نشریهی مهندسی متالورژی و مواد

## بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مغناطیسی نوارهای بیشکل Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>\*

رضا بختیاری (۱) علی جزایری قرهباغ (۲) مهدی کیانی (۳) بهزاد بینش (۱)

#### چکیدہ

تنش های پس ماند ناشی از سرد شدن سریع مذاب در فرایند مذاب ریسی (Melt Spinning) را می توان با انجام عملیات حرارتی آرامش ساختاری در دماهایی پایین تر از دمای تبلور حذف کرد و خواص مغناطیسی را بهبود داد. در این تحقیق، ابتدا نوار بی شکل Fe<sub>78</sub>SigB<sub>13</sub> (با نام تجاری Metglas2605S2 مورد استفاده در هسته ی ترانسفورماتورها) به روش مذاب ریسی با دیسک مبرد و با ضخامت ۳۳ تولید شد و دمای شروع تبلور در آن به روش ATd و با نرخ گرمایش ۲۰ K/min برابر با ۲۰ ۵۰ تعیین شد. عملیات حرارتی نوارهای بی شکل درون گاز محافظ و در محدوده دمای ۲۰ ۵۰۰۰۰ و به مدت زمانهای ۱۵ تا ۲۰ دقیقه انجام شد. نتایج RRD نشان دهنده ی بی شکل درون شمان این می شد. نداین می در محدوده دمای ۲۰ ۶۰۰۰۰ و به مدت زمانهای ۲۰ تا ۲۰ دقیقه انجام شد. نتایج RP نشان دهنده ی می محدی نمونه ها به غیر از نوارهای تاب کاری شده در دماهای ۲۰ ۵۰۰ و ۲۰ ماند نتایج Fe<sub>2</sub>B و Fe<sub>2</sub>B و Fe<sub>2</sub>B و معلی شد. نتایج Fe<sub>1</sub>B می نشان دهنده ی بی شکل بودن ساختار شناسایی شدند. اندازه گیری خواص مغناطیسی با استفاده از دستگاه پس ماندنگار نشان داد که القای اشباع آلیاژ با افزایش دمای عملیات حرارتی افزایش می بابد. ترکیب مناسبی از خواص مغناطیسی در نمونه های بررسی شده با انجام عملیات حرارتی در مای ۲۰۰۰ به در در ماهای ۲۰ و را تریز در مان کار دمان عملیات زمان ۱۵ دقیقه به دست آمد.

**واژههای کلیدی** بی شکل، مذاب ریسی، انجماد سریع، Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>، عملیات حرارتی، تاب کاری، خواص مغناطیسی، تبلور

#### The Effect of Heat Treatment on Magnetic Properties of Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> Amorphous Ribbons

R. Bakhtiari A. Jazayeri Gharehbagh M. Kiani B. Binesh

#### Abstract

Residual stresses resulting from rapid quenching of molten metal in melt spinning process can be removed by structural relaxation of samples at temperatures lower than the crystallization temperature in order to improve the magnetic properties. In this research, amorphous  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  ribbons (Metglas 2605S2 used in transformer cores) with the thickness of 26  $\mu$ m were prepared by chill block melt spinning. DTA measurements on the ribbons heated with the rate of 20 K/min showed that the starting crystallization temperature is 535 °C. The ribbons were then heat treated in a protective gas for 15 to 60 minutes at temperatures in the range of 300-560 °C. XRD results revealed an amorphous structure for all the heat treated samples except for the samples annealed at 500 and 560 °C in which the structure were consisted of three crystalline phases of  $\alpha$ -Fe, Fe<sub>2</sub>B and Fe<sub>3</sub>B. The measurement of magnetic properties by Hysteresisgraph indicated that the saturation induction increases by an increase in the annealing time and/or annealing temperature. The best combination of magnetic properties was obtained after annealing at 400 °C for 15 minutes.

**Key Words** Amorphous, Melt spinning, Rapid solidification, Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>, Heat treatment, Annealing, Magnetic properties, Crystallization

(۲) دانشیار، پژوهشکدهی توسعهی تکنولوژی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف

<sup>\*</sup> نسخهی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/٦/۱٦ و نسخهی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۸/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

<sup>(</sup>۱) نویسندهی مسئول: دانشجوی دکترای مهندسی مواد، پژوهشکدهی توسعهی تکنولوژی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف

<sup>(</sup>۳) کارشناس ارشد مهندسی مواد، پژوهشکدهی توسعهی تکنولوژی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف

<sup>(</sup>٤) دانشجوی دکترای مهندسی مواد، پژوهشکدهی توسعهی تکنولوژی، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف

دستيابي به خواص مغناطيسي مطلوب تعيين شد.

## روش تحقيق

برای تولید آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> ، عملیات ذوب و آلیاژسازی با استفاده از مواد اولیّه با خلوص بالا شامل آهدن (٪٬۹۹۹)، سیلیسیم (٪٬۹۸۹) و بور (٪٬۹۹۹)، انجام شدند. برای این منظور، از یک دستگاه دو منظوره ی ذوب القایی و مذاب ریسی همراه با گاز محافظ که در جهاد دانشگاهی شریف طراحی و ساخته شده است، استفاده شد. در این دستگاه، با ستفاده از پمپهای مکانیکی و روغنی ابتدا خلایی بهمیزان حدود mbar <sup>٥</sup> ایجاد شد و پس از پر کردن محفظه با گاز آرگون با خلوص ۹۹۹۹۹، عملیات ذوب القایی درون محیط آرگون انجام گرفت.

برای تولید نوارهای نازک با انجماد سریع، از فرایند مذابریسی با دیسک مبرد ( Chill Block Melt ) فرایند مذابریسی با دیسک مبرد ( Spinning) استفاده شد. به منظور تعیین عوامل بهینهی فرایند برای آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> در جدول (۱)، چند آزمون با عوامل مختلف انجام گرفت. شرایط بهینه بر اساس ضخامت مناسب نوار برای به دست آوردن ساختار بی شکل با انعطاف پذیری خوب، کیفیت ظاهری مناسب، عدم دندانه دار شدن لبه ها و عرض مناسب به منظور تهیه ی نمونه های استاندارد آزمون خواص مغناطیسی، تعیین شدند.

جدول ۱ عوامل بهینهی فرایند مذاب ریسی و ابعاد نوارهای بی شکل تولید شده از آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>

ضخامت نوار (mu)	پهنای نوار (mm)	فاصلەی نازل تا سطح دیسک (mm)	فشار تزریق مذاب (mbar)	سرعت خطی دیسک (s/m)	قطر سوراخ نازل (mu)
۲٦	•/٨٨	۲/٥	200	۳.	200

مقدمه

آلیاژهای مغناطیسی بی شکل بهدلیل برخورداری از خواص نرم مغناطیسی مناسب نظیر نفوذپذیری (Coercivity) بالا، نیروی پسماندزدای(Coercivity) پایین و مقاومت الکتریکی زیاد، دارای کاربردهای وسیعی بهعنوان هستهی ترانسفورماتورها و مبدلها هستند [1-3]. این آلیاژها با فرایند انجماد سریع تولید می شوند، به گونهای که سرعت سرد شدن بسیار بالای مذاب آنها (K/s ۲۰۱۰) ساختار بی شکل (آمورف) را ایجاد می شود. این ساختار کاملاً پایدار نیست و عملیات تابکاری ضمن انجام شنش زدایی، ساختار پایدارتری را به وجود می آورد. فرایند پایدار کردن آلیاژ، آرامسازی ساختار، تغییراتی در آرایش اتمها در ساختار بی شکل قبل از وقوع تبلور رخ می دهد که بر خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ تأثیر می گذارد [6,7].

آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> با نام تجاری Metglas2605S2 به حار معمول ترین آلیاژ بی شکل به کار رفته در هسته ی ترانسفورماتورها می باشد. این آلیاژ با توجه به خواص برتر نسبت به آلیاژهای مرسوم Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> م (Metglas2605S) Fe<sub>82</sub>Si<sub>6</sub>B<sub>12</sub> ، (Metglas2605) و (Metglas2605SC) Fe<sub>81.5</sub>Si<sub>3.5</sub>B<sub>13.5</sub>C<sub>2</sub> ترانسفورماتورها جای گزین شده است [8,9]. تلفات Exciting کم تر، و نیز پایین تر بودن حساسیت این فسته (Core loss) کم تر، و نیز پایین تر بودن حساسیت این خواص به دما، از دیگر مشخصات برتر آلیاژ خواص به دما، از دیگر مشخصات برتر آلیاژ (10,11]. این آلیاژ ممکن است با تبلور به طور کامل ترد شده و در نتیجه کاربرد محدودی پیدا کند [12].

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار و خواص مغناطیسی آلیاژ بیشکل Metglas2605S2 میباشد. در این راستا، سیکلهای مختلف عملیات حرارتی با توجه به دمای تبلور این آلیاژ انجام شدند و در نهایت، سیکل مناسب برای از روش پراش اشعهی ایکس (XRD) بهمنظور شناسایی فازها و تعیین بیشکل بودن ریزساختار نمونههای مذابریسی شده و عملیات حرارتی شده استفاده شد. منبع تولید اشعهی X کاتد مسی بود و از شعهی CuKa با طول موج ۱/۵٤۱۸ آنگسترم برای شناسایی فازها استفاده شد. آزمونهای XRD در بازهی شناسایی فازها استفاده شد. آزمونهای XRD در بازهی زاویهی °۳۰ = ۲۵ تا °۹۰ = ۲۵ انجام گرفتتد. شناسایی فازهای موجود در ریزساختار بهکمک نرمافزارهای و PC-APD و PCPDFWIN که بر روی کامپیوتر متصل به دستگاه XRD نجام گرفت. و اطلاعات موجود در کتاب Hanawalt انجام گرفت.

بهمنظور تعیین دمای تبلور نوارهای بیشکل مذابریسی شده و مشخص کردن دمای عملیات حرارتی، از تحلیل حرارتی تفاضلی (DTA) استفاده شد. آزمون DTA با استفاده از دستگاه مدل NETZSCH STA 409 PC/PG با نرخهای گرمایش ۱۰،۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه انجام شد.

در مرحلهی بعد تحقیق، نمونهها عملیات حرارتی (تابکاری) شدند. برای این منظور، از یک کورهی لولهای با محیط آرگون استفاده شد. شرایط مختلف عملیات حرارتی آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> در جدول (۲) آورده شده است. دماهای انتخابی در این جدول بر اساس دمای تبلور این آلیاژ میباشند.

شرايط عمليات حرارتي كد نمونه دمای تابکاری (C⁰) زمان تابکاری (.min) M-300 ٤.. M-400-15 ۱۵ ۳. ٤.. M-400-30 ٦. ٤.. M-400-60 ۳. ٥٠٠ M-500 ۳۰ ٥٦٠ M-560

جدول ۲ شرایط عملیات حرارتی نوارهای بی شکل Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>

خواص مغناطیسی نمونههای حلقهای شکل از نوارها با قطر داخلی ۱۵ و قطر خارجی ۲۰ میلیمتر بـا

استفاده از دستگاه پسماندنگار (Hysteresis graph) مدل MATS-2018S در حالت ایستا اندازه گیری شدند.

# نتايج و بحث

*الف ساختار.* الگوهای XRD از هر دو سطح نوار مذابریسی شده که شامل سطح در تماس با دیسک و سطح آزاد (در تماس با محیط محفظه) هستند، در شکل (۱) آورده شدهاند. این الگوها نشان گر حضور تنها یک پیک پهن در طیف XRD می باشند. به این ترتیب، نوارها احتمالاً فاقد شبکهی بلوری بوده و ساختار آنها حین عملیات مذابریسی بی شکل شده است.



شکل ۲ الگوهای XRD از نمونههای عملیات حرارتی شده؛ (b) M-400-10)، (c) M-400-30)، (c)، و M-400-10) (d)



شکل های (۲) و (۳)، طیف های XRD از نمونههای عملیات حرارتی شده در شرایط مختلف را نشان می دهند. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می شود، برای نمونه های عملیات حرارتی شده در دماهای C° ۳۰۰ و C° ٤٠٠ و در زمان های مختلف، پیک باریک مشاهده نشد، و حضور پیک پهن نشاندهندهی بیشکل بودن احتمالی ساختار است. این نشان میدهد که با انجام سیکلهای عملیات حرارتی مذکور هیچ نوع فاز بلوری تشکیل نشده و یا انـدازهی خوشەھای بلوری تشکیل شدہ بەمیزانی نبودہ است کے با طیفنگاری XRD قابل تشخیص باشد (امکان ردیابی خوشههای بلوری با ابعاد کمتر از حدود ٥ نانومتر در کسرهای حجمی پایین توسط دستگاه XRD مشکل است). پیکهای باریکی که در الگوهای پراش نمونههای آنیل شده در دماهای C° ۵۰۰ و C° ۵۹۰ در شکل (۳) مشاهده می شوند حاکی از ایجاد فازهای بلوری حین عملیات حرارتی است. این پیکھا در نمونهی M-500 مربوط به فازهای بلوری M-500 وFe<sub>2</sub>B و Fe<sub>3</sub>B، و در نمونه ی M-560 مربوط به فازهای بلوری α-Fe و Fe<sub>2</sub>B می باشند. بررسی های انجام شده توسط محققان قبلي در مورد ساختار آلياژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> در دماهای مختلف تابکاری، [13]، نشان می دهند که حداقل زمان لازم برای ایجاد فازهای بلوری در دمای

تابکاری C° ٤٠٠ حدود شش ساعت است. نفوذ اتمهای آهن منجر به تشکیل فاز نیمه پایدار (Fe(Si در برخی از نواحی زمینهی بیشکل میشود، و این نواحی با ادامهی فرایند تابکاری در دمای C° ٤٥٠ به فاز بلوری α-Fe(Si) تبدیل میشوند. در نتیجهی تغییر ترکیب شیمیایی و خواص زمینهی بی شکل حین تبلور اولیه، فاز زمینهی بی شکل از اتمهای بُر غنی شده و با افزایش دمای تابکاری به C° ۵۰۰، ترکیب شیمیایی زمینے ی بے شکل برای تشکیل فازہای بلوری α- Fe(Si) و Fe,Si)2B و α- Fe(Si) منظم اتمی ممکن است در دمایی پایین تر از دمای تبلور آلیاژ آغاز شود، بهگونهای که با ادامهی عملیات حرارتی (افزایش دما یا زمان) این مناطق یا خوشههای منظم اتمی رشد یافته و دانههای بلوری در حد نانو و یا بزرگتر را شکل میدهند. نتایج پـژوهش دیگـر انجـام شده بر روی نوار بیشکل Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>، [14]، نشاندهندهی جوانهزنی فازهای بلوری در زمینهی بیشکل و تشکیل پیکهای پراش مربوط به صفحههای (110) و (211) از فاز α-Fe پس از عملیات حرارتی در دمای C° ٤١٠ بهمدت زمان يکساعت ميباشد. افزون بر این، در نمونهی تابکاری شده در دمای C° ۲۰۰ بهمدت زمان یکساعت نیز نانوبلورهای α-Fe در زمینهی بیشکل مشاهده شدهاند، ولی شروع تبلور در دمای حدود C° ۵۰۰ و پس از یکساعت گزارش شده است [6,13].

*ب- تحلیل حرارتی.* نتایج حاصل از آزمون DTA برای آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> بهازای چهار نرخ گرمایش مختلف شامل دماهای شروع بلوری شدن، دماهای پیک و گرمای مبادله شدهی تبلور (سطح زیر منحنی در قسمت پیک)، با توجه به کالیبراسیون دستگاه DTA با استفاده از نمونهی مرجع و یک برنامهی نرمافزاری، بر حسب ژول بر گرم بهدست آمدند. نمودارهای مربوطه بهترتیب در جدول (۳) و شکل (٤) آورده شدهاند. همان گونے کے مشاہدہ مے شود، نمودارہای DTA نشاندهنده تنها یک پیک تبلور می باشند، و هر سه مشخصهی دمای شروع، اندازمی پیک و گرمای مبادل. شدهی تبلور با افزایش نرخ گرمایش افزایش یافتهاند. با اینحال، به نظر میرسد که در نرخهای گرمایش بالا (K/min و ۲۰ و حتیی ۱۰ K/min) دو پیک در نمودارهای DTA وجود دارند که تقریباً بـر روی هـم افتادهاند. از طرف دیگر، مطالعات سینتیک تبلور با استفاده از آزمون DSC توسط محققين قبلي، [4,7,15]، نشاندهندهی دو مرحلهای بودن تبلور برای آلیاژ Fe78Si9B13 است. مرحله اول آن تبلور در دمای تابکاری C° ٤٥٠ است و فازهای تشکیل دهنده از نوع α-Fe هستند. با انجام تابکاری در دمای C° ۰۰۰، امكان تشكيل تركيبات Fe-B بدليل افزايش فاصله اتمهای Fe-Fe و در نتیجه، افزایش قابلیت نفوذ اتمهای B بیشتر شدہ و فاز Fe<sub>2</sub>B شکل مے گیرد. مراحل مختلف تبلور برای آلیاژ بیشکل Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> بـهشـکل زیر گزارش شده است [4]:

$$Fe_{78}Si_9B_{13} \xrightarrow{450^{\circ}C} \alpha - Fe + amorphous$$
 (1)

amorphous 
$$\xrightarrow{500^{\circ}C}$$
 Fe<sub>2</sub>B ((Y)

جدول ۳ دادههای DTA برای نرخهای حرارتدهی مختلف گرمای مبادله دمای پیک دماي شروع نرخ گرمایش (°C/min) تبلور (°C) تبلور، <sub>TP</sub>، شدەي تېلور  $(^{\circ}C)$ (J/g)72/17 070/7 07°./V ٥ ٦٤/٤ ٥٤١/٩ ٥٣٤/١ ۱. 79/11 0 E Y/V ٥٣٥ ۱٥ ν۲/۸۲ ٥٤٦ ٥٣٥ ۲.

وجود اختلاف بین نتایج بهدست آمده در این تحقیق و نتایج گزارش شده توسط سایر محققان، [4,7,15]، در

بارهی مراحل تبلور احتمالاً بهدلیل وجود تفاوت در ماهیت آزمونهای DTA و DSC و حساسیت و دقت بالای آزمون DSC در مقایسه با DTA میباشد. نتایج تحلیل حرارتی گزارش شده با استفاده از دستگاه DSC برای آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>1</sub>، [4]، نیز نشاندهندهی افزایش دمای مربوط به هر دو پیک با افزایش نرخ حرارتدهی است، و این با روند مشاهده شده در این پژوهش (جدول ۳) مطابقت دارد.



شکل ٤ نمودارهای DTA مربوط به آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> در نرخهای گرمایش ۵ (۱)، ۱۰ (۲)، ۱۵ (۳)، و ۲۰ (٤)

دمای شروع تبلور در مقاله های مختلف برای آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> با نرخ گرمایش ۲۰ K/min برابر با ۲۰ ۵۵، ۲۰ ۵۵ و ۲۰ ۵۹۰ گزارش شده است، [1,6,11,16]، و این دماها دارای حداقل و حداکثر اختلافی بهترتیب برابر با ۲۰ ۵ و ۲۰ ۲۰ با دمای شروع تبلور در این تحقیق (۲۰ ۵۳۵، بهدست آمده از آزمون (DTA) می باشند.

پ – خواص مغناطیسی. خواص مغناطیسی نمونههای مختلف در جدول (٤) آمدهاند. حلقههای پسماند (Hysteresis loop) حاصله نیز به طور مثال برای نمونههای As-spun و As-spun به ترتیب در شکلهای (۵) و (٦) نشان داده شدهاند. برای نمونههای عملیات حرارتی شـده در دماهـای C° ۵۰۰ و C° ۵۹۰ حین فرایند که موجب تردشدگی و شـکنندگی نوارهـا

بهدلیـل تشـکیل فازهـای بلـوری Fe<sub>2</sub>B ،α-Fe و Fe<sub>3</sub>B می شود، حلقهی پس ماند تشکیل نشده است.

M-400-60	M-400-30	M-400-15	M-300	unds-sV	نمونه خواص مغناطیسی	
٧/٦١٥	1•/91	٦/٠٥٢	٩/٠٢١	٧/٨٨٤	نیروی پس ماندزدا ( <b>Am</b> <sup>-1</sup> ) <b>H</b> <sub>c</sub>	
1104.	1.29.	٨٤٦٥	1019	AT.T	القای اشباع <sup>*</sup> (G) <b>B</b> s	
0975	٦٨٤٦	v111	V17A	٧٤٥٧	القای پس ماند <sup>**</sup> Br (G)	
•/0109	•/٦٥٢٦	•/٩•٥•	•/٩••١	•/9•97	نسبت مربعی <b>B</b> r/B <sub>s</sub>	
****	1808/8	1.17.	۱۹۷٦/۸	71897	نفوذپذیری اولیه (µ <sub>r(i</sub>	
٣٤٢٠٨	*****		00107	٤٦٩٧٦	نفوذپذیری بیشینه (µ <sub>r(m</sub>	
* Satura ** Rema	tion induc anence inc	tion luction				

جدول ٤ خواص مغناطیسی آلیاژ Fe78Si9B13 در شرایط مختلف



شکل ۵ حلقهی پسرماند مغناطیسی برای نمونهی As-spun.

٦

افزایش یافته است. افزایش دمای عملیات حرارتی مؤثرترین عامل در تنشزدایی و قرارگیری حوزههای مغناطیسی در جهت طولی نمونه است، و این منجر به افزایش مقدار القای اشباع می شود [16]. در شکلهای (۷ و ۸)، تغییرات القای اشباع و القای پسماند بهترتیب بر حسب دما و زمان عملیات حرارتی نشان داده شدهاند. همانطور که مشاهده میشود، مقدار القای اشباع با افزایش دما یا زمان عملیات حرارتی



شکل ۸ نمودار تغییرات القای اشباع (Bs) و القای پس ماند (Br ) بر حسب زمان عملیات حرارتی در دمای ℃ ٤٠٠.

در شکلهای (۷) و (۸) دیده می شود که القای پس ماند با افزایش زمان عملیات حرارتی در دمای ثابت و یا با افزایش دما در زمان ثابت کاهش یافته است. این به دلیل بلوری شدن جزئی آلیاژهای بی شکل حتی در دماهای پایین تر از دمای بلوری شدن است که به شرط کافی بودن زمان عملیات حرارتی رخ می دهد [5].

بررسی خواص مغناطیسی در جدول (٤) نشان میدهد که نیروی پس ماندزدای نوار مذاب ریسی شده بهدلیل حضور تنشهای پس ماند ناشی از سریع سرد شدن مذاب نسبتاً بالا و در حدود ۸/۸ ۸ است، و با انجام عملیات حرارتی در دما و زمانهای متفاوت روند مشخصی در تغییرات ۲۵ مشاهده نمی شود. افزون بر این، بر مبنای این نتایج تغییر نفوذ پذیری بر حسب زمان یا دمای عملیات حرارتی، مشابه نیروی پس ماندزدا، روند مشخصی را دنبال نمی کند.

رابطههایی برای دما و زمان عملیات حرارتی بهمنظور تعیین خواص مغناطیسی بهینه در آلیاژ بی شکل Fe<sub>78</sub>SigB<sub>13</sub> ارائه شدهاند. این رابطهها برای بهدست آوردن حداقل تلفات، بیشترین مقدار Br/Bs و کمترین مقدار Hc، بهترتیب بهصورت زیر می باشند [16]:

$$Lnt = 21.61 + \frac{1.78 \times 10^4}{T}$$
 (r)

$$Lnt = -25.5 + \frac{2.07 \times 10^{-7}}{T}$$
 (£)

Lnt = 
$$-19.6 + \frac{1.64 \times 10^4}{T}$$
 ( $\circ$ )

که در آنها، T دمای عملیات حرارتی بر حسب درجهی کلوین و t زمان عملیات حرارتی به دقیقه میباشد. زمان لازم برای بهدست آوردن خواص بهینه در دماهای مختلف با استفاده از این رابطهها محاسبه شده و نتایج آن در جدول ٥ آورده شدهاند. همان طور که ملاحظه می شود، زمان مورد نیاز در همهی حالتها با افزایش دما کاهش یافته است.

با توجه به جدول (٤) می توان گفت که در نمونهی 15-400 در مقایسه با دیگر نمونهها، ترکیب مناسب تری از خواص مغناطیسی به دست آمده است. محققین دیگر نیز گزارش کردهاند که انجام عملیات حرارتی به مدت زمان دو ساعت در دمای ۲° ٤٠٠ و یا ۲° ٤١٠ ترکیب بهینه ای از خواص نرم مغناطیس ایجاد می کند [14,16]. لیم و همکارانش کسر حجمی کوچکی از نانوبلورها را در زمینه ی بی شکل مشاهده کردهاند و بهبود خواص پس از تاب کاری در دمای که ٤٠٠ ۲۰ به مدت زمان دو ساعت را به حضور این نانوبلورها نسبت دادهاند [14].

# نتيجه گيري

با انجام عملیات حرارتی بر روی نوارهای بی شکل مذابریسی شده از آلیاژ Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> در دماها و زمانهای مختلف، نتایج زیر بهدست آمدند:

- عوامل بهینهی فرایند مذابریسی برای تولید نوارهای بیشکل به پهنای حدود ۰/۹ میلیمتر و ضخامت ۲٦ میکرومتر و با کیفیت مطلوب از آلیاژ Fe7<sub>8</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> بهدست آمدند.

- دمای شروع فرایند تبلور آلیاژ بی شکل Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> با انجام آزمون DTA با نرخ گرمایش ۲۰ K/min به میزان °C ۵۳۵ به دست آمد.

- تنها یک پیک تبلور در نمودارهای DTA با نرخهای گرمایش مختلف برای آلیاژ  $Fe_{78}Si_9B_{13}$  مشاهده شد، و این با نتایج ارائه شده بهوسیله یجاکوبژیک که دو مرحله یتبلور را برای آلیاژ مذکور گزارش کردهاند، فرق دارد. این اختلاف احتمالاً بهدلیل وجود تفاوت در دقت و حساسیت آزمونهای DSC و DTA بوده است. - نتایج XRD نشاندهنده یحفظ ساختار بی شکل در نمونههای عملیات حرارتی شده در دماهای  $2^\circ$  ۰۰۰ و یرای نمونههای عملیات حرارتی شده در دماهای  $2^\circ$  ۰۰۰ و برای نمونههای عملیات حرارتی شده در دماهای  $2^\circ$  ۰۰۰ و کا ۰۰۰ و  $2^\circ$  ۰۰۰ فازهای بلوری  $-\alpha$ - هم  $-\alpha$ - و

Fe3B مشاهده نشدند.

مى يابد. افزون بر اين، تركيب مناسبي از خواص - بررســی خــواص مغناطیســی نمونــههـای عملیـات مغناطیسی در نمونه پس از انجام عملیـات حرارتــی در دمای C° ٤٠٠ بهمدت زمان ۱۵ دقیقه بهدست آمد.

حرارتی شده در شرایط مختلف نشان داد که القای اشباع با افزایش دما یا زمان عملیات حرارتے افزایش

## مراجع

- 1. Sahingoz, R., "Observation of changing of magnetic properties and microstructure of metallic glass Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> with annealing", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 271, pp. 74–78, (2004).
- 2. Buznikov, N. A., Yoon, S., Kim, Ch. O., and Kim, Ch., "Influence of current amplitude on asymmetric off-diagonal magnetoimpedance in field-annealed amorphous ribbons", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, pp. 3646-3648, (2005).
- 3. Sanchez, T., "Torsion annealing influence on the impedance behaviour in amorphous FeSiB and CoSiB wires", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 353, pp. 914-918, (2007).
- 4. Jakubczyk, E., "Phase transition in Co78Si9B13 and Fe78Si9B13 metallic glasses induced by isochronal annealing", Marerials Science-Poland, Vol. 24, pp. 1028-1036, (2006).
- 5. Niu, Y. C., "The order evolution in amorphous Fe78Si9B13 ribbon during annealing process", Materials Letters, Vol. 59, pp. 1589-1594, (2005).
- 6. Niu, Y. C., "Origin of ductilc-brittle transition of amorphous Fe78Si9B13 ribbon during low temperature annealing", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 34, pp. 40-45, (2004).
- 7. Bednarska, L., "Influence of annealing on the physical and chemical properties of Fe-Si-B(Me) amourphous alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 367, pp. 270-273, (2004).
- 8. Fish, G. E., "Soft magnetic materials", IEEE Transactions, Vol. 78, pp. 947 972, (1990).
- 9. Fish, G. E. and Smith, C.H., "A decade of progress in iron-based amorphous ribbon for electrical power distribution", Symposium on Soft and Hard Magnetic Materials with Applications, ASM, Lake Buena, Vista, Florida, (1986).
- 10. Bailey, D. J. and Lowdermilk, L.A., "Amorphous steel core distribution transformer", Report General Electric Company.
- 11. Hasegawa, R., "Application of rapidly solidified metals in the USA and Japan", Allied Signal Inc., Metglas.
- 12. Cabral-Prieto, A., "Vickers microhardness and hyperfine magnetic field variations of heat treated amorphous Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> alloy ribbons", Hyperfine Interactions, Vol. 161, pp. 69-81, (2005).
- 13. Jacubczyk, E., "Crystallization kinetics of Fe7<sub>8</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> metallic glass", Optica Applicata, Vol. 4, pp. 359-370, (2007).

- 14. Lim, K. M., "Magnetic properties of amorphous alloy strips fabricated by Planar Flow Casting (PFC)", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 144, (2009).
- 15. Stergioudis, G. A., "Instabilities in crystallization and magnetic behavior of Fe-Si-B amorphous alloys", *Materials Research Bulletin*, Vol. 39, pp. 231-236, (2004).

۱۲.حیدری، ح.، " ساخت نمونه آزمایشگاهی ترانس با هسته آلیاژ آمورف"، پژوهشگاه مواد و انرژی، شرکت توانیر، (۱۳۷۹).

/