بنام خدا

۹۶۱۶۱

دانشگاه شیراز

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد
(گرایش شناسایی و انتخاب مواد)

بررسی خواص مغناطیسی آلیاژ NdFeB تولید شده به روش ریسندگی مذاب

توسط

اردلان ورهرام

استاد راهنما:

دکتر برزگر

۱۳۸۷/۴/۳۰

خرداد ماه ۱۳۸۶

۹۶۱۶۱

به نام خداوند جان و خرد

بررسی خواص مغناطیسی آلیاژ NdFeB تولید شده بروش Melt Spinning

به وسیله :

اردلان ورهرام

پایان نامه
ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی
از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته :

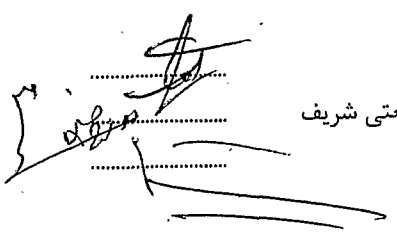
مهندسی مواد

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:
دکتر عبدالغفار برزگر، استادیار بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز
دکتر حمید رضا مداح حسینی، دانشیار دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف
دکتر ابولقاسم دهقان، دانشیار بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز



خرداد ۱۳۸۶

"تقدیم به وجود پر مهر مادر عزیزم و پدر و گرانقدرم"

بزگوارانی که در نهایت گذشت و فداکاری، شرایط رشد و تحصیل مرا مهیا ساخته و همواره در سختی ها و مشکلات یاور و پشتیبان من بوده اند. امید که بدینوسیله ذره ای از زحمات ایشان را جبران و رضایت خاطرشان را جلب کرده باشم.

سپاس گذاری

در اینجا بر خود لازم می دانم از راهنمایی های ارزشمند و مساعدت های همه جانبه استاد ارجمندم جناب آقایان دکتر مداح حسینی و دکتر جانقربان ، که در تمامی مراحل این پژوهش همواره یاری رسان این جانب بوده و بدون مساعدت های ایشان به سر انجام رساندن این رساله میسر نبوده است و لازم به ذکر است که کلیه پژوهش زیر نظر مستقیم ایشان صورت گرفته است، تشکر و تقدیر نمایم. و از مشاوره های ارزنده جناب آقای دکتر برزگر که علارقم ضیق وقت این رساله را مطالعه کرده و نظرات مفیدی در ارائه این پژوهش داشته اند کمال امتنان را دارم. در طی انجام این پژوهش ، همکاری و همفکری کلیه اعضای مرکز پژوهش متالورژی رازی و دانشگاه صنعتی شریف انجام هرچه بهتر این پروژه را میسر نموده که از تمامی این عزیزان سپاس گزارم.

چکیده

بررسی خواص مغناطیسی آلیاژ NdFeB تولید شده بروش ریسندگی مذاب

به وسیله:

اردلان ورهرام

در این پژوهش به بررسی خواص مغناطیسی آلیاژ NdFeB تولید شده بروش ریسندگی مذاب(Melt Spinning) و رابطه آن با تغییر نسبت عناصر و ریز ساختار پرداخته شده است. بدین منظور چهار آلیاژ با در صد های مختلف عناصر در نظر گرفته شده است. چهار آلیاژ مذکور بصورت آماده و بشکل پودر های آمورف در اختیار بوده است. این آلیاژها بعد از آنالیز ابتدایی با EDX ، در کوره قوسی با اتمسفر محافظت شده ذوب مجدد شده است. شمش ها بعد از تولید و آماده سازی های لازم جهت بررسی های میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز های فازی آن ها آماده شده اند. سپس چهار آلیاژ در فرایند ریسندگی مذاب بصورت نوار های فوق تبرید شده با ساختار نیمه کریستالی در اندازه دانه ۲۰ الی ۱۰۰ نانو متری در درون ساختار آمورف شده تولید شده اند. جهت بالا بردن خواص مغناطیسی و ایجاد فاز های سخت مغناطیسی و از بین بردن فاز های غیر مغناطیسی آمورف و در نهایت رسیدن به یک ساختار یکنواخت از نظر اندازه دانه بعد از تولید نوار ها هر چهار آلیاژ در سه سیکل مختلف آنیل شده اند تا با ایجاد جوانه زنی و رشد به ساختار مطلوب تری برسند. در نهایت جهت تخمین اندازه دانه و ساختار نوار ها بعد از عملیات حرارتی ، آزمایش های تفرق اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی ، عبوری و AFM بر روی نمونه ها صورت گرفت. تمامی آزمایشات ساختار نانوکریستالی را تایید کرده اند. بعد از بررسی های ساختاری صورت گرفته بررسی های خواص مغناطیسی توسط دستگاه MFM و VSM صورت گرفت و منحنی های ممان مغناطش بر حسب میدان اعمالی استخراج شده است. در نهایت با توجه به بررسی های صورت گرفته ، آلیاژ ۴ که در حدود ۴۰ درصد فاز نرم آهن آزاد را دارا بود بالا ترین خواص مغناطیسی را نشان داد که ناشی از تبادل ممان های مغناطیسی و نانو کامپوزیت شدن ساختار بود. آلیاژ ۳ با بالاترین میزان آهن آزاد و کمترین مقدار فاز سخت مغناطیسی ۲:۱۴:۱ کمترین خواص مغناطیسی را از خود نشان داد. در تغییر درجه حرارت و زمان عملیات حرارتی نیز تاثیر دما و زمان مشابه یکدیگر و بصورت معکوس تاثیر گزار بوده اند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : مقدمه	۲
فصل دوم : مروری بر منابع	۸
۲-۱ تاریخچه مواد مغناطیسی سخت	۹
۲-۲ پارامترها و مشخصه های مغناطش و مواد مغناطیسی	۱۱
۲-۳ مغناطیسهای نرم و سخت	۱۳
۲-۳-۱ مغناطیس های دائم (سخت)	۱٤
۲-۴ مغناطش آلیاژهای بین فلزی R-T	۱٦
۲-۴-۱ حلقه پسماند	۱۷
۲-۴-۲ خواص مغناطیسی	۱۸
۲-۴-۳ ممان مغناطیسی	۱۹
۲-۴-۴ اندرکنش تبادلی	۲۲
۲-۴-۵ آنیزوتروپی (ناهمسان گردی)	۲٤
۲-٤-٦ حوزه های مغناطیسی	۲۵
۲-۴-۷ منشاء وادارندگی مغناطیسی	۲۸
۲-۴-۸ مکانیزم پیوستگی تبادلی	۳۰
۲-۵ مدل ها	۳۱
۲-۵-۱ مغناطیسهای نانوکریستالی تک فاز	۳۱
۲-۵-۲ مغناطیس های نانوکامپوزیت دوفازی	۳۳
۲-۶ رابطه ولفارت و نمودارهنکل	۳٤
۲-۷ توسعه مغناطیس های نانوکریستالی با پیوستگی اشتراکی	۳٦
۲-۸ سیستم مورد بررسی- نئودیمیم : آهن : بر	۳۸
۲-۹ ریز ساختار نئودیمیم : آهن : بر	٤۲
۲-۱۰ عناصر افزودنی	٤۳
۲-۱۱ روش های تولید پودر های نانو کریستالی	٤٦
۲-۱۱-۱ ریسندگی مذاب	٤۷
۲-۱۱-۲ آسیاب پرانرژی گلوله ای	٤۹
۲-۱۱-۳ آسیاب واکنشی با هیدروژن	۵۰
۲-۱۱-۴ تغییر شکل گرم	۵۰

عنوان	صفحه

فصل سوم : روش پژوهش	**۵۳**
۳-۱ پودر آلیاژ مورد استفاده	۵۵
۳-۲ ذوب قوسی در کوره محافظت شده	۵۷
۳-۳ آماده سازی نمونه های شمش برای بررسی میکروسکوپی	۵۸
۳-۴ بررسی میکروسکوپ نوری و آنالیز تصویری	۵۹
۳-۵ میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شمیایی	۵۹
۳-۶ آنالیز تصویری بررسی های میکروسکوپ الکترونی	٦۰
۳-۷ فرایند انجماد سریع ریسندگی مذاب	٦۰
۳-۸ عملیات حرارتی	٦۱
۳-۹ تفرق اشعه ایکس	٦۲
۳-۱۰ میکروسکوپ الکترونی عبوری	٦۲
۳-۱۱ میکروسکوپ های پروبی روبشی	٦۲
۳-۱۲ بررسی خواص مغناطیسی	٦۳
فصل چهارم : نتایج ، بحث و پیشنهادها	**۶۴**
۴-۱ بررسی میکروسکوپ نوری و آنالیز تصویری	٦۵
۴-۲ بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شمیایی	٦۹
۴-۳ آنالیز تصویری تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی	۸۰
۴-۴ نوارهای تولید شده به روش ریسندگی مذاب	۸۲
۴-۵ عملیات حرارتی	۹۱
۴-۶ نتایج XRD	۹۱
۴-۶-۱ روش مجموع ها	۹۲
۴-۶-۲ تاثیر تنش بر پهنای پیک	۹۳
۴-۶-۳ نتایج تفرق اشعه ایکس (XRD)	۹٤
۴-۷ بررسی های میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)	۹٦
۴-۸ بررسی های ساختاری و مغناطیسی توسط AFM/MFM	۹۹
۴-۹ بررسی های خواص مغناطیسی	۱۰۳
۱۰-٤ نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۰٦
مراجع	**۱۰۷**
پیوست	۱۱۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: کاربرد های مغناطیس های NdFeB در انواع زمینه های کاربردی ۶
جدول ۲-۱: مقایسه پارامتر های مختلف مواد مغناطیسی معروف بصورت کیفی ۱۱
جدول ۲-۲: روابط بین واحد های پارامتر های مغناطیسی در سیستم CGS و SI ۱۲
جدول ۲-۳: آلیاژهای معروف مغناطیسی و قابلیت های تولید آن ها ۴۷
جدول ۳-۱: ترکیب شمیایی ۴ پودر بکارفته شده در پژوهش. ۵۳
جدول ۳-۲: نتیجه آنالیز EDX انجام شده همراه آنالیز تولید کننده. ۵۶
جدول ۳-۳: شرایط سه سیکل اعمال شده بر روی نوار های خام.....۶۱
جدول ۴-۱خلاصه آنالبز EDX عناصر مختلف در ساختار آلیاژ ۱ مربوط به شکل ۴-۱۱ ..... ۷۵
جدول ۴-۲خلاصه آنالبز EDX عناصر مختلف در ساختار آلیاژ ۱..... ۷۵
جدول ۴-۳ خلاصه آنالبز EDX عناصر مختلف در ساختار آلیاژ ۲ در شکل ۴-۱۷..... ۷۷
جدول ۴-۴: خلاصه آنالبز EDX فاز های مختلف در ساختار آلیاژ ۳ و ترکیبات احتمالی آن ها. ۷۸
جدول ۴-۵ : خلاصه آنالبز EDX فاز های مختلف در ساختار آلیاژ ۴ و ترکیبات احتمالی آن ها. ۷۹
جدول ۴-۶: شرایط اعمالی و پارامتر های مربوط به فرایند ریسندگی مذاب برای چهار آلیاژ مصرف شده. ... ۸۳
جدول ۴-۷: مقایسه آنالیز های چهار آلیاژ مورد بررسی در شرایط مختلف پژوهشی. ۸۹

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱: تاریخچه ای از انرژی مغناطیسی مواد مختلف از سال ۱۸۸۰ ..... ۲
شکل ۱-۲: گزارش سالانه تولید آلیاژ NdFeB بروش زینتر و پیوند داده شده پلیمری ۴
شکل ۱-۳: تخمین بازار جهانی انواع مواد مغناطیسی در سال ۲۰۰۱ ..... ۵
شکل ۱-۴: میزان کاربرد مواد مغناطیسی دائم در کاربرد های مختلف صنعتی ۶
شکل ۱-۵: کاربرد NdFeB در ابزار پردازش اطلاعات و قطعات هارد دیسک ۶
شکل ۲-۱: انواع خواص ذاتی مغناطیسی عناصر در جدول تناوبی ۸
شکل ۲-۲: مقایسه حلقه پسماند مغناطیس های معروف تجاری بصورت نمایی ۱۰
شکل ۲-۳: پارامترهای اصلی بر روی حلقه پسماند مغناطیسی ۱۲
شکل ۲-۴: تفاوت مغناطیسهای سخت و نرم در حلقه پسماند ۱۳
شکل ۲-۵: الگو های ایده آل ریز ساختاری آلیاژهای مغناطیسی دائم نادر خاکی نانو کریستالی ۱۵
شکل ۲-۶: a) حلقه پسماند مغناطیسی مغناطیس دائم ایده آل ۱۷
شکل ۲-۷: نمایی از یک اتم ساده و ممان های مغناطیسی آن ۱۹
شکل ۲-۸: موقعیت های جفت نشده الکترون در مدار اتم Nd و Fe ۲۰
شکل ۲-۱۰: رساندن Fe-BCC به حالت اشباع آن توسط میدان خارجی ۲۴
شکل ۲-۱۱: شکل نمایی از فصل مشترک دو حوزه مغناطیسی مختلف الجهت مجاور یکدیگر ۲۷
شکل ۲-۱۲: تصویر کر که نشان گر حوزه های مغناطیسی آلیاژ NdFeB انجماد سریع شده ۲۷
شکل ۲-۱۳: خطوط خط چین تفاوت حلقه پسماند مغناطیس های دائم ۲۹
شکل ۲-۱۴: مکانیزم پیوستگی اشتراکی در دو دانه نانو متری مجاور ۳۰
شکل ۲-۱۵: تاثیر مکانیزم پیوستگی اشتراکی بین دانه های همسایه در حالت شارژ شده ۳۲
شکل ۲-۱۶: شکل نمایی مدل یک بعدی ساختار میکرومغناطیسی نانو کامپوزیت ۳۳
شکل ۲-۱۷: ناحیه اول منحنی مغناطش یک مغناطیس دوفازه $Fe_3B/Nd_2Fe_{14}B$ ۳۵
شکل ۲-۱۸: نمودار هنکل ۳۵
شکل ۲-۱۹: نمودار های مغناطش ساختار حوزه های جدا شده و پیوستگی اشتراکی ۳۸
شکل ۲-۲۰: واحد شبکه تتراگونال ساختار $Nd_2Fe_{14}B$ ۳۹
شکل ۲-۲۱: نمودار سه فازی Nd-Fe-B ۴۰
شکل ۲-۲۲: نمودار سه تایی سیستم Nd-Fe-B ۴۱
شکل ۲-۲۳: منحنی مغناطش آلیاژ $Nd_{16}Fe_{78}B_6$ زینتر شده ۴۱
شکل ۲-۲۴: ریز ساختار های شمش NdFeB و فاز های مختلف معمول تشکیل شده ۴۲
شکل ۲-۲۵: تفاوت اندازه دانه های نوار های ریسندگی مذاب در سمت اتمسفر ۴۳
شکل ۲-۲۶: شبیه سازی تفاوت اندازه دانه در ساختار نوار توسط کامپیوتر ۴۳

شکل ۲-۲۷: تولید نواربروش انجماد سریع ریسندگی مذاب ۴۷
شکل ۲-۲۸: شماتیک روش .M.S..... ۴۸
شکل ۲-۲۹: آنیزوتروپی قطعات رینگی اکسترود شده معکوس آلیاژ های NdFeB ۵۱
شکل ۲-۳۰: مقایسه خواص مغناطیسی سه روش تولید پودر های نانو ساختار ۵۱
شکل ۳-۱: فلوچارت فرایند پژوهش ۵۵
شکل ۳-۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به پودر ۵۶
شکل ۳-۳: شکل نمایی فرایند ذوب قوسی در محفظه کنترلی و اجزاء آن ۵۷
شکل ۳-۴: راست: برقراری قوس در داخل محفظه کوره چپ: نمونه حاصله از این روش..... ۵۸
شکل ۳-۵: ابزار آماده سازی نمونه های میکروسکوپ نوری ۵۸
شکل ۳-۶: میکروسکوپ الکترونی روبشی تسکن اکس ام یو ۵۹
شکل ۳-۷: دستگاه ریسندگی مذاب..... ۶۱
شکل ۴-۱: ساختار میکروسکوپی شمش ریخته شده از آلیاژ BZMP-۱ ..... ۶۵
شکل ۴-۲: ساختار میکروسکوپی شمش ریخته شده از آلیاژ BZMP-۲ ..... ۶۶
شکل ۴-۳: ساختار میکروسکوپی شمش ریخته شده از آلیاژ BZMP-۳ ..... ۶۷
شکل ۴-۴: ساختار میکروسکوپی شمش ریخته شده از آلیاژ BZMP-۴ ..... ۶۸
شکل ۴-۵: مقایسه چهار ساختار چهار آلیاژ ۶۹
شکل ۴-۶: تصاویر آلیاژ ۱ در بزرگ نمایی های مختلف. عکس های الکترون برگشتی می باشد ۷۰
شکل ۴-۷: تصاویراز آلیاژ ۲ در بزرگ نمایی های مختلف. عکس های الکترون برگشتی می باشد..... ۷۱
شکل ۴-۸: تصاویر آلیاژ ۳ در بزرگ نمایی های مختلف. عکس های الکترون برگشتی می باشد..... ۷۲
شکل ۴-۹: تصاویر آلیاژ ۴ در بزرگ نمایی های مختلف. عکس های الکترون برگشتی می باشد..... ۷۳
شکل ۴-۱۰: نتایج آنالیز EDX شمش آلیاژ ۱ و گراف های مربوط ۷۴
شکل ۴-۱۱: ریز ساختار آلیاژ ۱ و فاز های مشخص شده ۷۴
شکل ۴-۱۲:ریز ساختار آلیاژ ۱ و فاز های مشخص شده..... ۷۵
شکل ۴-۱۳: نتایج آنالیز EDX شمش آلیاژ ۲ و گراف های مربوط ۷۶
شکل ۴-۱۴: ریز ساختار آلیاژ ۲ و فاز های مشخص شده ۷۶
شکل ۴-۱۵: چپ :ساختار پریتکتیکی در مرز دانه های ستونی ۲:۱۴:۱ در آلیاژ ۲. راست : اکسید نئودیمیم.۷۷
شکل ۴-۱۶: محصولات ریز یوتکتیوئیدی در دو گیرنده الکترون های برگشتی (راست) و ثانویه (چپ)..... ۷۷
شکل ۴-۱۷: نتایج آنالیز EDX شمش آلیاژ ۳ و گراف مربوط به آن بصورت آزاد. ۷۸
شکل ۴-۱۸: ریز ساختار آلیاژ ۳ و فاز های مشخص شده ۷۸
شکل ۴-۱۹: نتایج آنالیز EDX شمش آلیاژ ۴ و گراف های مربوط ۷۹
شکل ۴-۲۰ : ریز ساختار آلیاژ ۴ و فاز های مشخص شده ۷۹
شکل ۴-۲۱ : نتایج آنالیز تصویری آلیاژ ۱ ..... ۸۰
شکل ۴-۲۲: آنالیز تصویری آلیاژ ۳ ..... ۸۱
شکل ۴-۲۳: نمای میکروسکوپ الکترونی سطوح مختلف ریبون..... ۸۲
شکل ۴-۲۴: تصاویر پشت و روی نوار در حالت حکاکی شده ۸۳
شکل ۴-۲۵: سطح مقطع نوار های تولید شده به روش ریسندگی مذاب..... ۸۴
شکل ۴-۲۶: سطح مقطع نوار های آماده سازی شده ۸۴

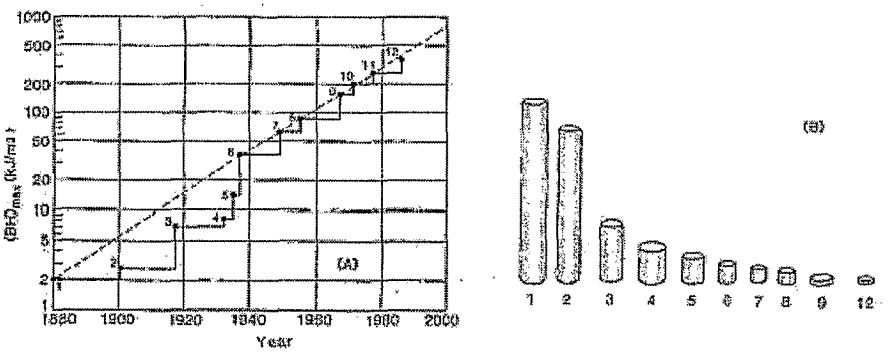
شکل ۴-۲۷: نمودار اوزارا و همکارانش جهت تخمین زدن اندازه دانه در آلیاژ های مغناطیسی NdFeB ... ۸۵
شکل ۴-۲۸: تصاویر ریز ساختار نوار های تولید شده ۸۶
شکل ۴-۲۹: تصاویر میکروسکوپ روبشی از سطح مقطع نوار و اندازه گیری ضخامت آن..... ۸۶
شکل ۴-۳۰: مورفولوژی دانه های $Nd_2Fe_{14}B$ در سطح داخلی حفره گازی ۸۷
شکل ۴-۳۱: آنالیز های EDX نوار های ریسندگی مذاب ۸۸
شکل ۴-۳۲: ریز ساختار سطحی آلیاژ ۴ و فاز مشخص شده..... ۹۰
شکل ۴-۳۳: ایجاد نانو کریستالاین ها از حالت آمورف و یا نیمه پایدار ۹۱
شکل ۴-۳۴: الگوی مادر تفرق پرتو ایکس سه فاز اصلی آلیاژ های NdFeB ۹۴
شکل ۴-۳۵: نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس مربوط به چهار آلیاژ بررسی شده ۹۵
شکل ۴-۳۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نواخی مختلف ساختار آلیاژ ۱ ..... ۹۶
شکل ۴-۳۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نواخی مختلف ساختار آلیاژ ۱. ..... ۹۷
شکل ۴-۳۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نواخی مختلف ساختار آلیاژ ۱ ..... ۹۷
شکل ۴-۳۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نواخی مختلف ساختار آلیاژ ۱ ..... ۹۸
شکل ۴-۴۰: تصاویر AFM مربوط به آلیاژ ۴ در حالت کوئنچ شده ۹۹
شکل ۴-۴۱: تصاویر AFM مربوط به آلیاژ ۴ در حالت آنیل شده در ۶۵۰ درجه سانتی گراد ۱۰۰
شکل ۴-۴۲: تصاویر بررسی های MFM بر روی آلیاژ ۴ کوئنچ شده..... ۱۰۱
شکل ۴-۴۳: تصاویر بررسی های MFM بر روی آلیاژ ۴ آنیل شده ۱۰۲
شکل ۴-۴۴: حلقه های پسماند چهار آلیاژ مورد بررسی. ۱۰۳
شکل ۴-۴۵: مقایسه تاثیر دمای انیل بر خواص مغناطیسی. ۱۰۴
شکل ۴-۴۶: تغیرات مغناطش پسماند و وادارندگی بر حسب نسبت فلزات واسطه به نادر خاکی..... ۱۰۵

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

بیش از چند هزار سال است که از کشف مواد مغناطیسی در چین می گذرد. پژوهش های علمی بر روی مواد مغناطیسی دائم طبیعی از قرن نوزدهم آغاز گشت و در همان زمان منجر به کشف قانون فارادی شد. کشف قانون فارادی به علت عمومیت دادن به توان الکتریکی در واقع اساس دومین انقلاب صنعتی شد. از این رو مسیر برای بدست آوردن مغناطیس های بهتر ساخت بشر، آغاز گردید. مواد مغناطیسی دائم از دو خصوصیت اصلی برخوردار هستند; این مواد باید بعد از برداشته شدن میدان مغناطیسی خارجی میدان خود را از دست ندهند و در مقابل میدان خارجی معکوس نیز مقاومت از خود نشان دهند. البته خصوصیت فراگیر دیگری که مشخص کننده انرژی نهایی مغناطیسی می باشد نیز از مشخصه های دیگر مواد مغناطیسی است که از محاسبات ساده دو خصوصیت یاد شده بدست می آید. از دهه هشتاد قرن نوزدهم تا به امروز انرژی مغناطیسی مواد مغناطیسی در حد صد ها برابر افزایش پیدا کرده است. در شکل۱-۱پیشرفت خصوصیت مواد مغناطیسی بصورت نموداری ترسیم شده است و بصورت شگفت انگیزی مشاهده می شود که این پیشرفت بصورت نمایی در حال ادامه پیدا کردن است [۱,۲].



شکل۱-۱۰: تاریخچه ای از انرژی مغناطیسی مواد مختلف از سال ۱۸۸۰ (A): ۱) فولاد های کربنی ۲) فولاد های تنگستنی ۳) فولاد های کوبالت دار ۴) فولاد MK ۵) تیکونال[۱] II ۶) تیکونال G ۷) تیکونال GG ۸) تیکونال XX ۹) $SmCo_5$ ۱۰) $(PrSm)Co_5$ ۱۱) $SmCo_7$ ۱۲) NdFeB . (B) آلیاژ های مربوط به شکل A بوده و میزان انرژی مغناطیسی بر واحد حجم است بگونه ای که با افزایش انرژی مغناطیسی حجم کاسته شده است [۲].

[۱] Ticonal

مواد مغناطیسی از ارکان توسعه تجهیزات مدرن زندگی امروزی هستند. پیدایش و رشد این مواد در قرون اخیر نشان می دهد، این رشد بطور مداوم ادامه دارد. کیفیت، قدرت و توانایی در ذخیره سازی انرژی مغناطیسی رو به افزایش است. معمولا در مواد الکترو مغناطیسی حجم و وزن بسیار اهمیت دارد و پدید آمدن مواد گوناگون مغناطیسی جدید منجر به پیدایش کاربرد های جدید برای این نوع مواد نیز شده است. به عبارت دیگر، پیدایش این مواد جدید با قدرت های بالای انرژی مغناطیسی شرایط را برای کارشناسان و دانشمندان برای بکار گیری آن ها در تجهیزاتی که تا چندی قبل تصور چنین کاربرد های مشکل بود، آسان کند.

از نظر کاربرد مواد مغناطیسی در صنعت، می توان آن ها را به دسته های زیر تقسیم بندی کرد[۳]:

ابزار استاتیکی: در این ابزار که جزو ساده ترین نوع ابزار مغناطیسی به شمار می رود، مغناطیس های دائم نیروی خود را به ماده مغناطیسی دیگری منتقل می کند. در این ابزار از مغناطیس های سخت به عنوان یک سیستم ذخیره سازی انرژی مانند فنر استفاده می شود. اما بر خلاف فنر احتیاجی به وارد کردن نیروی اولیه نیست. از جمله این کاربرد ها می توان پمپ های شیمیایی نام برد که احتیاج به باز و بسته کردن دریچه به همراه جدایش کامل چند محیط مورد احتیاج است. با استفاده از این مغناطیس های مدرن بسیاری از این قبیل کاربرد ها برای اولین بار ممکن شده و یا سایز ابزار گذشته یا وزن آنها کاسته شده است.

ابزار دینامیکی: مد نظر این دسته از کاربرد آن دسته از مغناطیس هایی هستند که میدان آن ها با یک میدان خارجی دیگری در تداخل است که نتیجه این تداخل حرکت است و یا بالعکس. لذا تمامی موتور های چرخشی و خطی و ابزار موقعیت سنجی در این دسته قرار می گیرند. این گروه خود به دو دسته عمده ابزار کم قدرت[۱] و پر قدرت[۲] تقسیم می شوند:

ابزار کم قدرت: کاربرد هایی در محدوده توان صفر الی چندین وات را شامل می شوند که از مثال های بارز و با اهمیتی که امروزه نیز از نظر اقتصادی بسیار مورد توجه است، کاربرد مواد دائم مغناطیسی در دیسک های کامپیوتر مثل فلاپی دیسک ها، هارد کامپیوتر و سی دی رایتر نام برد که جزء این دسته قرار می گیرند. در این نوع ابزار امروزه دیگر نمی توان از مواد مغناطیسی سخت کلاسیک مثل فریت ها استفاده کرد زیرا در این ابزار ابعاد و سرعت دست رسی بسیار مورد اهمیت است. از کاربرد های بارز و ملموس دیگر بکار گیری این مغناطیس ها در موتور های گرداننده دوربین های فیلم برداری و عکاسی می باشد. امروزه با استفاده از این مغناطیس های مدرن، منجر به کاهش حجم و وزن ابزارها می شوند. میکرو فن ها، اسپیکر ها و ساعت های کوارتز که امروزه از آلیاژ های NdFeB ساخته می شود نیز در این دسته قرار

---

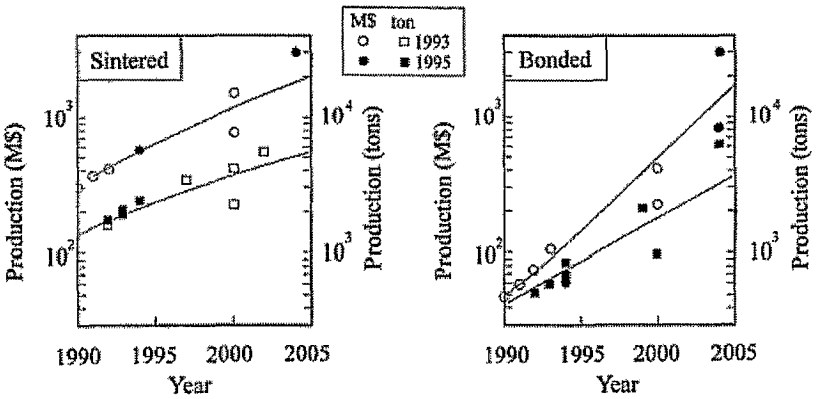
[۱] Low Power Device
[۲] High Power Device

می گیرند که جایگزینی این مواد به جای مغناطیس های کلاسیک، منجر به بالا رفتن کیفیت و کاسته شدن محسوس حجم نهایی و از نقطه نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر است.

ابزار پر قدرت: بسیاری از دانشمندان و کارشناسان امروزه معتقدند که مواد مغناطیسی جدید به زودی می توانند در ساخت و جایگزینی موتور های سایز متوسط و بزرگ (در حدود ۱۰۰KW) کارآیی داشته باشند. مانع اصلی در رسیدن به این مهم هزینه بالای تولید این مواد می باشد. زیرا در ابزار کوچک جایگزینی این مواد با توجه به افزایش کیفیت توجیه اقتصادی داشته ولی در سایز های بالا هنوز هزینه است که بر افزایش کیفیت غلبه می کند (سال ۱۹۹۶). البته پیدایش این مواد سخت مغناطیسی بسیاری از مشکلات حل نشدنی این دسته از کاربرد ها را نیز حل کرده است که از آن دسته می توان از موتور های مخصوص چند دور نام برد.

بطور کلی زمانیکه احتیاج به تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس با بازدهی بالا مد نظر است مغناطیس های دائم مدرن در اولویت انتخاب قرار می گیرد. لذا در وسایلی که ا حتیاج به صرفه جویی در مصرف انرژی است استفاده از این مواد جدید را لازم می سازد.

کاربرد های دیگر: با بالا رفتن انرژی محصول مواد مغناطیسی جدید، حیطه های کاربردی آن ها نیز گسترش یافته است. بطور مثال در علم پزشکی در دستگاه های MR[۱] جهت ایجاد میدان های مغناطیسی همگن از این مواد بکار گرفته می شود. کاربرد دیگر را درتیوب های ارسالی موجی[۲] می توان مشاهده کرد که آلیاژ های Re-Co هادر این کاربرد بسیار کارا بوده اند. امروزه از آلیاژ های NdFeB نیز در سینکرون کردن پرتو های الکترونی در ویگلرها[۳] بکار می روند که منجر به بالا بردن قدرت تمرکز این پرتو ها شده اند.

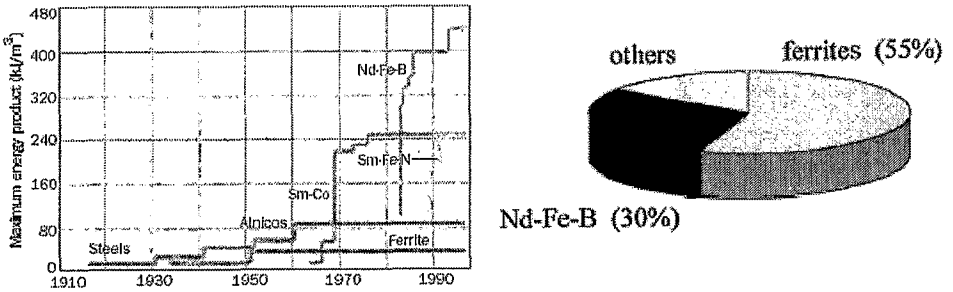


شکل ۰۱-۲: گزارش سالانه تولید آلیاژ NdFeB بروش زینتر و پیوند داده شده پلیمری [۳].

---

[۱] Magnetic Resonance
[۲] Traveling Wave Tube
[۳] Wigglers

میزان اهمیت آلیاژ NdFeB را می توان در شکل۱-۲ که میزان تولید آن را نشان می دهد، مشاهده کرد. ژاپن، آمریکا و چین بزرگترین تولید کننده های این آلیاژ است که باتوجه به اینکه اغلب معادن RE ها در چین واقع شده است سرعت رشد تولید این کشور بسیار بالا تر از دیگر کشور ها می باشد. شکل ۱-۲ افزایش و رشد تولید این آلیاژ ها را از نظر تعداد و وزن محصول نیز نمایش می دهد.

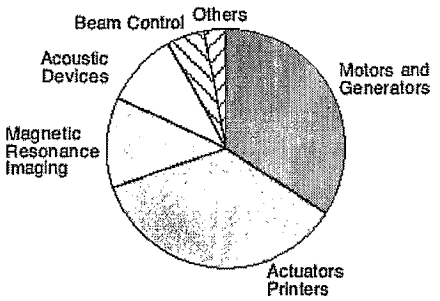


شکل ۱-۳: راست: تخمین بازار جهانی انواع مواد مغناطیسی در سال ۲۰۰۱ [۴]. چپ: مقایسه مواد مغناطیسی دائم بر حسب انرژی مغناطیسی و سال تولید [۵].

با توجه به شکل ۱-۳ در تولید مواد مغناطیسی، فریت ها با توجه به خواص مغناطیسی بسیار پایین تر از نسل های جدید مغناطیسی ، بیش از نیمی از بازار تولید این محصولات را به خود اختصاص داده اند. دلیل اصلی فراگیر بودن فریت ها قیمت بسیار پایین و سهولت تولید آنها می باشد. لازم به ذکر است که آلیاژ NdFeB که زمان زیادی از پیدایش و صنعتی شدن آن نمی گذرد، با سرعت روز افزونی در حال رشد و جایگزینی نسبت به مغناطیس های کلاسیک می باشد. عامل این سرعت رشد بالا، صنعت و فن آوری امروز و کاربرد های جدید و پیشرفته می باشد. در علم و صنعت امروزه چهار هدف اصلی در پژوهش ها و تولیدات مد نظر قرار می گیرد: کاهش وزن، کاهش حجم، کاهش هزینه و بالا بردن بازدهی. از این رو پیش بینی می شود در آینده نیز این روند رشد مواد نسل جدید ادامه داشته و بر مغناطیس های گذشته غالب شوند. باید توجه داشت که جایگزینی کامل در اغلب موارد صورت نمی پذیرد زیرا علاوه بر خواص مغناطیسی پارامتر های موثر دیگری وجود دارند که منجر به کارا بودن آن ها در صنعت می گردند، از آن جمله می توان به چند خواص مغناطیسی مثل: پایداری حرارتی، خواص مکانیکی، مقاومت خوردگی، قابلیت تولید، دمای کوری، خواص الکتریکی، هزینه و دیگر خصوصیات متالورژیکی و فیزیکی نام برد.

در قرن بیستم دو اتفاق چشم گیر صنعت و علم را فراگرفت: ۱- کاربرد های جدید نیاز به تولید ابزار جدید را بوجود آورد. ۲- نیاز به تولید مواد جدید جهت ایجاد ابزار جدید و بالعکس. مواد مغناطیسی نیز از این قاعده مستثنا نبودند. امروزه مواد مغناطیسی در جایی کاربرد دارند که حتی ۲۵ سال پیش امکان تصور آن نیز دشوار بوده است. به عنوان مثال رشد و توسعه

قدرت ذخیره سازی اطلاعات را نام برد. در سال ۱۹۸۴ دستگاه های معمول رایانه خانگی دارای ۱۰ مگا بایت[۱]هارد دیسک[۲]و رمی[۳] با سرعت ۶۵ میلی ثانیه بودند در صورتی که امروزه هارد دیسک های با میزان ذخیره سازی ۱۰۰,۰۰۰ مگابایت با رمی با سرعت زیر ۱۰ میلی ثانیه معمول به شمار می رود[۶].

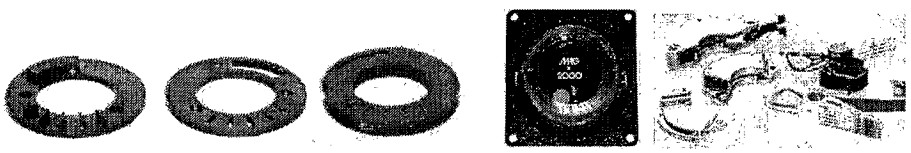


شکل۱-۴: میزان کاربرد مواد مغناطیسی دائم در کاربرد های مختلف صنعتی [۷].

آلیاژ های مغناطیسی NdFeB علاوه بر میزان تولید بالا، دارای وسعت کاربردی بسیاری نیز می باشد. در جدول ۱-۱ چند زمینه مهم کاربردی و مثال های آنها آورده شده است.

جدول۱-۱: کاربرد های مغناطیس های NdFeB در انواع زمینه های کاربردی

زمینه کاربردی	مثال	زمینه کاربردی	مثال
خودرو سازی	استارتر موتور، سیستم ضد قفل ترمز، پمپ های انژکتور، فن و کنترل پنجره، بلندگو، ترمز های ادی کارنت و غیره	صنعت	انواع گرداننده ها و موتور ها، ابزار آلات مغناطیسی ، ربات ها ، جدا کننده های مغناطیسی، یاتاقان های مغناطیسی، سروو موتور، بالابر ها، کلاچ و ترمز، ابزار اندازه گیری و غیره
مخابرات	بلندگو، میکروفن، زنگ تلفن، ابزار الکترو آکوستیک، رله ها، سویچ و غیره	نجوم و هوا فضا	یاتاقان های بی اصطکاک، کوپلینگ ها ، تیوب های فرستنده موجی، ابزار تولید موج و غیره
پردازش اطلاعات	در انواع دیسک درایو، موتور های چند دور، پرینتر، موتور های پله ای و غیره	مهندسی پزشکی	اورتدنسی، ارتوپدی، ابزار دندان پزشکی، پروب های فرومغناطیس، قلب های مصنوعی، MRIوNMR، جدا کننده سلول های سرطانی، سونوگرافی و غیره.
ابزار خانگی	موتور های دی سی، ماشین لباس شویی و ظرف شویی، دریل، تلویزیون، ضبط صوت، دیسک های فشرده، کامپیوتر ، ساعت و غیره	الکترونیک	سنسورها، سویچ های غیر تماسی، اسپکترومتر، دیسک های اندازه گیری انرژی، ترانس های الکترو مغناطیسی و غیره.



شکل۱-۵: راست: کاربرد NdFeB در ابزار پردازش اطلاعات و قطعات هارد دیسک. وسط: سنسور های ضربه ای مغناطیسی از نوع NdFeB. چپ: سنسور های موقعیت سنجی اتومبیل های دو دیفرانسیل [۶].

---

[۱] Mega Byte
[۲] Hard Disk
[۳] RAM

فصل دوم

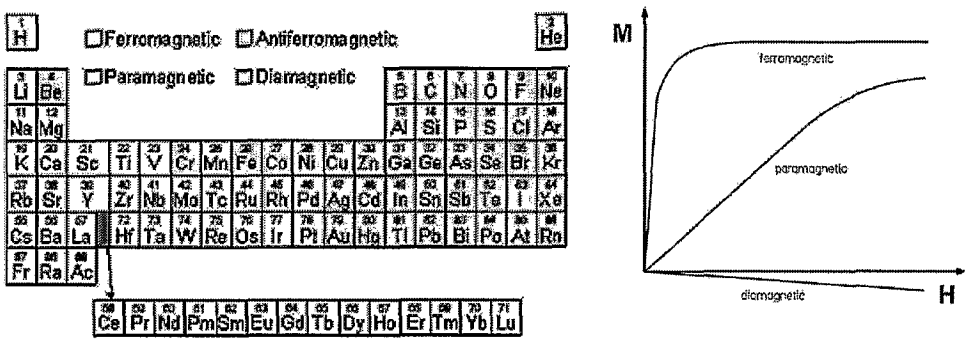
مروری بر منابع

۲- مروری بر منابع

مواد مغناطیسی با کاربردهای روز افزون و گسترده ای که در صنایع مختلف یافته اند، از اهمیت تحقیقاتی ویژه ای در علم مواد برخوردارند. توسعه این مواد در سه خانواده اصلی مواد فلزی، سرامیکی و بین فلزی مورد توجه قرار گرفته است :

- مواد فلزی : این آلیاژها دارای پایه فلزی بوده و قدیمی ترین و معروف ترین آنها آلیاژهای آهنی و نسلهای بعدی آنها آلنیکو و غیره می باشد.
- مواد سرامیکی که به فرایت ها معروفند و دارای ساختار اسپینل[۱] و هگزاگونال[۲] می باشند و از فرمول اصلی $A^{2+}B_2^{3+}O_4^{2-}$ تبعیت می کند [۸].
- آلیاژهای ترکیبی فلزات واسطه به همراه عناصر نادر خاکی که به آلیاژ های $R\text{-}T$[۳] معروف هستند، این آلیاژ ها با خانواده SmCo معرفی و با آلیاژ های سه تایی $(Nd,Pr,Dy)\text{-}(Fe,Co)\text{-}(B,N)$ در حال پیشرفت و توسعه می باشند.

بصورت کلی عناصر در جدول تناوبی بصورت خالص و ذاتی از نقطه نظر خواص مغناطیسی به چهار دسته اصلی دیا مغناطیس، پارا مغناطیس، فرو مغناطیس (فری مغناطیس در فرایت ها) و آنتی فرو مغناطیس تقسیم بندی می شوند که در شکل مشخص شده است:



شکل۲-۱: انواع خواص ذاتی مغناطیسی عناصر در جدول تناوبی در سمت چپ و رفتار متقابل آن ها در قبال میدان مغناطیسی خارجی در سمت راست [۹].

---

[۱] Spinel
[۲] Hexagonal
[۳] Rare earth- Transition metal