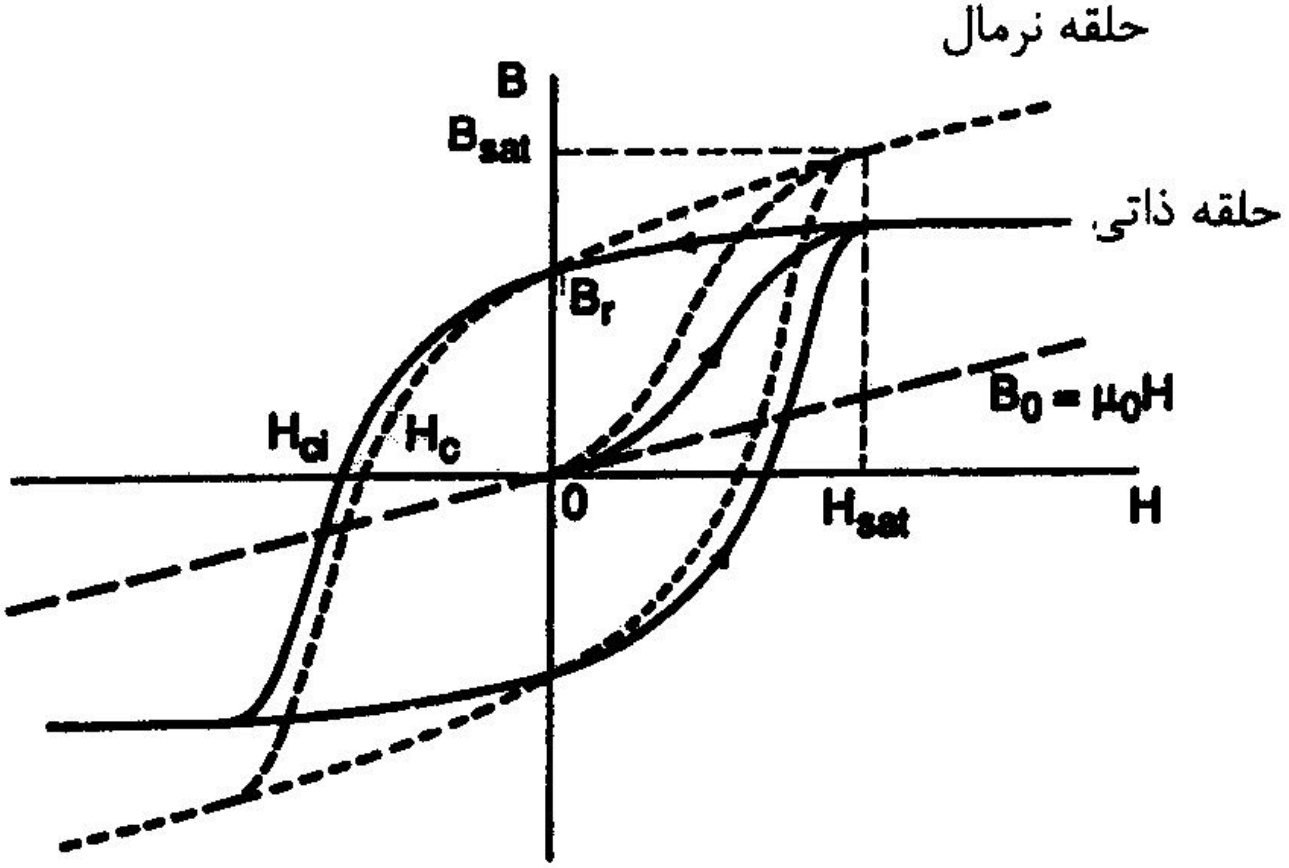
# مواد مهندسی برق

- با نبودن ماده آهنربا بین قطبهای مغناطیسی، باز هم خطوط شار در فاصله هوایی وجود خواهد داشت.
- چگالی شار کل در ماده آهنربا (B) شامل دو مولفه است، یکی برابر $\mu_0 H$ می باشد (که به هر حال در هوا موجود است) و دیگری چگالی شار ذاتی $B_i$ است (متعلق به قابلیت ذاتی ماده برای داشتن شار بیشتر نسبت به آنچه که در فاصله هوایی موجود است با شدت میدان اعمال شده H)
- بطور کلی ما دو منحنی مغناطیس زدایی داریم: نرمال و ذاتی .

$$B_i = B - \mu_0 H$$

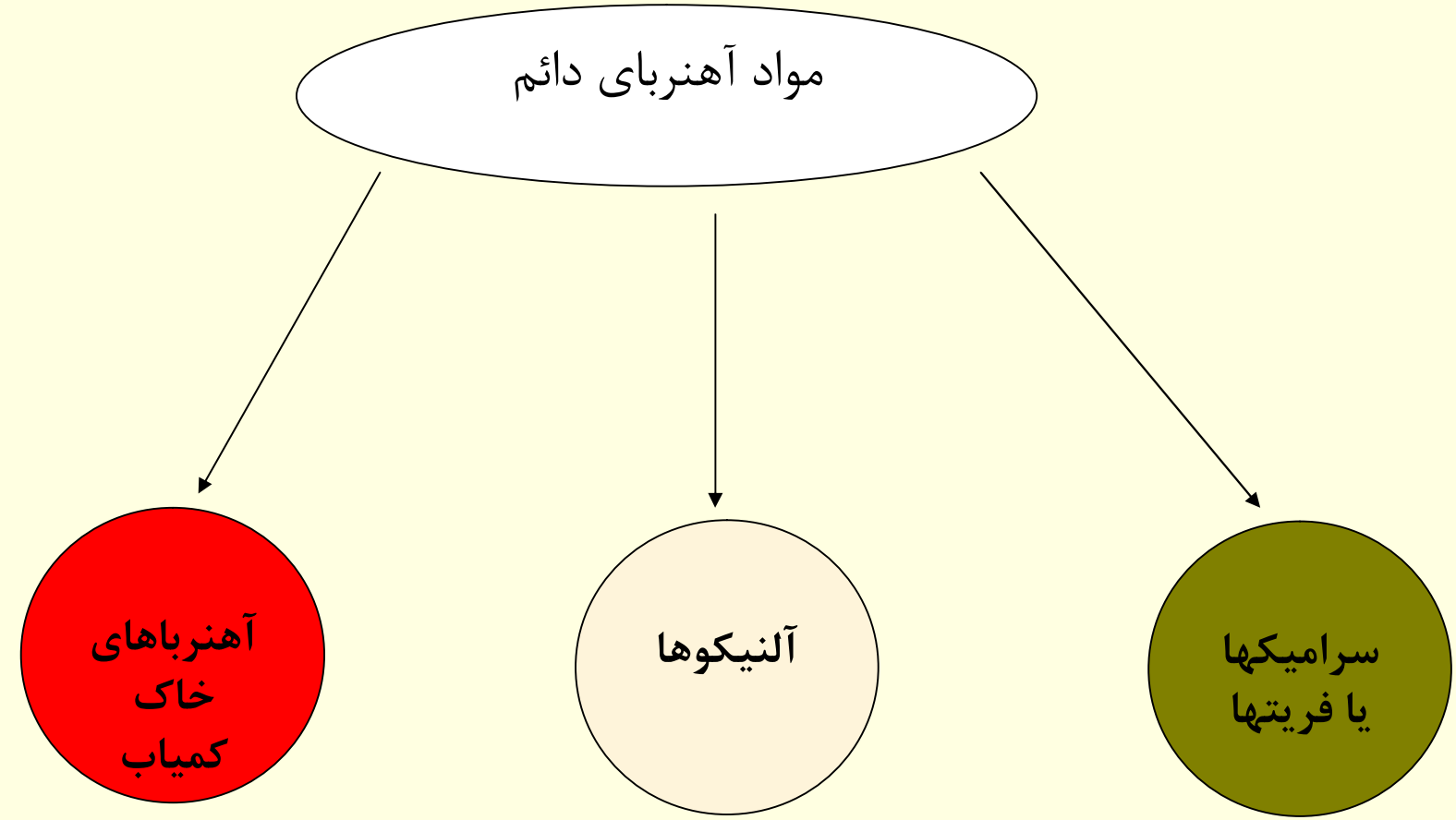
- چگالی شار باقیمانده یا پسماند برای هر دو منحنی مغناطیس زدایی نرمال و ذاتی یکسان است.
- اما پسماند زدایی ذاتی بزرگتر از پسماند زدایی نرمال است. این اختلاف به شیب منحنی مغناطیس زدایی در مجاورت $H_c$ بستگی دارد. هر چه شیب بیشتر باشد، اختلاف کمتر خواهد بود.

# مواد مهندسی برق




شکل ۱-۶ حلقه های هیسترزیس ذاتی و نرمال یک ماده آهنربای دائم.

# مواد مهندسی برق



# مواد مهندسی برق

- فریتها (سرامیکهای کاملاً مغناطیسی) عایقهای حرارتی و الکتریکی هستند در حالی که سایر آهنرباها، هادیهای فلزی می باشند.

- آلنیکوها پسماند نسبتاً زیاد و نیروی پسماند زدای کمی دارند، اما سرامیکها دارای پسماند کم و نیروی پسماند زدای نسبتاً زیادی می باشند، در حالی که در مورد آهنرباهای خاک کمیاب، هر دوی این پارامترها بزرگ می باشد.

- سرامیکها به عنوان مواد خام فراوان و خیلی ارزان مورد استفاده قرار می گیرند. آلنیکوها و آهنرباهای کبالت-خاک کمیاب (کبالت – ساماریوم) از کبالت اما با درصدهای مختلف استفاده می کنند، در حالی که در سرامیکها و آهنرباهای فریت – خاک کمیاب (آهنرباهای نئودیمیوم – آهن – بورون) اصلاً از کبالت استفاده نمی شود.

- خصوصیات مواد آهنربای دائم تابع استاندارد بین المللی IEC 404-8-1 (1986) می باشند.

# مواد مهندسی برق

- بر اساس استاندارد IEC 404-1 مواد آهنربای دائم با یک حرف که همراه آن چند عدد می آید، طبقه بندی می شوند.
- آهنرباهای آلیاژی با حرف R طبقه بندی می شوند، در حالی که سرامیکها با S مشخص می گردند.
- عدد اول نوع ماده را در کلاس مربوطه نشان می دهد. برای مثال R1 آهنرباهای آلنیکو را نشان می دهد وR5 گروه کبالت خاک کمیاب را مشخص می کند. عدد دوم از بین: ( 0) آهنرباهای همگرا، (1) غیر همگرا، (3) پیوند پلیمر همگرا و (4) پیوند پلیمر غیر همگرا تعیین می‌شود.
- عدد سوم به انواع مختلف آهنربای مشابه در یک گروه مربوط می گردد.

# مواد مهندسی برق

## خواص مغناطیسی:

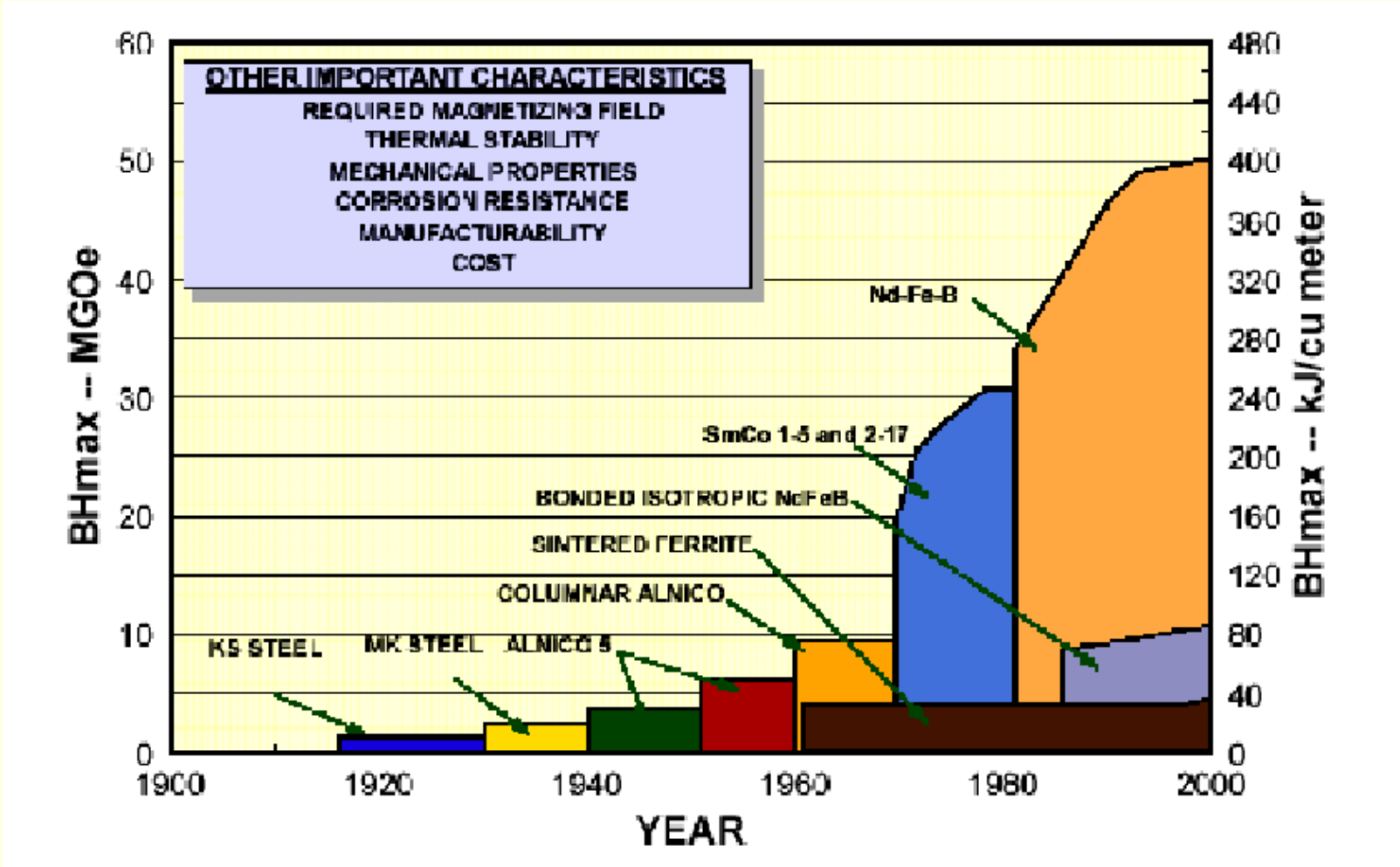
- مناسب ترین پارامتر برای تعیین کیفیت آهنربا، انرژی ماکزیموم آن است که حاصل ضرب میدان مغناطیسی و چگالی شار آهنربا می باشد. این پارامتر بیانگر ماکزیموم انرژی است که می توان از آهنربا بدست آورد.

- وقتی که آهنربا در نقطه حاصل ضرب انرژی ماکزیموم خود کار می کند، ابعاد آن مینیموم می‌باشد.

- پیش از این بهترین آهنرباهای دائم مواد کبالت – خاک کمیاب (ساماریم کبالت) بودند که دارای حاصل ضرب انرژی ماکزیمومی بین 190 – 130 کیلو ژول بر متر مکعب بودند.

- در سال 1984 با ظهور ترکیب نئودیمیوم – آهن – بورون بدون کبالت که انرژی ماکزیموم 290 کیلو ژول بر متر مکعب را داشت، این وضعیت تغییر یافت. سرعت گسترش و پیشرفت این ماده جدید در طول چند سال گذشته بسیار سریع بوده به طوریکه هم اکنون این ماده در ابعاد تجاری از طریق تولید کنندگان آهنربا، قابل دسترسی است.

# مواد مهندسی برق



# مواد مهندسی برق

| مشخصه / آهنربا | $(BH)_{max}$ $(KJ/m^3)$ | $B_r$ (T) | $H_c$ (KA/m) | قیمت واحد |
|---|---|---|---|---|
| Nd-Fe-B | ۲۰۰-۲۹۰ | ۱/۲۰ | ۸۷۰ | ۲/۳ |
| $SmCo_5$ | ۱۳۰-۱۹۰ | ۰/۹۷ | ۷۵۰ | ۵/۷ |
| $Sm_2Co_{17}$ | ۱۸۰-۲۴۰ | ۱/۰۵ | ٦٦۰ | ۵/۱ |
| Alnico | ۷۰-۸۵ | ۱/۱ | ۱۳۰ | ۲/۷ |
| Ceramics | ۲۷-۳۵ | ۰/٤ | ۲٤۰ | ۰/۳ |

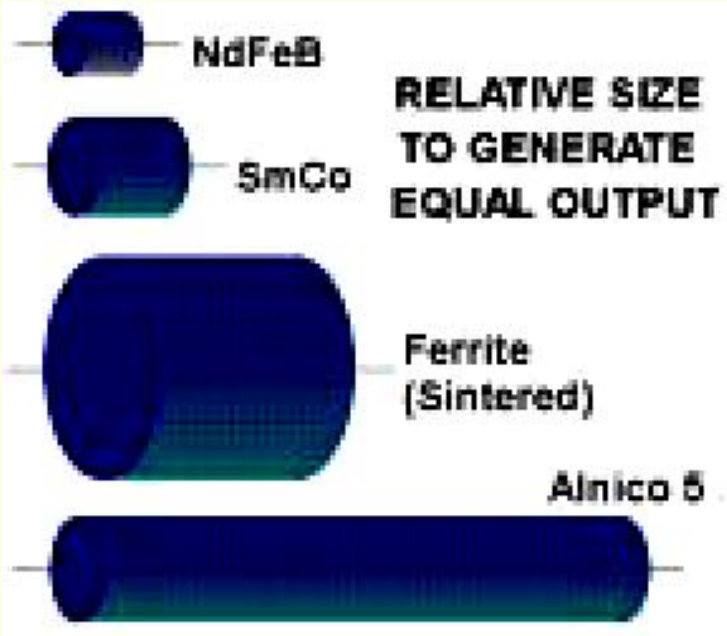
# مواد مهندسی برق

- گر چه در جدول قبل خواص معناطیسی گروههای اصلی مواد آهنربا همراه با قیمت تقریبی هر واحد انرژی آنها، نشان داده شده اما هر گروه از مواد، خود دارای چندین درجه است، بنابراین محدوده وسیعی از حاصل ضرب انرژی ماکزیموم وجود خواهد داشت.

- پسماند و پسماند زدایی برای انواع گروههای به کار گرفته شده در ماشینهای الکتریکی، به صورت مقادیر متوسط داده شده است. خواص انواع مواد نئودیمیوم- آهن- بورون و سرامیکهای استحکام یافته با پلیمر و خانواده آلنیکو که قیمت انرژی پایینی دارند در این جدول مورد مقایسه قرار نگرفته اند.

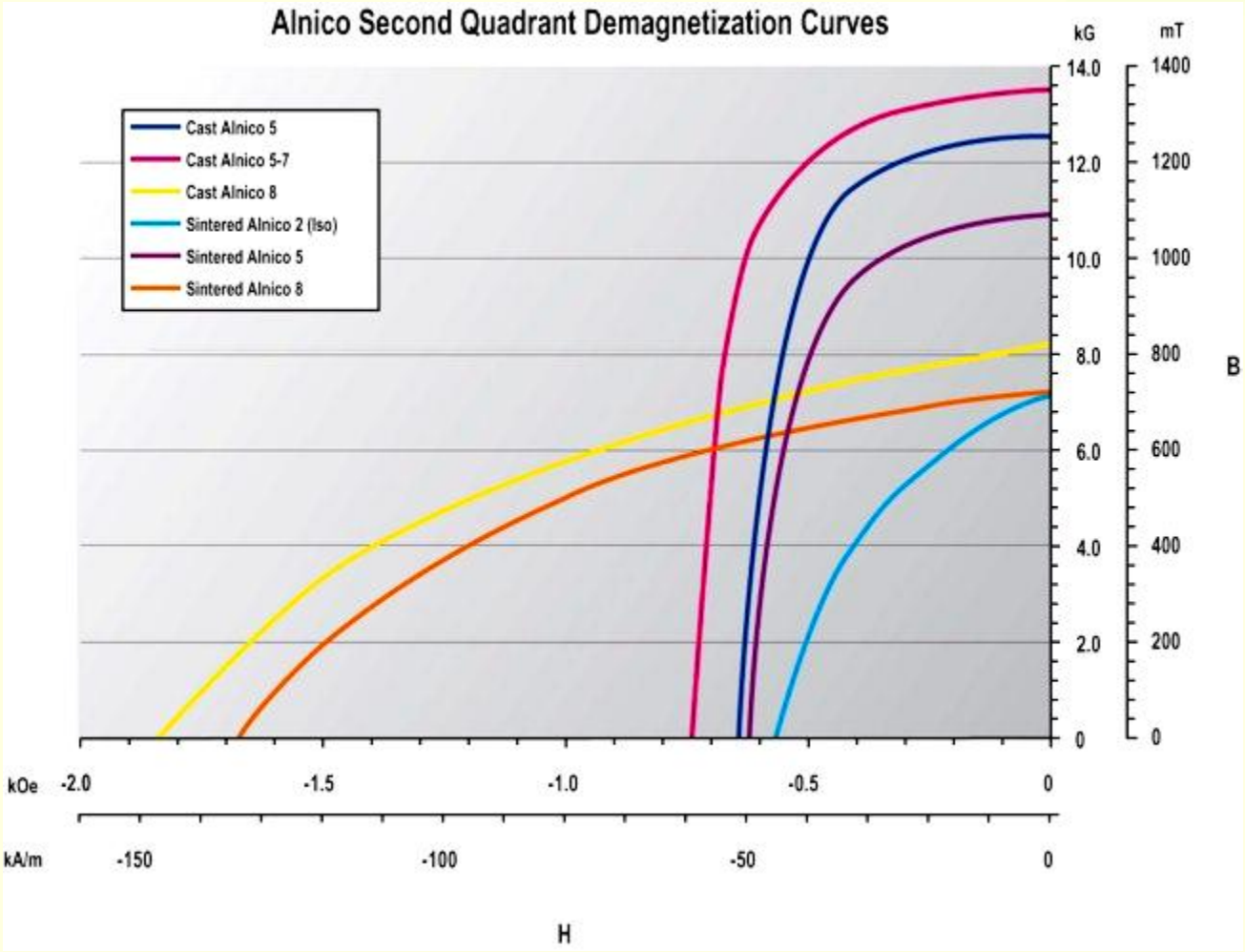
- باید توجه شود که قیمت یک آهنربای دائم عمدتاً به ابعاد، پیچیدگی ماشین کاری لازم بر روی آن، و دقتهای مورد نیاز برای ابعاد و خواص مغناطیسی آهنربا بستگی دارد. بین انواع مواد در هر گروه نیز از نظر قیمت، تفاوتهایی وجود دارد. قیمت هر واحد انرژی که در جدول آورده شده، در واقع قیمت متوسط می باشد و برای مقایسه‌های اولیه می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

# مواد مهندسی برق




مقایسه اندازه انواع آهنرباها
با محتوای انرژی یکسان :

# مواد مهندسی برق



# مواد مهندسی برق

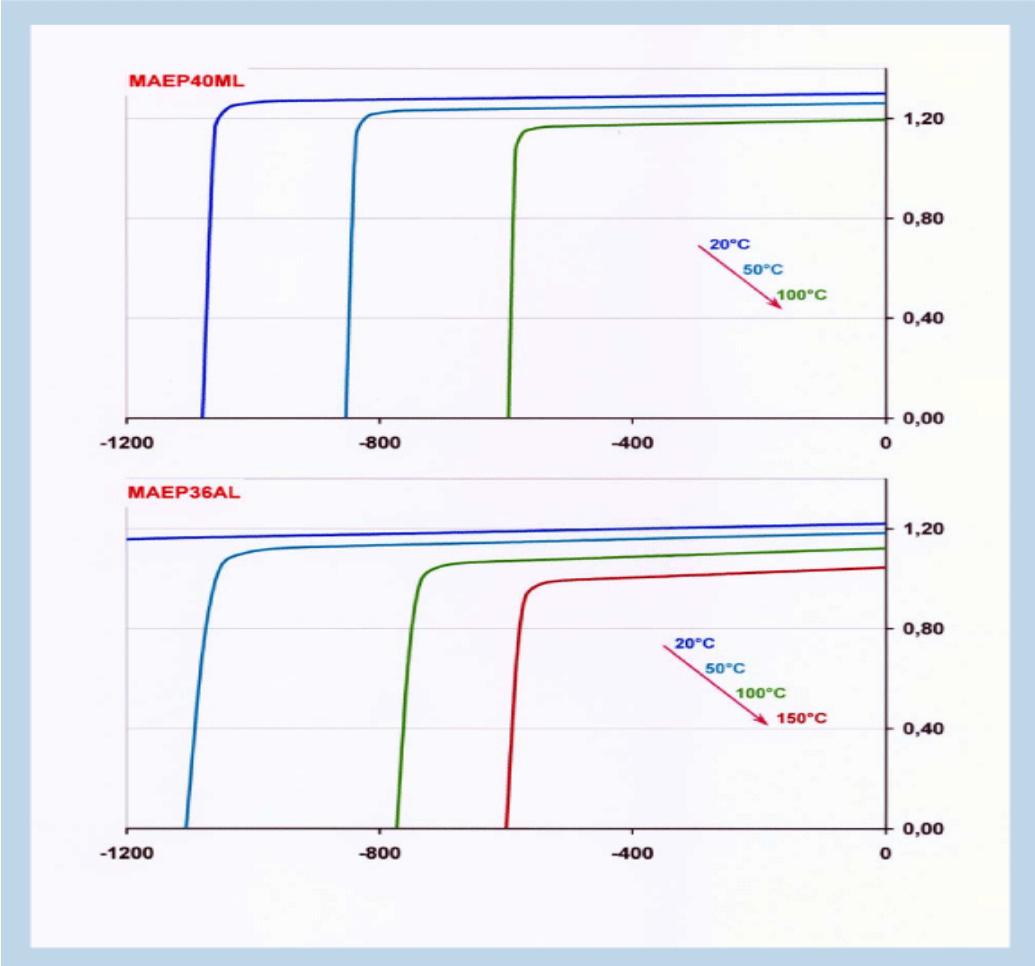
**خواص حرارتی:**

- وقتی دما افزایش می یابد، خواص مغناطیسی قدری کاهش می یابد، که بخشی از آن برگشت پذیر و بخشی برگشت ناپذیر است.
- تغییرات برگشت پذیر در پسماند و نیروی پسماند زدا معمولاً برحسب درصد بر کلوین بیان شده که به ترتیب به کمک ضرایب حرارتی $b$ و $\alpha$ نشان داده می شود.
- تغییرات برگشت ناپذیر توابعی از دما، نقطه کار آهنربا، و شدت میدان مغناطیس زدا می باشند.
- دمای کوری دمای لازم برای از بین بردن کامل خاصیت آهنربایی است. در دمای کوری ماده، هر گونه خاصیت مغناطیسی از بین خواهد رفت، و در دمای کمتر مغناطیس کنندگی مجدد مورد نیاز خواهد بود.

# مواد مهندسی برق

| مشخصه / آهنربا | دمای کوری | $\alpha(\%/K)$ | $\beta(\%/K)$ | ماکزیمم دمای کاری |
|---|---|---|---|---|
| Nd-Fe-B | ۳۱۰ | -۰/۱۳ | -۰/۶۰ | ۱۴۰ |
| *SmCo* | ۷۲۰ | -۰/۰۴۵ | -۰/۲۵ | ۲۵۰ |
| Alnico | ۸۳۰ | -۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۵۰۰ |
| Ceramics | ۴۵۰ | -۰/۲۰ | ۰/۴ | ۳۰۰ |

# مواد مهندسی برق




تغییرات حلقه هیسترزیس با دما برای دو نمونه ماده

# مواد مهندسی برق

- در میان همه مواد آهنربای دائم، سرامیکها ارزان ترین انرژی مغناطیسی را عرضه می نمایند. با این حال حتی آنها نیز در بسیاری از کاربردها که حجم و وزن کم مورد نیاز است، با آهنرباهای Nd-Fe-B جایگزین می شوند.

- مواد Nd-Fe-B با انرژی زیادی که ایجاد می‌کنند، امکان به کارگیری آهنرباهای کوچکتر را فراهم می کنند که این مسئله موجب کاهش اندازه سایر اجزاء ماشین از قبیل قطعات آهن و سیم پیچی و در مجموع، هزینه کمتر میشود.

- همچنین آهنرباهای Nd-Fe-B در مواردی جایگزین SmCo ها شده اند. با این وجود، SmCo در شرایطی که آهنربا در حین کار در معرض میدانهای مغناطیس زدای شدید و در دمای بالا قرار می گیرد، همچنان مورد استفاده واقع می شود.

- با توجه به قیمتهای فعلی آهنرباهای Nd-Fe-B، استفاده از النیکوها در موتورها، در حال کاهش است. با این وجود، آهنرباهای آلنیکو به علت خصوصیت ممتاز ضرایب حرارتی پایین، در وسایل اندازه‌گیری و سنجش کماکان مورد استفاده قرار می گیرند.