

بررسی ویژگی‌های مغناطیسی کامپوزیت‌های نرم مغناطیسی پایه آهن پوشش داده شده با عایق سیلیکات سدیم

مریم عموهادی^{۱*}، مرتضی مظفری^۲، عبدالرسول قرائتی^۱ و محمد رضازاده^۳

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، ایران

۲. گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

۳. دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۳۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴)

چکیده- در این پژوهش پودرهای آهن (~۴۵ میکرومتر) با کمینه خلوص ۹۹ درصد با یک تا چهار درصد وزنی از ماده عایق سیلیکات سدیم ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$) محلول در ۴۰ درصد وزنی آب و ۰/۵ درصد استئارات روی عایق‌بندی شدند. پودرهای عایق‌بندی شده با فشار ۳۲۰ مگاپاسکال در یک قالب به شکل چنبره فشرده شدند. اثرهای درصد عایق و دمای بازیخت روی تراوایی مغناطیسی، تانژانت اتلاف هسته و تلفات کل بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که این ماده عایق برای عایق‌بندی پودرهای آهنی، به کار رفته در هسته‌های پودری آهن تا بسامدهای ۱۰۰۰ کیلوهرتز مناسب است. همچنین این ماده تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در برابر گرما پایدار است.

واژه‌های کلیدی: هسته‌های پودری آهن، عایق‌کاری، تراوایی مغناطیسی، اتلاف هسته، سیلیکات سدیم.

An Investigation of the Magnetic Properties of Iron-based Soft Magnetic Composites Coated by Sodium Silicate Insulator

M. Amoohadi^{1*}, M. Mozaffari², A. Gharaati¹ and M. Rezazadeh³

1. Department of Physics, Payamenoor University, Iran.

2. Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

3. Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: In this study, iron powder (~45 μm) with the minimum purity of 99% was insulated by the 1 to 4 wt% sodium silicate insulator ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$ solution in 40 wt% water) and the 0.5 wt% zinc stearate. Insulated powders were pressed in a die with a toroidal shape at the pressure of 320 MPa. The effects of insulator percentage and annealing temperature on the magnetic permeability, core loss tangent, and the total loss were investigated. The results indicated that the sodium silicate insulator could be suitable for insulating iron powders used in iron powder cores for high frequencies up to 1000 kHz. Also, this insulator could be stable against heat up to 450 °C.

Keywords: Iron powder cores, Insulating, Magnetic Permeability, Core Loss, Sodium Silicate.

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.amoohadi@student.pnu.ac.ir

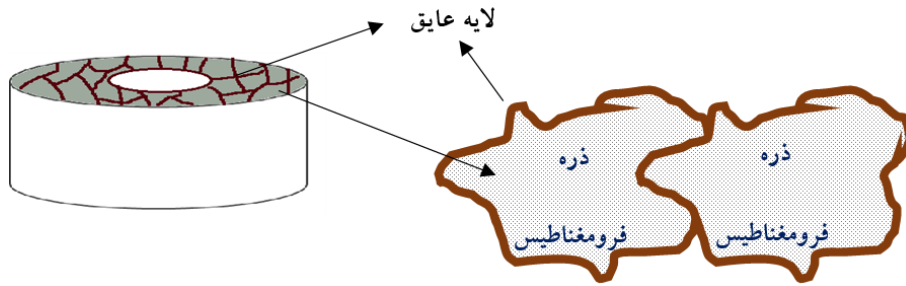
| | | | |
|-------|---|----------------------|--|
| A_e | سطح مقطع مؤثر (m^2) | R_p | مقاومت هسته در حالت موازی (Ω) |
| k_1 | ضریب تانژانت اتلاف اهمی (بدون واحد) | R_s | مقاومت هسته در حالت سری (Ω) |
| k_2 | ضریب تانژانت اتلاف هیستریسیس (بدون واحد) | R_w | مقاومت اهمی سیم پیچ (Ω) |
| k_3 | ضریب تانژانت اتلاف جریان گردابی (بدون واحد) | V | حجم (m^3) |
| k_4 | ضریب تانژانت اتلاف باقی مانده (بدون واحد) | V_{rms} | ولتاژ مؤثر دوسر هسته (V) |
| L_p | خود القای هسته در حالت موازی (H) | $\tan\delta_{total}$ | تانژانت اتلاف کل (بدون واحد) |
| L_s | خود القای هسته در حالت سری (H) | μ_r' | بخش حقیقی تراوایی نسبی (بدون واحد) |
| N | تعداد دورها (بدون واحد) | μ_0 | تراوایی مغناطیسی خالص (m/H) |
| P_c | تلفات کل هسته (mW/cm^3) | ω | بسامد زاویه‌ای (rad/s) |
| Q | سازه کیفیت (بدون واحد) | | |

۱- مقدمه

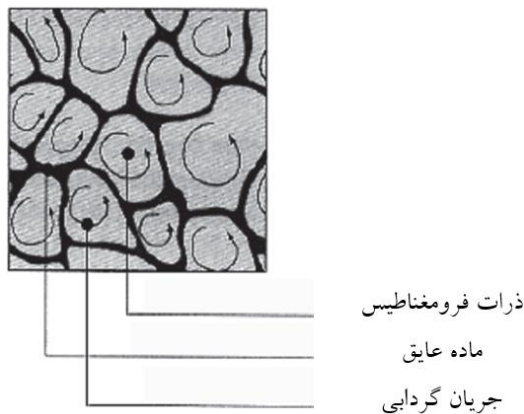
روند [۲].

کامپوزیت‌های مغناطیسی نرمی که در هسته‌های پودری به کار می‌روند، از ذرات فرومغناطیسی تشکیل شده‌اند که با یک لایه نازک از عایق پوشیده شده است، شکل (۱). این هسته‌ها معمولاً به روش متالورژی پودر به شکل و اندازه دلخواه، مانند چنبره شکل داده می‌شوند [۱]. ماده فرومغناطیس تشکیل دهنده این هسته‌ها معمولاً آهن خالص یا آلیاژهای آن، مانند آهن-سیلیسیم، آهن-سیلیسیم-آلومینیوم، آهن-نیکل، آهن-کبالت یا آلیاژهای دیگر آهن است. هسته‌های پودری آهنی، از پودر آهن احیا شده با هیدروژن با کمینه خلوص ۹۹ درصد یا آهن کربنیلی با خلوص بالاتر و البته پرهزینه‌تر ساخته می‌شوند [۱]. هسته‌های پودری آهنی می‌توانند بر پایه تراوایی شان به سه دسته تراوایی بالا، میانه و پایین دسته‌بندی شوند [۲]. هسته‌ها با تراوایی نسبی بالا (از ۶۰ تا ۹۰) که بیشتر برای ذخیره‌سازی انرژی در پالایه‌ها و تا بسامدهای ۷۵ کیلوهرتز به کار می‌روند. بسامد کاربردی هسته‌های آهنی با تراوایی نسبی میانه (از ۲۰ تا ۶۰) از ۵۰ تا ۲۰۰۰ کیلوهرتز است. کاربرد ویژه این هسته‌ها برای کار در منبع‌های تغذیه کلیدزنی، در بسامدهای میان ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ است. هسته‌های پودری با تراوایی نسبی پایین (از ۷ تا ۲۰) که در بسامدهای رادیویی تا ۱۰۰۰ مگاهرتز به کار می‌روند

افزون بر تراوایی مغناطیسی، پارامتر مهم دیگر تلفات کل هسته است که شامل تلفات جریان گردابی، تلفات پسماند، تلفات اهمی سیم پیچ و تلفات باقی مانده است [۳]. در هسته‌های پودری، لایه عایقی که روی ذرات فرومغناطیسی نشاند می‌شود مقاومت الکتریکی را افزایش داده و بدین ترتیب باعث کاهش تلفات جریان گردابی می‌شود که سهم چیره در اتلاف کل در بسامدهای بالا دارد (شکل ۲) [۱]. پژوهش‌های بسیاری روی مواد عایق‌ساز شامل مواد آلی (مانند رزین‌های سیلیکونی، اپوکسی و فنولیکی و...) و مواد غیرآلی (مانند فسفات‌ها، اکسیدها و...) انجام شده است [۴-۸]. برتری عایق‌بندی با مواد آلی سرعت بالای ساخت نمونه، چگالی خام بالا و بی‌نیازی از فرایند خشک کردن گرمایی است [۹]. ولی پایداری گرمایی رزین‌ها پایین بوده و به هنگام بازپخت هسته که معمولاً برای تنش‌زدایی در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود، تجزیه می‌شوند [۱۰]. پوشش‌های غیرآلی که به روش‌های گوناگون همانند سل-ژل [۷]، امولسیون وارون [۱۱] و... ساخته می‌شوند، به پوشش‌های پایدار در برابر گرما تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌انجامد [۱۱]. امروزه هدف بیشتر پژوهش‌ها، تهیه کامپوزیت‌هایی با روش‌هایی سریع، آسان و کم‌زیان، همراه با حفظ یا افزایش



شکل ۱- نمایی از ذرات فرومغناطیس عایق‌بندی شده



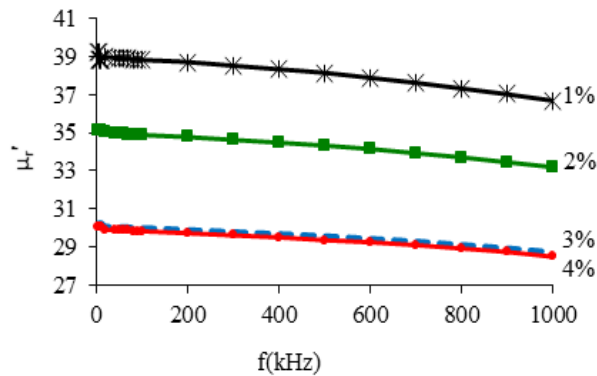
شکل ۲- نمایی از عایق‌بندی ذرات پودر فرومغناطیس برای کاهش جریان گردابی (به‌خاطر وجود لایه‌های عایق مسیرهای جریان گردابی کوچک می‌شوند)

فشار ۳۲۰ مگاپاسکال در یک قالب به شکل چنبره به قطر درونی ۲۳/۹، قطر بیرونی ۳۲/۸ و بلندی حدود پنج میلی‌متر شکل داده شدند. این نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک دستگاه خشک‌کن به مدت یک ساعت و در هوا خشک شد. چگالی نمونه‌ها به روش ارشمیدس و با یک ترازوی ویژه با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد [۱۲]. برای تنش‌زدایی از نمونه‌های پرس شده، به آنها در یک دستگاه کوره لوله‌ای الکتریکی ساخت شرکت اکسایتون و در فضای آرگون با آهنگ گرمایش دو درجه بر دقیقه تا دماهای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده و به مدت یک ساعت در این دما نگه‌داشته شد. سپس نمونه‌ها آزادانه تا دمای اتاق سرد شدند. این هسته‌ها با سیم مسی روکش‌دار با قطر (۰/۷ میلی‌متر) ۳۰ دور سیم‌پیچی و کمیت‌های L_s و R_s آنها با یک دستگاه LCR سنج فلوکس مدل (PM6306) در بازه بسامدی ۴ تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز در

تراوایی و کاهش تلفات در بازه‌های بسامدی گوناگون است. در این پژوهش ذرات آهن با مخلوطی از عایق سیلیکات سدیم و استئارات روی با درصدهای گوناگون عایق‌کاری شد. تراوایی مغناطیسی، تانژانت اتلاف هسته و تلفات کل هسته‌ها در بسامدهای گوناگون اندازه‌گیری و چگونگی تغییرات و رفتار آنها مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

پودر آهن (با کمینه خلوص ۹۹ درصد و اندازه کوچک‌تر از ۴۵ میکرون) از شرکت آلمانی متال پاور با درصدهای وزنی گوناگون عایق سیلیکات سدیم ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$) محلول در ۴۰ درصد وزنی آب از یک تا چهار درصد و ۰/۵ درصد استئارات روی در یک هاون چینی به‌خوبی مخلوط شدند. سپس کامپوزیت به‌دست آمده با یک دستگاه پرس هیدرولیکی و با



شکل ۳- تغییرات بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی برحسب بسامد برای گوناگون عایق سیلیکات سدیم

بسامدها با افزایش درصد ماده عایق کاری تراوایی کاهش می‌یابد. با توجه به آنکه تراوایی افزون بر ترکیب شیمیایی و ساختار بلوری [۱۴]، به چگالی نمونه، فاز یا فازهای نامغناطیسی، تخلخل‌ها، ناهمسانگردی مغناطیسی، مغناطوتنگش و ... بستگی دارد، کاهش تراوایی را می‌توان به تأثیر این کمیت‌ها در اثر حضور ماده عایق‌ساز بر سرعت جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها و چرخش گشتاورهای مغناطیسی نسبت داد [۱۵]. برای نمونه، مواد نامغناطیسی در میان ذرات مغناطیسی همانند گاف هوایی رفتار کرده و باعث به‌وجود آمدن میدان وامغناطش در نمونه می‌شود که این خود به کاهش تراوایی اولیه می‌انجامد [۱۶]. همچنین کاهش تراوایی با افزایش درصد ماده عایق‌ساز می‌تواند به دلیل کاهش چگالی از ۵۷۵۰ به ۵۴۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد. چنین کاهشی در تراوایی با افزایش درصد ماده عایق‌ساز برای پودرهای آهن پوشش داده شده با پلی‌اپوکسی، نیز پیشتر گزارش شده است [۱۵].

شکل (۴) تغییرات تانژانت اتلاف هسته، برحسب بسامد را برای درصدهای گوناگون ماده عایق‌ساز نشان می‌دهد. وابستگی تانژانت اتلاف کل به بسامد را می‌توان بر پایه مدل جداسازی تلفات، به چهار بخش مربوط به اتلاف اهمی ($\tan \delta_{dc}$)، اتلاف پسماند ($\tan \delta_h$)، اتلاف جریان گردابی ($\tan \delta_e$) و اتلاف باقی‌مانده ($\tan \delta_r$) بخش‌بندی کرد [۳]، به‌گونه‌ای که:

$$\tan \delta_{total} = \tan \delta_{dc} + \tan \delta_h + \tan \delta_e + \tan \delta_r = k_1 / f + k_2 + k_3 f + k_4 (f) \quad (4)$$

که در آن k_1 ، k_2 ، k_3 و k_4 به ترتیب ضرایب‌های تانژانت اتلاف

چگالی شار مغناطیسی پایین اندازه‌گیری شد. سپس بخش حقیقی تراوایی نسبی (μ_r') و تانژانت اتلاف از رابطه‌های زیر محاسبه شدند [۳]:

$$\mu_r' = \frac{L_s I_m}{\mu_e A_e N^2} \quad (1)$$

$$\tan \delta_{total} = \frac{R_s}{\omega L_s} \quad (2)$$

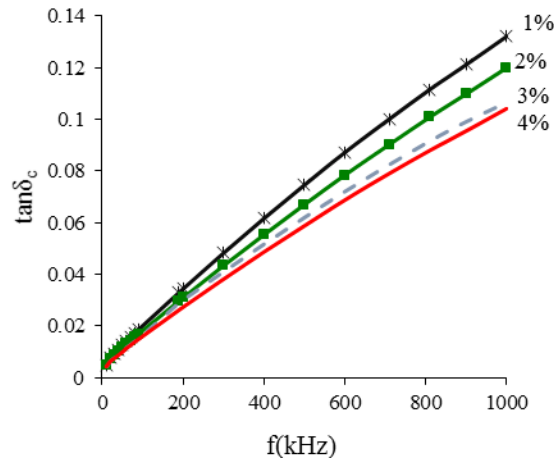
که در آنها ω بسامد زاویه‌ای، L_s خودالقای هسته در حالت سری، A_e سطح مقطع مؤثر، N تعداد دورها و I_m طول میانگین مسیر شار مغناطیسی است [۳]. تلفات کل هسته در یکای حجم از استاندارد IEC- 60404-6-2003 بر پایه رابطه (۳) محاسبه شد [۱۳]:

$$P_c = \frac{v_{rms}^2}{V} \left[\frac{1}{R_p} - \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{\omega^2 L_p} \right) R_w \right] \quad (3)$$

که در آن V حجم نمونه R_p ، L_p ، R_w و v_{rms} به ترتیب مقاومت اهمی سیم‌پیچ، مقاومت هسته در حالت موازی، خودالقای هسته در حالت موازی و ولتاژ مؤثر دوسر هسته است که همگی با دستگاه LCR سنج در چگالی شار پایین (کمتر از ۰/۴ میلی‌تسلا) اندازه‌گیری می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) تغییرات بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی برحسب بسامد برای درصدهای گوناگون عایق از یک تا چهار درصد، نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود در همه



شکل ۴- تغییرات تانژانت اتلاف هسته برحسب بسامد برای درصد‌های گوناگون ماده عایق‌ساز

جدول ۱- ضریب اتلاف هیستریسیس، گردابی و سازه کیفیت برای نمونه‌ها با درصد‌های گوناگون ماده عایق‌ساز

| درصد ماده عایق‌ساز | ضریب اتلاف محاسبه شده مربوط به هیستریسیس ($k_r \times 10^{-3}$) | ضریب اتلاف محاسبه شده مربوط به جریان گردابی ($k_p \times 10^{-7}$) | Q_{max} |
|--------------------|---|--|-----------|
| ۱ | ۶/۵۶ | ۱/۳۸ | ۳۵/۴ |
| ۲ | ۶/۱۳ | ۱/۱۸ | ۳۶/۶ |
| ۳ | ۵/۹۷ | ۱/۰۷ | ۳۶/۷ |
| ۴ | ۵/۴۴ | ۱/۰۳ | ۳۵/۸ |

سازه کیفیت^۲ را برای هر هسته در هر بسامد از رابطه (۵):

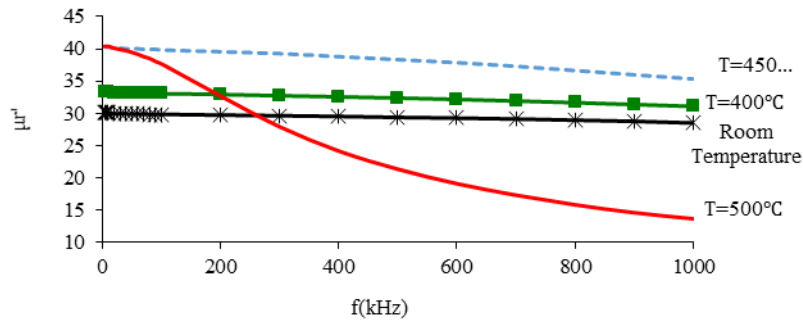
$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (5)$$

به دست آورد که بیشینه آن برای درصد‌های گوناگون ماده عایق‌ساز در جدول (۱) آمده است. با توجه به عددهای به دست آمده، بیشینه سازه کیفیت مربوط به نمونه با سه درصد ماده عایق‌ساز است. اگرچه بازپخت و اندازه‌گیری‌ها بر همه نمونه‌ها انجام شد، اما به دلیل رفتار همانند آنها تنها نتایج مربوط به نمونه سه درصد که بیشینه سازه کیفیت را دارد، گزارش شده است.

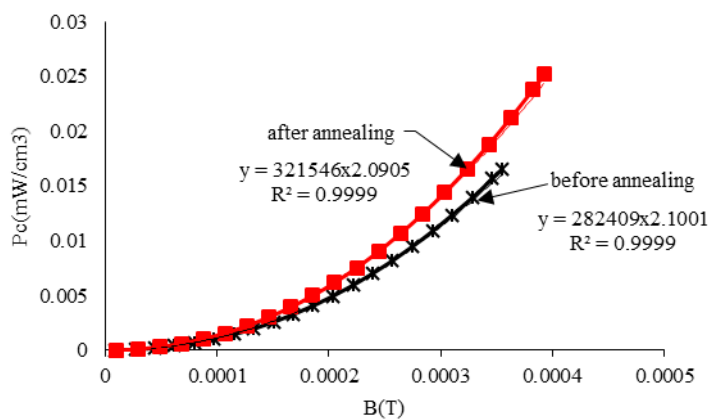
شکل (۵) بخش حقیقی تراوایی برحسب بسامد را پیش و پس از بازپخت در دماهای ۴۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود در اثر بازپخت تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بخش حقیقی تراوایی در همه بسامدها افزایش یافته که به دلیل افزایش بلورینگی و کاهش چگالی دررفتگی‌ها است [۱۶]. زیرا در فرایند فشردن سرد برخی تغییر شکل‌های پلاستیکی در ذرات پودر ایجاد می‌شود

اهمی، هیستریسیس، جریان گردابی و باقی‌مانده است که ضریب تانژانت اتلاف باقی‌مانده می‌تواند تابعی از بسامد باشد. گفتنی است که برای به دست آوردن تانژانت اتلاف مربوط به هسته، سهم مربوط به اتلاف اهمی پیچیه، $\tan \delta_{dc} = \frac{R_{dc}}{\omega L_s}$ را از تانژانت اتلاف کل کم کرده‌ایم [۱۷].

با توجه به شکل (۴) می‌توان دید که تغییرات تانژانت اتلاف برحسب بسامد خط‌هایی با عرض از مبدأ ناصفر است که با توجه به رابطه (۴) نشانگر چیرگی سهم برآمده از اتلاف جریان گردابی و هیستریسیس بر سهم‌های دیگر و امکان چشم‌پوشی از اینها است. در جدول (۱) ضریب اتلاف جریان گردابی و اتلاف هیستریسیس هر نمونه برحسب درصد ماده عایق‌ساز آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ضریب‌های اتلاف جریان گردابی و هیستریسیس با افزایش درصد ماده عایق‌ساز کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده اثر ماده عایق‌ساز بر کاهش اتلاف در هسته‌های مغناطیسی است. همچنین می‌توان



شکل ۵- بخش حقیقی تراوایی برحسب بسامد برای نمونه با سه درصد ماده عایق‌ساز و بازپخت شده در دماهای ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۶- تلفات کل هسته برحسب میدان مغناطیسی کاربرتی را برای نمونه با سه درصد ماده عایق‌ساز پیش و پس از بازپخت در بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز که نشان‌دهنده وابستگی درجه ۲/۰۱ تلفات با چگالی شار میدان مغناطیسی است

کاربرستی را در بسامد ۱۰۰ کیلوهرتز برای نمونه با سه درصد ماده عایق‌ساز پیش و پس از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود منحنی تغییرات P برحسب B یک منحنی توانی است و بر پایه مدل استینمتز^[۲۰] $P = CB^\beta f^\alpha$ ، در بسامد ثابت ۱۰۰ کیلوهرتز، β حدود ۲/۰۱ به‌دست می‌آید که با محاسبه تلفات بر پایه بردار پوتینگ و وابستگی درجه دو انرژی مصرفی با چگالی شار مغناطیسی، در توافق است [۲۰]. تلفات در بسامدهای ۱۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز نیز اندازه‌گیری شد. برای امکان مقایسه این اعداد با تلفات گزارش شده مربوط به نمونه‌های تجاری شرکت مگنتیکس^[۲۱ و ۲۲] با تراوایی ۴۰ برای هسته‌های آهنی، در هر بسامد با توجه به معادله به‌دست

که به افزایش چگالی دررفتگی‌ها می‌انجامد. این دررفتگی‌ها همانند مراکز میخکوبی رفتار کرده و از حرکت آسان دیواره حوزه‌های مغناطیسی جلوگیری می‌کنند. بازپخت باعث می‌شود کسر حجمی ناراستی‌ها کاهش یافته و با کاهش چگالی دررفتگی‌ها و نابجایی‌ها، تراوایی افزایش یابد [۴]. مقایسه تغییرات بخش حقیقی تراوایی نمونه بازپخت شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با تغییرات نمونه‌های دیگر نشان می‌دهد که عایق به‌کار رفته تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در برابر گرما پایدار بوده، ولی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد افت ناگهانی بخش حقیقی تراوایی نسبت به بسامد نشان‌دهنده از میان رفتن عایق موردنظر، افزایش تخلخل‌ها و به‌دنبال آن کاهش شدید مقاومت الکتریکی و افزایش جریان گردابی است [۱۸].

شکل (۶) تلفات کل هسته برحسب میدان مغناطیسی

جدول ۲- تلفات محاسبه شده بر حسب میلی وات بر سانتی متر مکعب در القای $B = 0.1 \text{ T}$ برای نمونه با سه درصد ماده عایق ساز

| نمونه | بسامد | $f=10$ (کیلوهرتز) | $f=100$ (کیلوهرتز) | $f=200$ (کیلوهرتز) |
|--|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| پیش از بازپخت | | ۹۵۸ | ۲۲۴۲ | ۶۳۰۸ |
| پس از بازپخت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد | | ۸۷۷ | ۲۶۱۳ | ۷۴۸۸ |
| نمونه‌های تجاری با تراوایی مغناطیسی ۴۰ | | ۲۸۱-۵۶۲ | ۲۲۵۳-۵۴۰۷ | ۶۲۰۰-۱۴۸۸۰ |

۳- برای بسامد ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز تلفات کل افزایش یافته است که به دلیل افزایش تلفات جریان گردابی در اثر بازپخت است و سهم بزرگی در این بسامدها دارد [۷ و ۱۱].

۴- نتیجه گیری

(۱) در بسامدهای بالا (تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز) عایق سیلیکات سدیم به دلیل تلفات کل کم برای عایق بندی پودرهای آهنی که در هسته‌های پودری آهن به کار می‌روند، مناسب است.
(۲) عایق سیلیکات سدیم تا دمای ۴۵۰ در برابر گرما پایدار است.

آمده برای P از نمودار شکل (۶)، تلفات کل برای $B = 0.1 \text{ T}$ برون یابی و در جدول (۲) آمده است. از محاسبه تلفات نتیجه‌های زیر به دست می‌آید:

۱- برای بسامدهای ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوهرتز تلفات کل به دست آمده کمتر و یا نزدیک به حد پایین نمونه‌های تجاری است؛ بنابراین عایق به کار رفته برای عایق بندی در بسامدهای بالا تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز مناسب است.

۲- در بسامد ۱۰ کیلوهرتز تلفات کل پس از بازپخت کاهش یافته که به دلیل کاهش تلفات هیستریسیس در اثر بازپخت است و سهم بزرگی در این بسامد دارد [۷ و ۱۱].

واژه‌نامه

1. fluke
2. quality factor

3. magnetics, pennsylvania

مراجع

1. López-Fernández, X. M., and Turowski, H. B. J., *Transformers: Analysis, Design, and Measurement*, p. 593, CRC Press, 2012.
2. Arnold, G., "Soft Magnetics Application Guide", *Review A*, Vol. 30, pp. 31-36, 2003.
3. Snelling, E. C., and Giles, A., *Ferrites for Inductors and Transformers*, p. 167, Ltd London, 1983.
4. Wu, S., Sun, A., Zhai, F., Wang, J., Zhang, Q., Xu, W., Logan, P., and Volinsky, A. A., "Annealing Effects on Magnetic Properties of Silicone-coated Iron-based Soft Magnetic Composites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, pp. 818-822, 2012.
5. Dias, M., Mozetic, H., Barboza, J., Martins, R., Pelegrini, L., and Schaeffer, L., "Influence of Resin Type and Content on Electrical and Magnetic Properties of Soft Magnetic Composites (SMCs)", *Powder Technology*, Vol. 237, pp. 213-220, 2013.
6. Kollár, P., Vojtek, V., Birčáková, Z., Fúzer, J., Fáberová, M., and Bureš, R., "Steinmetz Law in Iron-phenol Formaldehyde Resin Soft Magnetic Composites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 353, pp. 65-70, 2014.
7. Yaghtin, M., Taghvaei, A. H., Hashemi, B., and Janghorban, K., "Effect of Heat Treatment on Magnetic Properties of Iron-based Soft Magnetic Composites with Al_2O_3 Insulation Coating Produced by Sol-gel Method", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 581, pp. 293-297, 2013.
8. Strečková, M., Medvecký, L., Fúzer, J., Kollár, P., Bureš, R., and Fáberová, M., "Design of Novel Soft Magnetic Composites Based on Fe/Resin Modified with Silica", *Materials Letters*, Vol. 101, pp. 37-40, 2013.

9. Streckova, M., Bures, R., Faberova, M., Medvecký, L., Fuzer, J., and Kollar, P., "A Comparison of Soft Magnetic Composites Designed from Different Ferromagnetic Powders and Phenolic Resins", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 736-743, 2015.
10. Xiao, L., Sun, Y., Ding, C., Yang, L., and Yu, L., "Annealing Effects on Magnetic Properties and Strength of Organic-silicon Epoxy Resin-coated Soft Magnetic Composites", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, pp. 2049-2058, 2014.
11. Wu, S., Sun, A., Lu, Z., Cheng, C., and Gao, X., "Magnetic Properties of Iron-based Soft Magnetic Composites with SiO₂ Coating Obtained by Reverse Microemulsion Method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 381, pp. 451-456, 2015.
12. Wilson, J. D., *Physics Laboratory Experiments*, p. 537, Mary Finch, 2010.
13. International standard, International Electrotechnical Commission, IEC 60404-6, *Magnetic Materials*. Part 6: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Magnetically Soft Metallic and Powder Materials at Frequencies in the Range 20 Hz to 200 kHz by the Use of Ring Specimens, pp. 1-59, 2003.
14. Goldman, A., *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*, p. 55, Springer Science & Business Media, 2012.
15. Shokrollahi, H., Janghorban, K., Mazaleyrat, F., Bue, M. L., Ji, V., and Tcharkhtchi, A., "Investigation of Magnetic Properties, Residual Stress and Densification in Compacted Iron Powder Specimens Coated with Polyepoxy", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 114, pp. 588-594, 2009.
16. Cullity, B. D., and Graham, C. D., *Introduction to Magnetic Materials*, p. 655, John Wiley & Sons, 2011.
17. Taghvaei, A. H., Shokrollahi, H., and Janghorban, K., "Structural Studies, Magnetic Properties and Loss Separation in Iron-phenolicsilane Soft Magnetic Composites", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 142-148, 2010.
18. Huang, M., Wu, C., Jiang, Y., and Yan, M., "Evolution of Phosphate Coatings during High-Temperature Annealing and Its Influence on the Fe and FeSiAl Soft Magnetic Composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 644, pp. 124-130, 2015.
19. Krings, A., Nategh, S., Stening, A., Grop, H., Wallmark, O., and Souldard, J., "Measurement and Modeling of Iron Losses in Electrical Machines", *5th International Conference Magnetism and Metallurgy WMM'12*, Ghent, Belgium, pp. 101-119, 2012.
20. Tumanski, S., *Handbook of Magnetic Measurements*, p. 382, CRC Press, 2016.
21. Swihart, M. A., "Magnetic Materials Properties and Applications Part 2: Inductors", *Science Direct*, pp. 38-40, 2007.
22. Product Catalog, *Magnetics Powder Core Catalog*, Magnetic-Inc., pp. 3-12, 2013.