

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

۸۷/۱۲/۱۱
۸۷/۱۲/۱۱



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد (گرایش شناسایی، انتخاب و ساخت مواد مهندسی)

تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم پایه آهن
و بهینه سازی خواص مغناطیسی آنها با استفاده از پوشش های
عایق الکتریکی مختلف

توسط

امیر حسین تقوایی

استاد راهنما:

دکتر کمال جانقربان

کتابخانه و اسناد مرکز علمی پژوهشی
شهریور

۱۳۸۷/۱۲/۱۱

شهریور ماه ۱۳۸۷

۱۰۸۹۰۲

به نام خدا

تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم پایه آهن و بهینه سازی خواص مغناطیسی آنها با استفاده از پوشش های عایق الکتریکی متفاوت

به وسیله‌ی:

امیر حسین تقوایی

پایان نامه

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

در رشته‌ی:

مهندسی مواد (گرایش شناسایی، انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر کمال جانقربان، استاد بخش مهندسی مواد (رئیس کمیته).....

دکتر محمد حسین پایدار، دانشیار بخش مهندسی مواد.....

دکتر عبدالغفار برزگر، استادیار بخش مهندسی مواد.....

شهریور ماه ۱۳۸۷

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

اکنون که به یاری حق این مهم به پایان رسیده است، از زحمات و حمایت های بی دریغ استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر کمال جانقربان و اساتید مشاورم جناب آقایان دکتر محمد حسین پایدار و دکتر عبدالغفار برزگر تشکر می کنم. بدینوسیله تشکر ویژه خود را از آقای دکتر هومان شکراللهی به خاطر همکاری بی شائبه ایشان در کلیه امور آزمایشگاهی و مشورت در نتایج و بحث ابراز می نمایم. به علاوه، از مسئولین محترم آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه شیراز صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم.

چکیده

تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم پایه آهن و بهینه سازی خواص مغناطیسی آنها با استفاده از پوشش های عایق الکتریکی مختلف

بوسیله ی

امیر حسین تقوایی

در این تحقیق کامپوزیت های مغناطیسی نرم با استفاده از پروسه ی متالورژی پودر تولید و تاثیر عواملی مانند نوع پوشش و مقدار آن، اندازه ی ذرات پودر، فشار پرس و عملیات حرارتی روی خواص مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در فرکانس های میانی همواره یک مقدار بهینه رزین فنولیک به منظور دستیابی به بیشترین نفوذپذیری و کمترین فاکتور تلفات وجود دارد. استفاده از پودر های ریزتر منجر به کاهش افت نفوذپذیری و نیز کاهش شدید فاکتور تلفات در فرکانس های بیشتر از ۳۰۰ کیلوهرتز و افزایش فاکتور تلفات در فرکانس کمتر از ۱۰ کیلوهرتز شد. افزایش فشار پرس منجر به افزایش چگالی و نفوذپذیری در فرکانس ۵۰ هرتز و کاهش نفوذ پذیری در فرکانس های بالاتر از طریق کاهش مقاومت الکتریکی گردید. آماده سازی سطحی پودر های آهن پسیو شده با کوپل کننده سیلان قبل از پوشش رزین فنولیک باعث کاهش تلفات گردابی و نیز کاهش افت نفوذپذیری پذیری تا فرکانس ۱ مگاهرتز بدون کاهش نفوذ پذیری در فرکانس های زیر ۱۰۰ کیلوهرتز در مقایسه با کامپوزیت های تولیدی از پوشش پسیو- رزین فنولیک شد. استفاده از پوشش فسفات آهن بدون تغییر چندان در چگالی و نفوذ پذیری مغناطیسی در فرکانس زیر ۱۰ کیلوهرتز، منجر به کاهش شدید فاکتور تلفات و افزایش فرکانس تشدید از محدوده ی فرکانس ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز برای نمونه های آهنی خالص تا بالاتر از ۱ مگا هرتز برای کامپوزیت های تولیدی از این پوشش شد. عملیات حرارتی کامپوزیت های تولیدی از پوشش فسفات منجر به افزایش نفوذ پذیری و کاهش فاکتور تلفات در فرکانس کمتر از ۱۰ کیلوهرتز و افزایش مقدار تلفات گردابی در فرکانس های بالاتر به دلیل تخریب پوشش به ویژه در دمای بالاتر شد، اما استفاده از پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان از طریق تشکیل باند های مقاوم به حرارت سایلوکسان توانایی عملیات حرارتی تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد را بالا برده که این کار منجر به کاهش بیشتر تلفات هیستریزیس و نیز پایداری نفوذ پذیری تا فرکانس بالاتر از طریق افزایش مقاومت الکتریکی به دلیل حضور باند های سایلوکسان پس از عملیات حرارتی گردید.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده	۵
۱-۲- منشأ خاصیت مغناطیسی مواد	۶
۲-۲- مغناطش	۷
۳-۲- هیستریزیس	۹
۱-۳-۲- حرکت دیوارهای مغناطیسی	۱۱
۲-۳-۲- چرخش حوزه‌های مغناطیسی	۱۱
۴-۲- ناهمسانگردیهای مغناطیسی	۱۲
۱-۴-۲- ناهمسانگردی کریستالی	۱۲
۲-۴-۲- ناهمسانگردی شکل	۱۳
۳-۴-۲- ناهمسانگردی تنشی و کشسانی مغناطیسی	۱۴
۵-۲- میدان پسماندزادای مغناطیسی (H_C)	۱۵
۶-۲- نفوذپذیری مغناطیسی	۱۵
۱-۶-۲- نفوذپذیری نسبی (μ_r)	۱۶
۲-۶-۲- نفوذپذیری اولیه (μ_i)	۱۶
۳-۶-۲- نفوذپذیری دامنه‌ای و نفوذپذیری بیشینه	۱۷
۴-۶-۲- نفوذپذیری ظاهری μ_{app}	۱۷
۵-۶-۲- نفوذپذیری موثر (μ_e)	۱۸
۶-۶-۲- نفوذپذیری مختلط (Complex Permeability)	۱۸
۷-۲- نفوذپذیری مغناطیسی در یک کامپوزیت	۲۰

- ۲۰ ۸-۲- تلفات مغناطیسی
- ۲۳ ۱-۸-۲- تلفات استاتیک (هیستریزیس)
- ۲۴ ۲-۸-۲- تلفات جریانهای گردابی
- ۲۶ ۱-۲-۸-۲- تلفات جریانهای گردابی در فرکانسهای پایین
- ۲۷ ۲-۲-۸-۲- تلفات جریانهای گردابی در فرکانسهای بالا
- ۲۸ ۳-۲-۸-۲- اثر پوسته (skin effect)
- ۲۹ ۳-۸-۲- تلفات اضافی (Excess loss)
- ۳۱ ۹-۲- کامپوزیت های مغناطیسی نرم و کاربرد آنها
- ۳۲ ۱۰-۲- پوشش قابل استفاده در تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم
- ۳۲ ۱-۱۰-۲- پوششهای آلی
- ۳۳ ۲-۱۰-۲- پوششهای معدنی
- ۳۴ ۱۱-۲- عاملهای کوپل کننده
- ۳۵ ۱-۱۱-۲- پیوند سیلان با ترکیبات غیرآلی
- ۳۶ ۲-۱۱-۲- تشکیل پیوند بین سیلان و مواد آلی
- ۴۲ فصل سوم: روش انجام کار
- ۴۲ ۱-۳- تجهیزات مورد نیاز
- ۴۳ ۲-۳- روش انجام کار
- ۴۳ ۱-۲-۳- ایجاد پوشش عایق الکتریکی روی پودرهای آهن
- ۴۳ ۱-۱-۲-۳- ایجاد پوششهای پلیمری فنولیک بر روی پودرهای آهن بدون آماده سازی سطحی
- ۴۳ ۲-۱-۲-۳- ایجاد پوششهای فنولیک بر روی پودرهای آماده سازی شده با عامل کوپل کننده
- ۴۴ ۱-۲-۱-۲-۳- ایجاد پوشش پسیو اکسید آهن
- ۴۴ ۲-۲-۱-۲-۳- آماده سازی سطحی پودرهای پسیو با کوپل کننده سیلان
- ۴۵ ۳-۱-۲-۳- پوشش دادن فسفات آهن
- ۴۶ ۴-۱-۲-۳- ایجاد پوشش دو لایه پلیمر- فسفات آهن
- ۴۶ ۵-۱-۲-۳- تولید پوششهای دو لایه آمینو سیلان- فسفات آهن
- ۴۶ ۲-۲-۳- فشرده سازی پودرهای پوشش داده شده

۴۷	عملیات حرارتی نمونه های فشرده شده.....
۴۸	۳-۲-۴- آنالیز پوششهای ایجاد شده و نمونه ها.....
۴۸	۳-۲-۴-۱- میکروسکوپ الکترونی SEM و آنالیز EDS.....
۴۸	۳-۲-۴-۲- طیف سنجی مادون قرمز (FTIR).....
۴۹	۳-۲-۴-۳- دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD).....
۴۹	۳-۲-۵- اندازه گیری های مغناطیسی و چگالی کامپوزیت های تولیدی.....
۴۹	۳-۲-۵-۱- اندازه گیری خواص مغناطیسی با LCR متر.....
۵۰	۳-۲-۵-۲- اندازه گیری خواص با VSM.....
۵۱	۳-۲-۵-۳- اندازه گیری چگالی.....
۵۲	فصل چهارم: نتایج و بحث.....
۵۲	۴-۱- کامپوزیت های تولید شده از پودرهای آهن پوشش داده شده با رزین فنولیک.....
۵۲	۴-۱-۱- تاثیر مقدار رزین فنولیک روی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده.....
	۴-۱-۲- تاثیر اندازه ی پودر در خواص کامپوزیت های تولید شده با پوشش رزین فنولیک.....
۵۸	۴-۱-۳- تاثیر پارامتر فشار پرس در خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولیدی.....
۶۵	۴-۲- تولید کامپوزیت مغناطیسی از پودرهای آهن با آماده سازی سطحی و پوشش رزین فنولیک.....
۶۸	۴-۲-۱- پسیو کردن سطح پودرهای آهن.....
۶۹	۴-۲-۳- تاثیر آماده سازی سطحی پودرهای آهن با محلول سیلان بر خواص کامپوزیت های تولید شده.....
۷۷	۴-۳- تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم از پودرهای آهن با پوشش فسفات آهن.....
۸۲	۴-۳-۱- آنالیز پودرهای فسفاته شده.....
۸۲	۴-۳-۲- اندازه گیری چگالی و مشاهده ساختار کامپوزیت های تولیدی با پودرهای دارای پوشش فسفات آهن.....
۸۶	۴-۳-۳- بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودرهای آهن دارای پوشش فسفات آهن.....
۹۰	۴-۴- بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودرهای دارای پوشش فسفات آهن- رزین فنولیک.....
۹۵	۴-۴-۱- بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودرهای دارای پوشش فسفات آهن- رزین فنولیک.....

۵-۴- بررسی فرآیند آنیل حرارتی در خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولیدی از پودرهای آهن فسفات شده.....	۹۷
۶-۴- بهینه سازی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودرهای آهن با پوشش فسفات آهن.....	۱۰۳
۴-۶-۱- مطالعه ی پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان.....	۱۰۴
۴-۶-۲- انجام فرایند آنیل حرارتی و تاثیر آن بر خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودرهای آهن با پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان.....	۱۰۵
۴-۶-۳- تاثیر فشار پرس بر خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان.....	۱۱۶
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۱۸
۵-۱- نتیجه گیری.....	۱۱۸
۵-۲- پیشنهادات.....	۱۲۲
منابع.....	۱۲۳

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ تصویر شماتیک از ساختار کامپوزیت های مغناطیسی نرم	۲
شکل ۲-۱ انواع مواد مغناطیسی نرم و محدوده فرکانس کاری آن ها	۲
شکل ۱-۲ تغییرات پیوسته آرایش دوقطبی های مغناطیسی در دیواره ۱۸۰ درجه	۶
شکل ۲-۲ مراحل مختلف ایجاد مغناطش و نمودار اولیه مربوط به پروسه مغناطش	۸
شکل ۳-۲ مراحل مختلف مغناطش	۱۰
شکل ۴-۲ دو حلقه هیستریزیس برای مواد مغناطیسی سخت و نرم	۱۱
شکل ۵-۲ رفتار مغناطیسی متفاوت جهات کریستالی در آهن	۱۳
شکل ۶-۲ انواع نفوذپذیری مغناطیسی با توجه به حلقه هیستریزیس	۱۸
شکل ۷-۲ اختلاف فاز بین شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی	۱۹
شکل ۸-۲ تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب اندازه پودر و فرکانس	۱۹
شکل ۹-۲ مقدار تلفات به ازای هر سیکل و واحد جرم در فولاد های لایه ای Fe-Si و ضخامت mm ۰/۲۱، اندازه گیری در میدان سینوسی و شدت ۱/۵ تسلا انجام شده است	۲۲
شکل ۱۰-۲ مقدار تلفات بر حسب فرکانس برای نمونه های آهنی و میدان های اعمالی سینوسی در شدت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ تسلا	۲۲
شکل ۱۱-۲ مکانیسم قفل شدن دیواره های مغناطیسی در اثر حضور ناخالصی. فلش ها سرعت دیواره را نشان می دهند (شکل سمت چپ). در سمت راست پروفیل سرعت دیواره در راستای محور ناخالصی نشان داده شده است	۲۴
شکل ۱۲-۲ میدان و جهت جریان های گردابی ایجاد شده در یک ورق با ابعاد نامحدود	۲۶
شکل ۱۳-۲ خم شدن دیواره های مغناطیسی	۲۹
شکل ۱۴-۲ مکانیسم واکنش پذیری سیلان	۳۶

- شکل ۲-۱۵ ABS موتور. (a) مدل اصلی ساخته شده از فولاد لایه ای. (b) کاهش در اندازه و وزن موتور با جایگزینی کامپوزیت های مغناطیسی نرم به جای فولاد لایه ای ۳۸
- شکل ۲-۱۶ عوامل موثر در خواص مغناطیسی کامپوزیت های مغناطیسی نرم ۳۹
- شکل ۳-۱ قالب استوانه ای ۴۷
- شکل ۳-۲ پودر های قرار گرفته در کپسول کوارتز ۴۸
- شکل ۳-۳ الف LCR متر ۵۰
- شکل ۳-۳ ب سیم پیچ و نمونه استوانه ای تولید شده ۵۰
- شکل ۳-۴ دستگاه VSM ۵۱
- شکل ۴-۱ تاثیر مقدار رزین فنولیک بر بخش حقیقی نفوذ پذیری در دو فرکانس ۵۰ هرتز و ۱۰ کیلو هرتز ۵۳
- شکل ۴-۲ تاثیر مقدار ذرات فرومغناطیس بر روی فاکتور ضد مغناطیسی ۵۴
- شکل ۴-۳ تاثیر مقدار رزین فنولیک بر قسمت حقیقی نفوذ پذیری در فرکانس ۱ مگا هرتز ۵۵
- شکل ۴-۴ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب مقدار رزین در فرکانس ۱ مگا هرتز ۵۶
- شکل ۴-۵ اثر مقدار رزین بر فاکتور تلفات در فرکانس های ۵۰ هرتز و ۱۰ کیلو هرتز ۵۶
- شکل ۴-۶ اثر مقدار رزین بر فاکتور تلفات مغناطیسی در فرکانس ۱ مگا هرتز ۵۷
- شکل ۴-۷ تاثیر اندازه پودر و فشار در چگالی کامپوزیت های مغناطیسی نرم ۵۸
- شکل ۴-۸ تغییرات بخش حقیقی نفوذ پذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس در کامپوزیت های تولید شده با پودر های ۱۰ و ۱۵۰ میکرون ۵۹
- شکل ۴-۹ اثر اندازه پودر بر فاکتور تلفات مغناطیسی در فرکانس کمتر از ۳۰ کیلو هرتز ۶۱
- شکل ۴-۱۰ اثر اندازه پودر بر فاکتور تلفات مغناطیسی تا فرکانس ۱ مگا هرتز ۶۱
- شکل ۴-۱۱ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی کامپوزیت های تولیدی از پودر های ۱۰ و ۱۵۰ میکرون با فرکانس ۶۳
- شکل ۴-۱۲ تغییرات نفوذ پذیری موهومی بر حسب فرکانس برای کامپوزیت های تولید شده از پودر های ۱۰ و ۱۵۰ میکرون ۶۴
- شکل ۴-۱۳ تغییرات مقاومت متناوب هسته مغناطیسی ساخته شده از پودر های ۱۰ و ۱۵۰ میکرون با فرکانس ۶۵
- شکل ۴-۱۴ تاثیر مقدار فشار بر نفوذ پذیری مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده در فرکانس های مختلف ۶۶
- شکل ۴-۱۶ تغییرات نفوذ پذیری موهومی بر حسب میزان فشار و فرکانس ۶۸

عنوان صفحه

- شکل ۴-۱۸ الگوی پراش پرتو ایکس از پودرهای آهن با پوشش پسیو و بدون پوشش..... ۷۰
- شکل ۴-۲۴ تصویر شماتیک از واکنش مولکول های سیلان با سطح پسیو پودر های آهن..... ۷۶
- شکل ۴-۲۵ تاثیر عامل کوپل کننده سیلان بر قسمت حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس..... ۷۷
- شکل ۴-۲۶ تاثیر کوپل کننده سیلان بر فاکتور تلفات در کامپوزیت های تولیدی با ۰/۷ درصد وزنی رزین (a) و ۱/۵ درصد وزنی رزین (b)..... ۷۹
- شکل ۴-۲۷ تاثیر کوپل کننده سیلان بر نفوذ پذیری موهومی کامپوزیت های تولید شده با ۰/۷ درصد وزنی رزین فنولیک..... ۸۰
- شکل ۴-۲۸ تاثیر عامل کوپل کننده و مقدار رزین بر نفوذ پذیری مغناطیسی..... ۸۱
- شکل ۴-۲۹ تصاویر SEM با مد های SE (الف) و BE (ب) از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن..... ۸۳
- شکل ۴-۳۰ آنالیز EDS پودر های آهن با پوشش فسفات آهن..... ۸۴
- شکل ۴-۳۱ تصویر SEM از پوشش فسفات آهن اعمال شده بر روی ورقه آهنی..... ۸۵
- شکل ۴-۳۲ آنالیز EDS سطحی از پودر های آهن فسفات شده..... ۸۵
- شکل ۴-۳۳ تصویر XRD مربوط به پودر های آهن با پوشش فسفات آهن..... ۸۶
- شکل ۴-۳۴ تصویر SEM از کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن فسفات در فشار ۸۰۰ مگاپاسکال..... ۸۸
- شکل ۴-۳۵ آنالیز EDS سطحی از اتم های فسفر تشکیل دهنده پوشش فسفات در مرزدانه ها..... ۸۹
- شکل ۴-۳۶ تاثیر غلظت اسید فسفریک (الف) و مقدار آهن (ب) در حمام فسفات کردن بر سرعت فسفات شدن..... ۹۰
- شکل ۴-۳۷ تاثیر غلظت اسید فسفریک حمام فسفات بر روی فاکتور تلفات..... ۹۱
- شکل ۴-۳۸ مقایسه نفوذپذیری مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودر های پوشش دار فسفات و بدون پوشش بر حسب فرکانس..... ۹۲
- شکل ۴-۳۹ فاکتور تلفات کامپوزیت های ساخته شده از پودر های فسفات و بدون پوشش بر حسب فرکانس..... ۹۳
- شکل ۴-۴۰ مقایسه نفوذپذیری موهومی کامپوزیت های تولید شده از پودر های پوشش دار فسفات و بدون پوشش بر حسب فرکانس..... ۹۳

- شکل ۴-۴۱ اثر پوشش دو لایه فسفات آهن- رزین فنولیک بر نفوذپذیری مغناطیسی کامپوزیت های تولیدی بر حسب فرکانس. ۹۶
- شکل ۴-۴۲ تاثیر پوشش دو لایه فسفات آهن- رزین فنولیک بر نفوذپذیری موهومی (الف) و فاکتور تلفات مغناطیسی (ب) کامپوزیت های تولید شده با این پوشش در مقایسه با کامپوزیت های تولیدی از پوشش فسفات ۹۶
- شکل ۴-۴۳ اثر فرآیند آنیل حرارتی بر نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس در دما و زمان متفاوت. ۹۸
- شکل ۴-۴۴ اثر فرآیند آنیل بر فاکتور تلفات مغناطیسی فرکانس کمتر از ۵ کیلوهرتز در دما و زمان متفاوت. ۹۹
- شکل ۴-۴۵ اثر فرآیند آنیل بر فاکتور تلفات مغناطیسی فرکانس بیشتر از ۵ کیلوهرتز در دما و زمان متفاوت. ۱۰۰
- شکل ۴-۴۶ اثر فرآیند آنیل حرارتی بر نفوذ پذیری موهومی بر حسب فرکانس در دما و زمان متفاوت. ۱۰۱
- شکل ۴-۴۷ آنالیز XRD پودر های آهن فسفات آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه. ۱۰۲
- شکل ۴-۴۸ آنالیز طیف سنجی مادون قرمز پودر های آهن فسفات شده قبل از آنیل (a) و آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه (b). ۱۰۲
- شکل ۴-۴۹ آنالیز FTIR مربوط به پودر های آهن با پوشش دو لایه فسفات آهن-آمینوسیلان ۱۰۵
- شکل ۴-۵۰ تاثیر دمای آنیل بر بخش حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی در فزکانس ۲۰ کیلو هرتز (الف) و ۵۰ هرتز (ب). ۱۰۶
- شکل ۴-۵۱ تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه های آنیل شده در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد. ۱۰۷
- شکل ۴-۵۲ تغییرات فاکتور تلفات مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نمونه های آنیل شده در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد. ۱۰۸
- شکل ۴-۵۳ آنالیز FTIR پودر های آهن به پوشش فسفات آهن-آمینوسیلان قبل از آنیل (a) و بعد از آنیل در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد (b). ۱۰۹

- شکل ۴-۵۴ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب درجه حرارت آنیل برای کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن ونیز فسفات آهن- آمینوسیلان.۱۱۰
- شکل ۴-۵۶ مقدار پهنای پیک های XRD مربوط به کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان آنیل شده در دماهای متفاوت.۱۱۲
- شکل ۴-۵۷ نمودار ویلیامسون- هال برای کامپوزیت های آنیل شده در دماهای متفاوت.۱۱۳
- شکل ۴-۵۸ اثر دمای آنیل بر منحنی هیستریزس کامپوزیت های تولیدی از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن - آمینوسیلان۱۱۴
- شکل ۴-۵۹ تاثیر دمای آنیل بر مقدار نفوذ پذیری بیشینه مغناطیسی.۱۱۵
- شکل ۴-۶۰ تاثیر فشار پرس بر منحنی هیستریزس کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با پوشش فسفات آهن- آمینوسیلان.۱۱۶

فهرست جداول

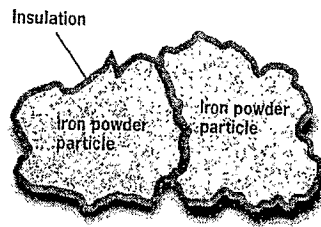
عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ عمق نفوذ شار مغناطیسی در هسته های مغناطیسی	۲۹
جدول ۲-۲ تحقیقات انجام گرفته در زمینه کامپوزیت های مغناطیسی نرم	۴۱
جدول ۱-۴ ثابت تلفات هیستریزیس و جریان های گردابی کامپوزیت های تولیدی از پودر های ۱۵۰ و ۱۰ میکرون	۶۵
جدول ۲-۴ چگالی کامپوزیت های تولیدی و اثر آماده سازی سطحی با محلول سیلان بر مقدار چگالی	۷۸
جدول ۳-۴ اثر عامل کوپل کننده بر مقاومت الکتریکی در فرکانس ۱ مگاهرتز	۸۰
جدول ۴-۴ آنالیز کمی پوشش فسفات آهن به روش ZAF	۸۴
جدول ۵-۴ تاثیر فسفاتنه کردن پودر های آهن در چگالی کامپوزیت های تولید شده	۸۷
جدول ۶-۴ تاثیر غلظت اسید فسفریک بر روی نفوذ پذیری مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده	۹۱
جدول ۷-۴ مقاومت الکتریکی، نفوذ پذیری و عمق نفوذ شار مغناطیسی برای کامپوزیت های تولید شده از پوشش فسفات آهن- رزین، فسفات آهن و بدون پوشش	۹۷
جدول ۸-۴ تاثیر عملیات حرارتی بر روی مقاومت الکتریکی کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با پوشش فسفات	۱۰۳
جدول ۹-۴ تغییرات میدان پسماند زدای مغناطیسی و کرنش های داخلی بر حسب دمای آنیل	۱۱۳
جدول ۱۰-۴ تاثیر دمای آنیل بر میدان پسماند زدای مغناطیسی، مغناطش اشباع و اندازه دانه	۱۱۴
جدول ۱۱-۴ تاثیر فشار پرس بر مغناطش باقیمانده و نفوذپذیری بیشینه	۱۱۷

فصل اول: مقدمه

امروزه در صنایع مختلف مانند الکترونیک و مخابرات از مواد مغناطیسی به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد استفاده های زیادی می شود. رفتار مغناطیسی مواد ناشی از گشتاور مغناطیسی الکترون ها بوده که از چرخش این ذرات باردار به دور محور خود و نیز هسته اتم ایجاد می شود. این خاصیت در فلزاتی از قبیل آهن، نیکل و کبالت و آلیاژهای این عناصر که در مدارهای داخلی خود الکترون های نیمه پر دارند ایجاد می شود. به طور کلی می توان مواد مغناطیسی را به دو دسته کلی نرم و سخت تقسیم بندی کرد. مواد مغناطیسی نرم به دسته ای اطلاق می شود که با برداشتن میدان مغناطیسی اعمالی، مقدار خاصیت مغناطیسی باقیمانده بسیار کم است. بر عکس در مواد مغناطیسی سخت مقدار مغناطش باقیمانده حتی پس از برداشتن میدان مغناطیسی اعمالی قابل ملاحظه است.

از مهمترین ویژه گی های مواد مغناطیسی نرم می توان به میدان پسماند زدای مغناطیسی کم، چگالی شار مغناطیسی بالا، نفوذ پذیری مغناطیسی بالا، مغناطش باقیمانده ی کم، منحنی هیستریزس کوچک و مقاومت الکتریکی زیاد نام برد [۱]. هنگامی که این مواد بخواهند در کاربرد هایی که میدان مغناطیسی اعمالی متناوب است مورد استفاده واقع شوند به دلیل تولید جریان های سرگردان به ویژه در فرکانس های بالا و در نتیجه تلفات حرارتی و کاهش نفوذ پذیری و چگالی شار مغناطیسی، داشتن مقاومت الکتریکی بالا به منظور کاهش تلفات از اهمیت بالایی برخوردار است.

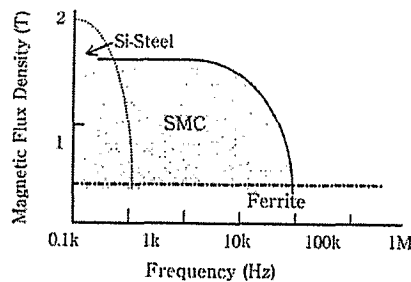
به منظور افزایش مقاومت الکتریکی مواد مغناطیسی نرم از کامپوزیت های مغناطیسی نرم استفاده می شود. این کامپوزیت ها شامل دسته ای از پودر های مغناطیسی بوده که توسط یک ماده ی دی الکتریک با مقاومت الکتریکی زیاد پوشش داده می شوند. (شکل ۱-۱) سپس این پودر ها توسط پروسه متالورژی پودر فشرده سازی شده و پس از تهیه ی نمونه خام از این مواد، به منظور بهینه سازی خواص مغناطیسی و مکانیکی یک عملیات حرارتی نهایی انجام می شود.



شکل ۱-۱ تصویر شماتیک از ساختار کامپوزیت های مغناطیسی نرم [۲].

از مهمترین مزایای قطعات تولید شده از این کامپوزیت ها نسبت به قطعات تولید شده از فولاد های لایه ای می توان به داشتن خواص مغناطیسی همسانگرد در سه بعد، تلفات جریان های گردابی بسیار پایین و تلفات مغناطیسی کل نسبتا پایین در محدوده فرکانس های متوسط و بالا اشاره کرد [۳]. همچنین به دلیل استفاده از پروسه ی متالورژی پودر در تولید این کامپوزیت ها، مقدار ماده ی هدر رفته بسیار کم و ابعاد نمونه ی تولید شده به ابعاد نهایی بسیار نزدیک است. از دیگر مزایای این مواد نسبت به فولاد های لایه ای، تولید هسته هایی با اندازه و وزن کمتر، قیمت پایین تر و بازدهی بالاتر می باشد.

شکل ۱-۲ محدوده فرکانس کاری این کامپوزیت ها را نشان می دهد، مطابق این شکل در فرکانس های پایین چگالی شار مغناطیسی در فولاد های لایه ای بالاتر است اما به دلیل تلفات ناشی از جریان های گردابی این مقدار به سرعت کاسته می شود. همچنین فریت ها به دلیل داشتن چگالی شار مغناطیسی پایین در محدوده فرکانس های کارایی خوبی ندارند، اما مطابق شکل، کامپوزیت های مغناطیسی نرم در محدوده وسیعی از فرکانس بیشترین چگالی شار مغناطیسی و در نتیجه بازدهی را دارند.



شکل ۱-۲ انواع مواد مغناطیسی نرم و محدوده فرکانس کاری آن ها [۴].

در تولید این کامپوزیت ها پارامتر های فراوانی جهت کنترل خواص مغناطیسی و بهینه سازی آن خواص وجود دارد. این پارامتر ها می توانند پارامتر های مربوط به پودر، پروسه تولید پوشش های دی الکتریک روی ذرات، فشرده سازی و عملیات حرارتی نهایی باشند.

در تولید کامپوزیت های مغناطیسی نرم معمولا از دو دسته پوشش های دی الکتریک استفاده می گردد، پوشش های مورد نظر می توانند آلی و یا غیر آلی باشند. هنگامی که از پوشش های آلی به منظور تولید این کامپوزیت ها استفاده می شود ، معمولا از پوشش های پلیمری ترموست به دلیل سهولت اعمال آن ها در پوشش دادن، تغییرات کمتر ساختار این مواد با درجه حرارت نسبت به سایر پلیمرها و در نتیجه حفظ خواص مکانیکی و مغناطیسی کامپوزیت های تولیدی استفاده می گردد. اما به دلیل عدم تر شوندگی مناسب سطح پودر ها و پلیمر امکان پوشش دادن یکنواخت سطح تمام پودر ها کم بوده و تلفات مغناطیسی کامپوزیت های تولیدی به ویژه در فرکانس های بالا افزایش می یابد. همچنین امکان از بین بردن کامل تنش های پسماند و در نتیجه کاهش تلفات هیستریزس به دلیل امکان سوختن و یا تجزیه پلیمر در محدوده ی دماهایی که برای آنیل کردن این کامپوزیتها استفاده می شود وجود ندارد.

دسته دیگری از پوشش های به کار برده شده پوشش های غیر آلی هستند. این مواد می توانند از خانواده ی فسفات، اکسید و یا سولفات ها باشند. در این حالت به دلیل برخورداری پوشش از مقاومت حرارتی بالاتر نسبت به پوشش های پلیمری امکان آنیل کردن در دماهای بالاتر و از بین بردن تنش های پسماند بیشتر است. اما پوشش های غیر آلی به دلیل ماهیت تردشان حین فشرده سازی امکان تخریب و در نتیجه کاهش مقاومت کامپوزیت های تولیدی و افزایش تلفات جریان های گردابی را دارند. هم چنین به دلیل مشکلاتی مانند کنترل ضخامت و یکنواختی که در نحوه اعمال این پوشش ها بر روی پودر های فرومغناطیس وجود دارد، این مواد کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

در این تحقیق از پوشش های مختلفی به منظور بهینه سازی و مقایسه خواص مغناطیسی کامپوزیت های مغناطیسی نرم استفاده شده است. در این میان ابتدا به بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن با خلوص بالا و رزین فنولیک پرداخته شد. در این میان اثر پارامتر هایی مانند مقدار رزین، اندازه متوسط ذرات آهن و نیز فشار پرس بر خواص الکتریکی و مغناطیسی این کامپوزیت ها بررسی گردید. در ادامه اثر آماده سازی سطحی پودر های آهن با عامل کوپل کننده سیلان و تاثیر آن بر خواص مغناطیسی کامپوزیت تولید شده مورد مطالعه قرار گرفت.

سپس از پوششهای غیر آلی مانند پوشش های فسفات آهن و نیز پوشش های دو لایه فسفات آهن- رزین فنولیک و فسفات آهن- آمینوسیلان به منظور تولید کامپوزیت استفاده شده و اثر عملیات حرارتی آنیل در دما و زمان های متفاوت بر روی خواص مغناطیسی و تغییر ساختار پوشش های اعمالی بررسی شد.

به منظور اندازه گیری خواص مغناطیسی از LCR متر و VSM استفاده گردید. همچنین برای مطالعه پوشش های اعمالی و نیز اندازه گیری میزان کرنش های داخلی از آنالیزهای تفرق اشعه ایکس (XRD)، طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز عنصری EDS استفاده شد.

نتایج نشان دادند که افزایش مقدار رزین و استفاده از پودر های ریزتر منجر به کاهش افت نفوذپذیری و فاکتور تلفات مغناطیسی در فرکانس های بالا شد. همچنین آماده سازی پودر های آهن با عامل کوپل کننده ی سیلان منجر به کاهش فاکتور تلفات و افزایش فرکانس کاری بدون کاهش نفوذ پذیری مغناطیسی در فرکانس های پایین گردید. استفاده از پوشش های دو لایه ی فسفات آهن- آمینوسیلان بر روی پودر های آهن، توانایی آنیل کامپوزیت های تولید شده از این پودر هارا تا دمای ۶۰۰ درجه ی سانتیگراد بالا برده که این اثر منجر به کاهش تلفات هیستریزیس و نیز کاهش تلفات جریان های گردابی در مقایسه با کامپوزیت های تولید شده از پودر های آهن فسفات شده.