

توسعه مواد مهندسی مورد استفاده در ساخت موتورهای الکتریکی

صغری قربانزاده^۱، سیدعلیرضا حسینی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

^۲ استادیار، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

چکیده

با توجه به پیشرفت روز افزون در حوزه ساخت و تولید ماشین ها و موتورهای الکتریکی بحث توسعه مواد مورد نیاز در این زمینه از اهمیت بالایی برخوردار است. انتخاب مواد جدید و پیشرفته با خواص بالاتر در کنار طراحی های جدید می تواند پژوهشگران و صنعتگران را در ساخت موتورهای و ماشین های الکتریکی با کارایی بالاتر کمک نماید. همچنین با توجه به نیاز به تولید موتورهای و ماشین های الکتریکی با سرعت و فرکانس بالاتر، توجه به مواد جدید با ایجاد تلفات کمتر روز به روز بیشتر احساس می شود. مواد پیشرفته مغناطیسی و الکتریکی پیشرفته می توانند با کاهش تلفات باعث افزایش راندمان انرژی در موتورهای الکتریکی شوند. همچنین توسعه آهن رباهای قوی تر می تواند تولید موتورهای با کارایی بالاتر و حجم کمتر را امکان پذیر سازد.

الف) مواد مغناطیسی: شامل مواد مغناطیسی نرم^۱ و سخت^۲

ب) مواد رسانا: سیم پیچ ها^۳

پیشرفت و توسعه در مواد مورد استفاده در این دو دسته در طول زمان باعث افزایش کارایی موتورهای و ماشین های الکتریکی شده است. مواد مغناطیسی با خواص مناسب می تواند تلفات هسته را در موتورهای کاهش دهد و مواد با رسانایی بالاتر در سیم پیچ ها می تواند اتلاف حرارتی در آن را کم کند.

الف) مواد مغناطیسی

مواد مغناطیسی به دو دسته مغناطیس نرم و سخت تقسیم می شوند. مواد مغناطیسی نرم بیشتر در هسته های روتور و استاتور موتورهای الکتریکی استفاده می شوند و مواد مغناطیسی سخت در استاتور استفاده می شوند.

الف-۱) مواد مغناطیسی نرم

مواد مغناطیسی نرم عموماً در هسته های موتورهای و ماشین های الکتریکی استفاده می شوند. این دسته از مواد مغناطیسی به راحتی مغناطیس می شوند و خواص مغناطیسی در آنها براحتی از بین می رود. به بیان دقیق تر، مواد مغناطیسی نرم با میدان های خارجی ضعیف مغناطیس شده و وقتی میدان اعمالی قطع می شود، میزان خاصیت مغناطیسی کمی در آن ها باقی می ماند. ضریب گذردهی^۴ بالا نشان دهنده سهولت مغناطیس شدن این مواد است. همچنین وادارندگی^۵ (H_c) معیاری از میزان میدان مغناطیسی لازم برای کاهش شار مغناطیسی پسماند (B_r) تا صفر، بعد از مغناطیس شدن ماده است. مواد مغناطیسی نرم، دارای H_c پایینی هستند. علاوه بر این مواد مغناطیسی نرم شار مغناطیسی اشباع (B_s) بالا، تلفات انرژی پایین و هیستریزیس مغناطیسی کوچکی را از خود نشان می دهند. در طول زمان مواد مغناطیسی نرم مختلفی برای کاربرد در موتور و ماشین های الکتریکی پیشنهاد شده اند. قیمت پایین، در دسترس بودن،

واژه های کلیدی

موتور الکتریکی، مواد مغناطیسی، مواد رسانای الکتریکی.

مقدمه

پیشرفت صنعتی در قرن های اخیر با ماشینی شدن زندگی بشر تعریف شده است و این مسیر همواره با توسعه در موتورهای و ماشین های الکتریکی همراه بوده است. با پیشرفت هوش مصنوعی و رباتیک شدن صنایع در آینده نزدیک، استفاده از موتورهای و ماشین های الکتریکی بطور فزاینده ای افزایش خواهد یافت. تبدیل انرژی های مکانیکی و الکتریکی به یکدیگر پایه عملکرد این تجهیزات است. در این بین نقش مواد عملکردی مانند مواد مغناطیسی و مواد دارای خواص الکتریکی مناسب در تبدیل انرژی بسیار اهمیت دارد. استفاده از مواد مغناطیسی و الکتریکی با قابلیت های بالاتر می تواند تلفات انرژی را کاهش و راندمان ماشین های الکتریکی را افزایش دهد. علاوه بر این، با پیشرفت در زمینه خودروهای الکتریکی و نیاز به طراحی موتورهای با اندازه کوچک و توان بالاتر، طراحی مواد کاربردی با خواص بالاتر اجتناب ناپذیر است. علاوه بر مواد سازه ای که در ساخت بدنه موتورهای و ماشین های الکتریکی استفاده می شود، مهمترین مواد مورد استفاده در ماشین ها و موتورهای الکتریکی عبارتند از:

¹ Soft

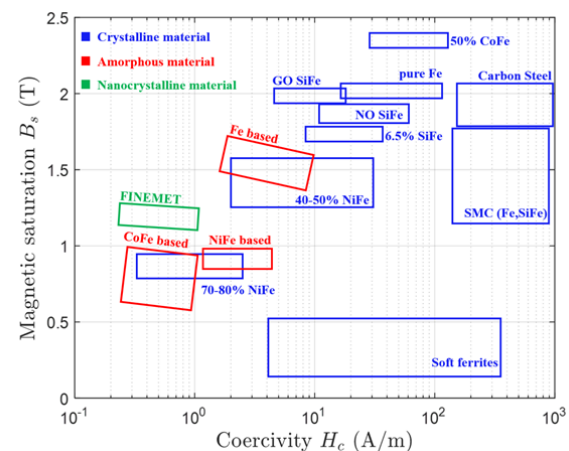
² Hard

³ Windings

⁴ Permeability

⁵ Coercivity

استحکام مناسب، مقاومت به خوردگی و سهولت فرآیند ساخت، فاکتورهایی هستند که در انتخاب مواد مغناطیسی نرم تاثیر گذارند. مهمترین مواد مغناطیسی نرم که در حال حاضر در مقیاس انبوه تولید می شوند شامل آلیاژهای آهنی مانند آهن خالص، فولادهای کم کربن، آلیاژهای آهن-سیلیسیم، آلیاژهای آهن-نیکل، آلیاژهای آهن-کبالت و ترکیبات اکسیدی مانند فریت ها هستند. البته در این بین، مواد جدیدی برای افزایش کارایی، کاهش تلفات و افزایش راندمان موتورهای الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته اند که مهمترین آن ها کامپوزیت های مغناطیسی نرم، آلیاژهای آمورف و ترکیبات نانو ساختار هستند. مواد جدید همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است دارای وادارندگی کوچکتری نسبت به مواد رایج هستند.



شکل ۱: مقایسه شار مغناطیسی اشباع و وادارندگی مغناطیسی مواد مغناطیسی نرم [۱].

آلیاژهای آهنی: برای هسته‌ی موتورها و ماشین‌های الکتریکی در حال حاضر ورق‌های لمینت شده^۱ غیرجهت دار^۲ استفاده می شود. استفاده از این ساختار ورقه‌ای و لایه لایه می‌تواند تلفات هسته را تا حدود زیادی کاهش دهد. این ورق ها پس از عملیات حرارتی آنیل، معمولاً با مواد آلی یا غیر آلی پوشش داده می شوند تا میزان جریان های گردابی نیز در آنها کاهش یابد. بیشترین استفاده از مواد مغناطیسی نرم مربوط ورق های آهن-سیلیسیم غیرجهت دار با خواص مغناطیسی ایزوتروپ است که به میزان ۱۰ میلیون تن در سال گزارش شده است [۱]. این ورق ها معمولاً حاوی ۰/۵-۳/۵ درصد سیلیسیم هستند. افزودن سیلیسیم به آهن ناهمسانگردی مغناطیسی کریستالی را کاهش داده و هدایت الکتریکی را افزایش می دهد. همچنین تلفات ناشی از جریان های گردابی با افزودن سیلیسیم به آهن کاهش می یابد. البته مقادیر زیاد سیلیسیم فولاد را ترد کرده و تولید ورق های نازک را با مشکل مواجه می کند. تحقیقات در زمینه این مواد بر کاهش تلفات در فرکانس و سرعت های بالا در هسته‌ی

موتور متمرکز است. یکی از مسیرهای کاهش تلفات، افزایش درصد سیلیسیم برای افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش اثرات جریان های گردابی است. البته در سال ۱۹۸۸ تاکادا^۳ و همکارانش روشی برای تولید ورق ها آهن حاوی ۶/۵ درصد سیلیسیم با پراکندن سیلیسیم در ورق های آهن حاوی ۳ درصد سیلیسیم به کمک روش رسوب شیمیایی بخار^۴ (CVD) پیشنهاد کردند. راه دیگر برای کاهش تلفات ناشی از جریان های گردابی کاهش ضخامت ورق های آهن-سیلیسیم است. ورقه های آهن-سیلیسیم با ۶/۵ درصد سیلیسیم، از آنجائیکه با ضخامت کمتری قابلیت تولید هستند، تلفات هسته کمتری نسبت به ورق های متداول نشان می دهند. البته این ورق ها تنها برای کاربردهای خاص برای مثال موتورهای با سرعت و فرکانس بالا استفاده شده اند زیرا که فرآیند تولید آن ها که همراه با عملیات CVD است نیازمند هزینه های بالایی است. در سال های اخیر استفاده از ورق های با ضخامت ۰/۱-۰/۲۵ میلیمتری به جای ورق های ۰/۳۵ و ۰/۵۰ میلیمتری استفاده شده است. از آنجائیکه این ورق ها ضخامت کمتری دارند، عملیات نورد بیشتری برای کاهش ضخامت نیاز است و لذا این ورق ها قیمت بالاتری دارند [۲].

آلیاژهای آهن-نیکل نیز توسط آرنولد المن^۵ در سال ۱۹۱۳ معرفی شده اند. وی نشان داد آلیاژهای آهن-نیکل با نیکل بین ۳۰ تا ۹۰ درصد، گذردهی مغناطیسی بالا و H_c بسیار پایینی از خود نشان می دهند. از طرف دیگر میزان B_s آنها به نسبت بقیه آلیاژها کمتر است. در بین آلیاژهای آهن-نیکل، آلیاژ پرملوی^۶ با ۵۰ درصد نیکل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این دسته عموماً، گریدهای موتور یا روتور نامیده می شوند که بمنظور رسیدن به تلفات پایین از آن ها استفاده می شود. ورق های آهن-نیکل برای کاربردهای با اشباع و گذردهی بالاتر از آهن-سیلیسیم استفاده می شوند [۲]. آلیاژهای با ۳۵ تا ۴۰ درصد نیکل گذردهی مغناطیسی کمتری داشته ولی B_s بالایی دارد. استفاده در موتور ابزارهای جراحی و دندانپزشکی و صنایع هوافضا از کاربردهای آلیاژهای آهن-نیکل است.

از آلیاژهای آهن-کبالت که با ترکیب برابر به نام پرمندار^۷ شناخته می شوند در تولید لمینت های ژنراتور و موتورهای هواپیما، زیردریایی، تانک و غیره استفاده می شود. البته برای بهبود شکل پذیری این آلیاژ تا ۲ درصد به آن وانادیم افزوده می شود. به دلیل B بالا، امکان ساخت تجهیزات با وزن و میزان مواد کمتر با استفاده از این آلیاژها امکان پذیر است. این آلیاژ بیشترین میزان B_s را در بین آلیاژهای آهنی مغناطیسی نرم دارند و لذا قابلیت دارند در موتورهای با اندازه کوچک استفاده شوند. البته آلیاژهای پرمندار بعلت قیمت بالای عناصر مورد استفاده در آن، فقط در موتورها و ژنراتورهای خاص که نیاز به

³ Takada

⁴ Chemical vapor deposition

⁵ Elemen

⁶ Permalloy

⁷ Permendur

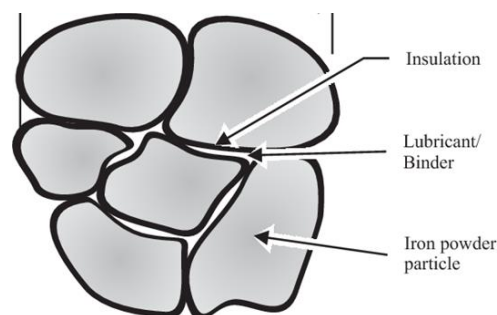
¹ Laminated

² Non-oriented

خروجی بالا در حجم پایین است، از آن ها استفاده نمود. بعضی از این کاربردها، موتورها و سیستم های تولید قدرت هوایی، موتورها و ژنراتورهای چاه های نفتی و موتورهای ورزشی هستند. این آلیاژها همینطور استحکام بالایی نسبت به سایر ورقه های لمینت دارند لذا در هسته موتورها و ژنراتورهای سرعت بالا می تواند استفاده شود.

کامپوزیت های مغناطیس نرم^۱: کامپوزیت های مغناطیس نرم (SMCs) متشکل از ذرات پودرهای فرو مغناطیس نرم که معمولاً از جنس آهن هستند با لایه ای از مواد عایق و پلیمری پوشش داده شده اند (شکل ۲). این کامپوزیت ها برای ساخت موتورهای با هندسه خاص مورد استفاده قرار گیرند. مزیت این مواد نسبت به ورق های فولادی لمینت شده متداول شامل رفتار فرومغناطیسی سه بعدی ایزوتروپ، تلفات جریان گردابی بسیار کم، تلفات هسته کم در فرکانس های متوسط و بالا، خواص حرارتی قابل کنترل و طراحی قابل انعطاف است [۳].

این مواد دارای خواص مغناطیسی خوب و همزمان مقاومت الکتریکی بالایی هستند. لذا استفاده از کامپوزیت های مغناطیسی نرم جایگزین با ورق های آهنی می تواند تا حد زیادی تلفات هسته را بخصوص در فرکانس های بالا کاهش دهد. تلفات هیستریزیس در کامپوزیت ها زیاد است ولی تلفات بسیار پایین ناشی از جریان های گردابی می تواند اثر آن را جبران نماید [۴].



شکل ۲: ساختار کامپوزیت های مغناطیس نرم.

مواد مغناطیسی آمورف: در سال ۱۹۶۰ اولین آلیاژ آمورف توسط پروفسور دوز^۲ و دیگران در موسسه تحقیقاتی کالیفرنیا با سرمایش سریع آلیاژ Au-Si از حالت مذاب کشف شد. آلیاژهای آمورف بسیار شناخته شده Fe-Si-B که امروزه به عنوان آلیاژ مغناطیسی نرم آمورف استفاده می شود در دانشگاه توکیو توسط پروفسور ماسوموتو^۳ تولید شد. مهمترین مشخصه ی مواد مغناطیسی آمورف که شیشه های فلزی^۴ هم نامیده می شوند، تلفات بسیار کم آن ها است که ناشی

¹ Soft Magnetic Composites

² Duwez

³ Masumoto

⁴ Metallic glass

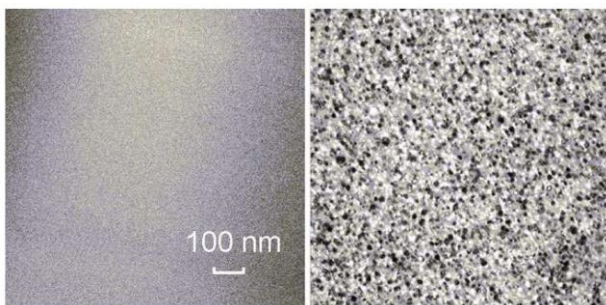
از ضخامت پایین ورقه های تولیدی است. ضخامت این تولیدات حدود ۲۵ میکرون است. برخلاف ورق های لمینت آهنی که با روش های نورد سرد و گرم تولید می شوند، مواد آمورف فلزی معمولاً به روش ریسنجی مذاب^۵ تولید می شوند که هزینه های تولید کمتری را نیاز دارند. از آنجاییکه مواد آمورف با فرآیندهای انجماد سریع تولید می شوند، ساختار غیرکریستالی دارند. این مواد چون ساختار کریستالی مشخصی ندارند، انیزوتروپی مغناطیسی کمی نیز از خود نشان می دهند. همچنین این مواد ضریب گذردهی مغناطیسی بالایی دارند، زیرا قفل شدن دیواره دومین های مغناطیسی در آن ها کمتر اتفاق می افتد. علاوه بر این، مقاومت الکتریکی مواد آمورف بیشتر از حالت کریستالی است.

یکی از مهمترین مزایای این ترکیبات، تلفات کم در فرکانس های بالا است و این یکی از دلایلی است که چنین موادی برای ماشین های الکتریکی با سرعت و فرکانس بالا مورد توجه هستند. هنگامیکه آلیاژهای آمورف در حین انجماد سریع ساخته می شوند، یک لایه اکسیدی نازک نانومتری روی سطح آن ها تشکیل می شود. در نتیجه نیاز به اعمال پوشش عایق برای استفاده در ورق های لمینت در هسته موتور و ترانسفورماتورها نیست. در میان مواد مغناطیسی نرم مورد استفاده در موتورها، کمترین میزان تلفات هسته برای ورقه های آمورف آنیل شده مشاهده شده است. به ترتیب افزایش تلفات هسته برای مواد مغناطیس نرم به ترتیب عبارتند از: آلیاژهای آمورف آنیل نشده، پرملوی PB با ترکیب 50%Ni-Fe، ورق های 6.5%Si-Fe، پرمندار با ترکیب 48%Co-2%V-Fe و آلیاژهای آهن-سیلیسیم رایج مانند 35A300 [۲].

اگرچه بیش از ۹۰ درصد از میزان استفاده آلیاژهای آمورف در ترانسفورماتورهای توزیع برق است، اما استفاده از این نوع مواد در طراحی موتورهای الکتریکی هم آغاز شده است. در سال های اخیر استفاده از مواد مغناطیسی آمورف برای ساخت موتورهایی با بازده انرژی بالا مورد توجه قرار گرفته اند، با توجه به اینکه قیمت آن ها با لمینت های آهن-سیلیسیم رایج تفاوت چندانی ندارد. البته ورقه های مواد آمورف ترد هستند و خواص مکانیکی مناسبی برای استفاده در هسته های موتور ندارند. بدین منظور از یک فرآیند آغشته سازی با رزین های اپوکسی یا اکریک در خلاء استفاده می شود تا استحکام مکانیکی آن ها افزایش یابد. ضخامت اسمی لایه های آمورف ۰/۰۲۵ میلیمتر و سختی آن حدود ۹۰۰ ویکرز است که به ترتیب ۵ و برابر ورق های لمینت آهن-سیلیسیم است.

تولید و شکل دهی آلیاژهای آمورف برای هسته موتور هنوز یک چالش برای استفاده از این آلیاژها در موتورهای الکتریکی است. هرچند که از ابزارهای کاربیدی برای برش آن ها می تواند استفاده شود. همچنین در موتورهای با هندسه ساده استفاده از آلیاژهای

⁵ Melt spinning



شکل ۳: ساختار آلیاژ آمورف $\text{Fe}_{82}\text{Cu}_1\text{Nb}_1\text{Si}_4\text{B}_{12}$ قبل (سمت چپ) و بعد از عملیات آنیل در دمای 450°C درجه سانتیگراد (سمت راست) [۲].

آلیاژهای نانوساختار فاینمت تلفات هسته پایین‌تری نسبت به سایر مواد مغناطیسی نرم دارند. لذا برای کاربرد در موتورهای الکتریکی می‌توانند بسیار فوق‌العاده باشند. برای یک نوع موتور که در هسته استاتور آن از این آلیاژها استفاده شده است، ۷۰ درصد کاهش تلفات هسته و افزایش ۶ درصدی راندمان انرژی موتور نسبت به ورقه‌های آهنی گزارش شده است [۲]. همچنین این مواد گذردی و شار اشباع بالاتری نسبت به مواد آمورف از خود نشان می‌دهند.

الف-۲) مواد مغناطیسی سخت

مواد مغناطیسی سخت موادی هستند که وقتی در معرض میدان‌های قوی مغناطیسی قرار می‌گیرند، خاصیت مغناطیسی زیادی در آنها باقی می‌ماند. این مواد معمولاً H_c بسیار بالا در حد چند صد تا چند هزار ارستد (Oe) دارند و به عنوان آهن رباهای دائمی محسوب می‌شوند. مواد مغناطیسی سخت در ساخت استاتور در موتورها و ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شوند. $BH_{\max}$ یک معیار برای قابلیت آهن‌رباها است و یک آهنربای دائمی قوی بایستی H_c و B_r بالایی داشته باشد. علاوه بر این، مواد مغناطیسی سخت مورد استفاده در موتورها بایستی خواصی از قبیل هیستریزیس مربعی، وابستگی کم B_r و H_c نسبت به دما، مقاومت الکتریکی بالا برای کاهش حرارت ناشی از جریان گردابی و تافنس مکانیکی بالا داشته باشند. شکل ۴ قابلیت مواد مغناطیسی سخت مختلف را نشان می‌دهد.

آمورف عملی‌تر است. چالش کلیدی دیگر شامل سطح اشباع مغناطیسی کم آن‌ها است. در سال ۱۹۷۵ کیکوچی^۱ و همکارانش یک آلیاژ Co-Fe-Si-B با گذردی مغناطیسی بالا معرفی کردند. همچنین در سال ۱۹۸۸ یوشیزاوا^۲ و همکارانش با افزودن مس و نیوبیوم به آلیاژ Fe-Si-B ماده مغناطیسی نانوساختاری را توسعه دادند که چگالی شار مغناطیسی اشباع بالایی داشت. همچنین ماکینو^۳ و همکارانش با افزودن مس و فسفر به آلیاژ Fe-Si-B با درصد آهن بیشتر، کوئچ کردن، سپس تشکیل بافت نانو کریستالی همگن به چگالی شار مغناطیسی بالا و قابل مقایسه با ورق‌های آهن-سیلیسیم و تلفات مغناطیسی کمتر دست یافتند [۲].

مواد نانوساختار: طبق استاندارد ISO مواد نانوساختار موادی هستند که یکی از خصوصیات آن‌ها در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. حالا اگر اندازه دانه در ماده ای زیر ۱۰۰ نانومتر باشد به آن نانوکریستالی گفته می‌شود. بخاطر اندازه نانومتری دانه‌ها در مواد نانوساختار، این کسری زیادی از اتم‌ها در این مواد در نزدیکی عیوب مثل مرز دانه‌ها، عیوب نقطه‌ای و خطی قرار می‌گیرند که این امر سبب ایجاد خواص مغناطیسی غیرمعمول می‌شود. آلیاژ فاینمت^۴ شامل ترکیب Fe-Si-B-Nb-Cu در سال ۱۹۸۸ توسط یوشیزاوا و همکارانش بر همین اساس معرفی شده است. در این ترکیب، خواص مغناطیسی نرم فوق‌العاده با تشکیل ساختارهای نانوکریستالی قابل دستیابی است. سپس آلیاژهای نانو کریستالی مانند سری Fe-Zr-B ، سری Fe-Si-B-Cu و سری Fe-Si-B-P-Cu توسعه یافتند. آلیاژهای نانوکریستالی Fe-Si-B-Nb-Cu با انجام عملیات آنیل روی آلیاژ آمورف Fe-Si-B-Nb-Cu در دماهای بالاتر از دمای تبلور بدست می‌آیند. خوشه‌های غنی از مس در طی فرآیند آنیل در فاز آمورف شکل می‌گیرد. سپس، کریستال‌های بسیار کوچک Fe-Si با ساختار bcc در نواحی غنی از مس می‌توانند جوانه‌زنی کنند. در ادامه با کاهش غلظت آهن زمینه و افزایش Nb باقیمانده، فاز آمورف باقیمانده پایدار شده و رشد دانه‌های کریستالی کنترل می‌شود. بنابراین، یک آلیاژ نانوکریستالی با اندازه دانه یکنواخت بدست می‌آید که در شکل ۳ نشان داده شده است. رسیدن به آلیاژهای نانوساختار با عملکرد بالا نیازمند مکان‌های جوانه زنی زیاد و همگن و همچنین کنترل رشد دانه‌ها است.

¹ Kikuchi

² Yoshizawa

³ Makino

⁴ FINEMET

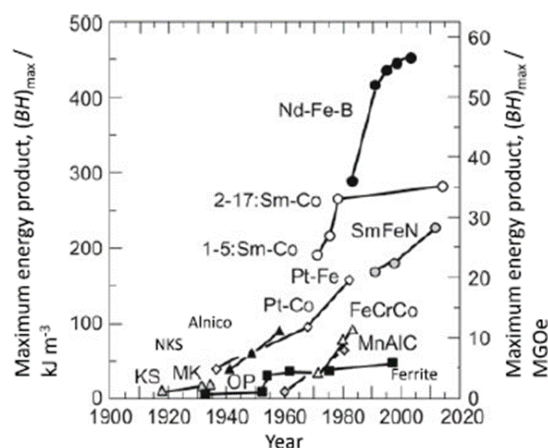
ترکیب Nd-Fe-B: آهنرباهای Nd-Fe-B در سال ۱۹۸۳ توسط ساگاوا^۵ و همکارانش توسعه یافته اند که در حال حاضر یکی از بهترین آهنرباهای دائمی هستند. ساخت این مواد یک نقطه عطف در تولید آهن رباها بود و از تمام آهن رباهای زمان خود مانند ترکیبات ساماریم (Sm) و کبالت (Co) بسیار خواص بهتری نشان می دادند. نکته مهم در رابطه با این نوع آهن ربا اینکه از Nd و Fe تشکیل شده که از نظر منابع معدنی نسبت به Sm و Co در دسترس تر هستند و محدودیت کمتری دارند. خواص مغناطیسی عالی Nd-Fe-B به حضور فاز کریستالی Nd₂Fe₁₄B با ساختار تتراگونال برمی گردد. کاهش اندازه کریستال های فاز زمینه و افزودن عناصر Dy و Tb باعث افزایش Hc بخصوص در دماهای بالا می شود. کاهش تخلخل قطعات آهن ربا و افزایش حجم فاز اصلی Nd₂Fe₁₄B برای افزایش B_r آن ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

با آنکه این ترکیب سی سال است که معرفی شده است تحقیقات برای افزایش کارایی و رفع محدودیت های منابع آن همچنان در حال انجام است. این مواد دارای بیشترین کارایی را نسبت به سایر محصولات آهنربایی صنعتی دارا می باشند. این ترکیبات نه تنها خواص مغناطیسی بسیار خوبی دارند، بلکه تولید انبوه آن ها نیز کاملاً قابل انجام است. روش های صنعتی مختلفی برای ساخت این مواد استفاده می شود که روش های متالورژی پودر و تفجوشی، قطعات با کیفیت بالاتر و تولید راحت تر را بخصوص برای ساخت موتورهای با کارایی بالا بدست می دهد. این مواد در کاربردهای مینیاتوری و ساخت موتورهای راندمان بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. آهنرباهای تفجوشی شده Nd-Fe-B در کاربردهایی که نیاز به قطعات مینیاتوری با توان و راندمان بالا است مانند موتورهای سیم پیچ صدا در درایوهای سخت کامپیوتر، دستگاه های صوتی، موتورهای کمپرسورهای دستگاه های تهویه، موتورهای وسایل نقلیه برقی و خودروهای هیبریدی بسیار استفاده می شوند.

البته این ترکیبات مقاومت به خوردگی ضعیفی بخصوص در دماهای بالا دارند و لذا انجام عملیات سطحی برای قطعات مورد استفاده در دما و رطوبت بالا اهمیت دارد. بسته به شرایط محیطی، روش ها مختلفی شامل آبکاری، روش های فاز بخار و پوشش با رزین های پلیمری روی این قطعات، نیاز است تا انجام گیرد.

(ب) مواد رسانا

علاوه بر مواد مغناطیسی، مواد رسانای الکتریکی هم در کارایی موتورها و ماشین های الکتریکی نقش اساسی دارند. مهمترین استفاده از مواد رسانای الکتریکی در موتورها و ماشین های الکتریکی به ساخت سیم پیچ در این تجهیزات مربوط می شود. استفاده از مواد رسانایی بالا، قیمت معقول و وزن پایین می تواند با کاهش تلفات حرارتی اثر مثبتی بر کارایی موتورهای الکتریکی داشته باشد.



شکل ۴: مقدار حداکثر BH_{max} برای آلیاژهای مغناطیسی سخت [۲].

اولین ماده مغناطیسی سخت ساخته بشر در اوایل قرن بیستم، با نام فولاد KS با ترکیب ۳۰-۴۰ درصد آهن، ۵-۹ درصد کبالت، ۳-۱/۵ درصد کروم و ۰/۴-۰/۸ درصد کربن توسط دانشمندان ژاپنی هوندا^۱ و تاکاگی^۲ در سال ۱۹۱۷ معرفی شد. این ترکیب بعدها با ترکیب فولاد MK که آلیاژ Fe-Ni-Al است، جایگزین گردید. در سال ۱۹۳۴ هوندا و همکارانش فولاد NKS را توسعه دادند که آلیاژ Fe-Ni حاوی کبالت و تیتانیوم است و BH_{max} آن حدود ۱۶ KJ/m³ است. تولید این آلیاژ راه را برای تولید آهنرباهای آلنیکو (AlNiCo) باز کرد. آهنرباهای دائمی که در حال حاضر بیشترین کاربرد را دارند آهنرباهای فریت سخت و آهنرباهای ترکیب Nd-Fe-B هستند. آهنرباهای فریت، BH_{max} کمی دارند اما از نظر قیمت بسیار بصره هستند و در حال حاضر بیشترین حجم تولیدی آهنرباها را از آن خود دارند. از آهن رباهای Nd-Fe-B نیز به طور گسترده در بسیاری از کاربردها بخاطر قابلیت مغناطیسی بالای آنها استفاده می شود و هنوز از بهترین آهنرباهای دائمی هستند. برای مثال BH_{max} برای فولاد KS مقدار ۷/۶ KJ/m³ و در حالی که برای آهنرباهای Fe-Nb-B این مقدار حدود ۶۰ برابر فولاد KS است [۲].

ترکیبات فریتی: آهنرباهای فریتی توسط کاتو^۳ و تاکاگی^۴ از مخلوط پودرهای اکسیدی آهن و کبالت با ترکیب CoFe₂O₄ معرفی شد. البته بعدها ترکیب MO₆Fe₂O₃ توسعه یافت که در آن فلز M یکی از عناصر باریم و یا استرانسیم است. بخاطر مواد اولیه ارزان و پایداری شیمیایی بالا، این ترکیب یکی از اقتصادی ترین و پر استفاده ترین مواد به عنوان آهن ربا هستند.

¹ Honda

² Takagi

³ Kato

⁴ Takei

⁵ Sagawa

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

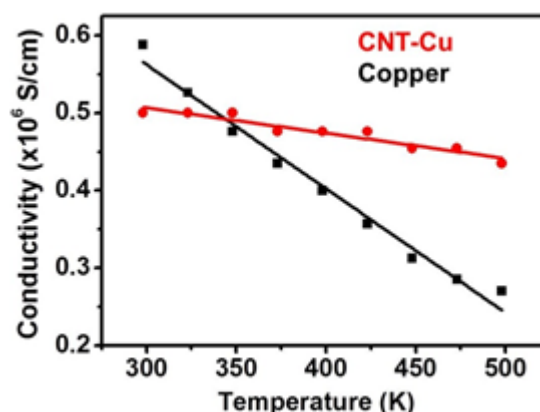
با مینیاتوری شدن تجهیزات، نیاز به موتورهای با توان بالا، افزایش سرعت و فرکانس موتورها و ماشین‌های الکتریکی بحث توسعه مواد مغناطیسی و الکتریکی در سالیان اخیر از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. افزایش کارایی مواد رایج و توسعه مواد جدید می‌تواند باعث کاهش تلفات و افزایش راندمان موتورها گردد. در این بین در حوزه مواد مغناطیسی نرم توسعه مواد آمورف و نانوساختار می‌تواند تا حد زیادی نیازهای آینده در تولید موتورهای با حجم کم و کارایی بالا را تامین کند. همچنین در بخش مواد مورد استفاده در سیم پیچ‌ها استفاده از نانولوله‌های کربنی نیز می‌تواند مشکلات تلفات موتور را در دماهای بالا مرتفع نماید.

مراجع و منابع

- [1] Krings, A., Boglietti, A., Cavagnino, A., & Sprague, S. (2017). Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(3), 2405–2414.
- [2] Fujisaki, K. (2019). Magnetic Material for Motor Drive Systems (K. Fujisaki, ed.).
- [3] Pošković, E., Ferraris, L., Franchini, F., & Grande, M. A. (2019). The effect of particle size on the core losses of soft magnetic composites. AIP Advances, 9(3).
- [4] Shokrollahi, H., & Janghorban, K. (2007). Soft magnetic composite materials (SMCs). Journal of Materials Processing Technology, 189(1–3), 1–12.
- [5] Widmer, J. D., Martin, R., & Mecrow, B. C. (2015). Pre-compressed and stranded aluminium motor windings for traction motors. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 1851–1857. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2015.7409316>
- [6] El-Refaie, A. M. (2017). Role of advanced materials in electrical machines. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 3(2), 1–6.
- [7] Subramaniam, C. et. al., (2013), One hundred fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube–copper composite, Nat. Commun., vol. 4, pp. 1.

سیم پیچ‌های آلومینیمی: استفاده از مس بدلیل هدایت الکتریکی عالی بخصوص در شدت جریان بالا که باعث کاهش تلفات در سیم پیچ‌ها می‌شود، از اهمیت بالایی بخصوص در تولید موتورهای DC برخوردار است. استفاده از آلومینیم به جای مس در سیم پیچ بخصوص در صنایعی که حجم تولید بالا و هزینه‌های کم مد نظر است، پیشنهاد شده است. لذا این نوع سیم پیچ‌ها در صنایعی مانند اتومبیل‌سازی و موتورهای مربوط به آن می‌تواند توجیه پذیر باشد [۵]. از جمله مزایای سیم پیچ‌های آلومینیمی وزن پایین‌تر آن (یک سوم مس) است که برای کاربردهایی که کاهش وزن اهمیت دارد، می‌تواند بسیار موثر باشد. همچنین قیمت جهانی آلومینیم یک سوم قیمت مس است و لذا در یک حجم یکسان تولید هزینه‌ها نسبت به سیم پیچ‌های مسی تا یک نهم می‌تواند کاهش یابد. همچنین ظرفیت حرارتی آلومینیم دو برابر مس است که در شرایط بارگذاری خارج از محدوده، می‌تواند با کنترل بهتر دمای سیستم اثرگذار باشد. علاوه بر این، امکان بازیافت بهتر آلومینیم همراه با قطعات فولاد بدنه در برابر مشکلات بازیافت قطعات فولادی حاوی مس از مزایای دیگر استفاده از سیم پیچ‌های آلومینیمی است.

نانولوله کربنی: یکی از مواد پیشرفته که هدایت الکتریکی قابل توجهی دارد، نانولوله‌های کربنی (CNT) هستند. در یک پژوهش اخیر، کامپوزیت رسانای CNT-Cu به عنوان جایگزینی برای مس ارائه شده است. بطور کلی کامپوزیت کردن مواد باعث کاهش هدایت الکتریکی در دمای اتاق خواهد شد. اما نتایج نشان می‌دهد هدایت الکتریکی این کامپوزیت حساسیت کمتری به دما دارد [۶]. همانطور که در شکل ۵ مشخص است هدایت الکتریکی این کامپوزیت در دماهای بالاتر از ۸۰ درجه سانتیگراد از مس خالص نیز بهتر است. ظرفیت حمل جریان در این رساناها ۱۰۰ برابر مس است و لذا باعث افزایش توان ماشین‌ها خواهد شد [۷].



شکل ۵: هدایت حرارتی مس و کامپوزیت مس- نانولوله کربنی در دماهای مختلف [۷].

