## اثر فرآيند پرس گرم بر ريزساختار و خواص مغناطيسي آلياژ نانو بلورين فاينمت

حميد رضا صدلاله'، ابوالقاسم نورمحمدي\*

. گروه مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران ٔ دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی نانوفناوری، اصفهان، ایران

تاريخ ثبت اوليه: ١٣٩٣/٨/١٧، تاريخ دريافت نسخهٔ اصلاحشده: ١٣٩۴/٢/٢٨، تاريخ پذيرش قطعي: ١٣٩۴/٣/۶

**چکیده** در پژوهش حاضر، هستههای نرم مغناطیسی نانوبلورین فاینمت با استفاده از فرآیند پرس گرم شکل دهی شد و امکان افزایش ضخامت هستهها با استفاده از این روش بررسی گردید. همچنین تاثیر فرآیند پرسگرم بر ریزساختار و خواص مغناطیسی پیش ماده آمورف بررسی و با روش متداول عملیات حرارتی مورد مقایسه قرار گرفت. به این منظور، ابتدا آلباژ فاینمت با استفاده از روش ریسندگیمذاب به صورت نوارهای آمورف تولید و رفتار حرارتی آلباژ آمورف فاینمت و تبلور فاز نانو بلور به کمک آنالیز گرماسنجی تفاضلی رویشی مطالعه گردید. به این ترتیب، دمای مناسب تبلور فاز آمورف حدود C «۵۰ تعیین و خواص نرم مغناطیسی نمونهها توسط دستگاه مغناطش سنج گرادیان نیروی متناوب بررسی گردید. بهمنظور تبلور فاز نانوبلورین از بستر آمورف، عملیات حرارتی (متداول) نوارها در دمای C ۵۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه تحت اتمسفر کنترلی آرگون- هیدروژن (٪،H، ۳۰ و ٪،Ar ۷۰ و فرآیند پرس گرم نیز تحت همان اتمسفر و دما، به مدت <sup>۲</sup>۰ دقیقه با اعمال فشار ۱۰۰ MPa انجام شد. فازهای تشکیل شده توسط آنالیز پراش سنجی پرتو ایکس شناسایی و ریزساختار آلیاژ بهوسیله میکروسکوپ الکترون – رویشی مورد بررسی قرار گرفت. به این طریق مشاهده می شود عملیات حرارتی باعث تشکیل بلورکهای نانومتری α-FeSi محصور در زمینه آمورف می گردد. اندازه متوسط نانوبلورکهای α-FeSi بعد از فرآیندهای عملیات حرارتی (متداول) و پرس گرم به کمک نرم افزار MAUD، به ترتیب ۱۷nmو ۱۲nm محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد فرآیند پرسگرم سبب کاهش موثر سایز بلورکها (نسبت به روش متداول عملیات حرارتی) می شود. گرچه روش مذکور باعث افت خواص نرم مغناطیسی نوارهای نازک شده؛ اما خواص حاصل در محدوده نرم مغناطیس بسیار خوب (Hc~^Oe ، 5~ ۱۳۰emu/g) می باشد. کلمات کلیدی: آلیاژ فاینمت، آلیاژ مغناطیسی نرم، ریسندگی مذاب، پرس گرم.

## Effect of Hot Pressing on the Microstructure and Magnetic Properties of the Nanocrystalline Finemet alloy

Hamid Reza Sadlaleh<sup>1</sup>, Abolghasem Nour Mohammadi<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najaf Abad, Iran <sup>2</sup>University of Isfahan, Faculty of Advanced Science and Technologies, Department of Nanotechnology, Isfahan, Iran

In the current study, nanocrystalline Finemet soft magnetic cores were processed and their thickness was Abstract improved by the hot pressing technique. Besides, the effect of hot pressing on the microstructure and soft magnetic properties of the amorphous precursor was compared with the conventional annealing method. First, amorphous Finemet ribbons were produced through the melt-spinning method. Thermal behavior of the amorphous Finemet ribbons and crystallization of the anocrystalline phase was studied by Differential Scanning Calorimetry. Thus, the proper crystallization temperature of the amorphous phase was specified about 550 °C. To crystallize the nanocrystallime phase from the amorphous matrix, the produced ribbons were either annealed conventionally at 550 °C for 30 min or hot pressed at the same temperature for 60 min, under a controlled H<sub>2</sub>/Ar atmosphere, a 30% H<sub>2</sub>, 70% Ar mixture. The formed phases were specified by X-ray diffraction, and microstructure of the formed alloy was evaluated by scanning electron microscopy. It was shown that, both methods result in the formation of  $\alpha$ -FeSi nanocrystals embedded in an amorphous matrix. The average size of the formed  $\alpha$ -FeSi nanocrystals was calculated by using the MAUD software, came out to be 17 and 12 nm, for annealed and hot pressed samples, respectively. Hence, hot pressing results in crystal size reduction, compared with the conventional annealing method. Moreover, this processing method can decrease the soft magnetic properties of the amorphous precursor. However, the produced cores exhibit good soft magnetic properties (Hc~ 8 Oe,  $\sigma$ ~ 130 emu/g).

Keywords: Finemet alloy, Soft magnetic alloy, Melt spin, Hot press.

۱ – مقدمه

از زمانی که آلیاژ فاینمت با ساختار نانوبلورین در زمینه آمورف توسط يوشيزاوا ابداع شد، مواد نانوکريستالي پايه آهن با خواص مغناطیسی نرم مورد توجه بسیار قرار گرفت [۱و۲].

آلیاژ FeSiB با مقادیر کمی از عناصر Cu و Nb با نام تجارى فاينمت أشناخته ميشود. ألياژ فاينمت با فرمول شيميايي Fe<sub>73.5</sub> Si<sub>13.5</sub> B<sub>9</sub> Nb<sub>3</sub> Cu<sub>1</sub> از جمله مواد مغناطيسي نرم با پایه آهن است. خواص مغناطیسی نرم این آلیاژها تركيبي از تلفات كم، نفوذيذيري بالا (µ≈۱۰°)، ميدان وادارنه کوچک (H<sub>C</sub>= ۱ A/m) و القا مغناطیسی (۱/۳ B<sub>s</sub>=T) مى باشد[٣].

مطالعات یوشیزاوا و همکارانش نشان داد هنگامی که فرآيند تبلور در اين آلياژها رخ مي دهد، اندازه متوسط دانهها به ابعاد نانومتری کاهش یافته و خواص مغناطیسی نـرم خـوبی حاصل میشود. کوچک شدن اندازه متوسط دانهها در مواد نانو کریستالی در محدوده نانومتری باعث کاهش اثر دیواره حوزههای مغناطیسی و چرخش آسان حوزههای مغناطیسی می گردد که نتیجه آن کاهش میدان وادارنـده و بهبـود خـواص مغناطیسی در آلیاژ است [۴].

در ابتدا آلیاژ فاینمت با روش انجماد سریع به شکل نوارهای نازک و صفحه تولید می گردید که نمی توانست یاسخگوی تقاضای کاربردهای صنعتی با اشکال پیچیده باشد، ولی بهبود ترکیب و وجود فرآیندهای ساده و کم هزینه امکان سنتز آلیاژهای پایه آهن بالک را با اشکال پیچیده و خواص مغناطیسی نرم بهتر فراهم میکند [۱].

فرآیند پرسگرم تاثیر فراوانی روی ریز ساختار و خواص مغناطیسی نرم نوارهای آمورف دارد. در فرآیند پرس گرم فشار و دما بهطورهمزمان اعمال می گردد که: افزایش فشار سبب کاهش تخلخل و شکاف هـوایی بـین ذرات پـودر و یـا نوارهای مغناطیسی میشود. همچنین اعمال فشار منجر به كاهش اندازه متوسط بلوركهاي a-FeSi مي شود [ او ٢].

گزارش ها نشان می دهد که ریز ساختار و به ویژه اندازه متوسط بلورکهای این آلیاژ از سیستم مرسوم Fe-Si-B با

الحاق مس و نيوبيوم نشأت گرفته كه مس بهعنوان عامل جوانه زا عمل می کند و نیوبیوم از رشد فاز FeSi جلوگیری می کند [۵ و ۴].

کاهش شدید پارامترهای اتلاف مغناطیسی از جمله ضریب مغناطوتنگش (در حد صفر) و میدان وادارنده بسیار کوچک و جریان گردایی ناچیز (ناشبی از مقاومت الکتریکی بالا) سبب شد در سالهای اخیر تلاش فراوانی برای بهبود خواص مغناطیسی آلیاژ صورت بگیرد. همچنین اتـلاف بسـیار کم انرژی سبب میشود سنسورهای مغناطیسی تولید شده از ایـن آلیاژهـا بـه حساسـیت بـالایی دسـت یابنـد. سنسـورهای مغناطیسی از ابزارهای مهم کشف در ماهوارهها و فضاپیماها برای ردیابی تغییرات محیطی میدان مغناطیسی زمین و سیارات بوده و در سیستمهای پرنده نظیر هواپیماهای بدون سرنشین می تواند مورد استفاده قرار بگیرند [۷و۸]. موارد ذکر شده اهمیت ترکیب آلیاژ فاینمت را برای کشور ما نشان میدهد.

به منظور بهینه کردن رفتار آلیاژ فاینمت، میبایست تأثیر تکنیکهای گوناگون فرآوری مورد مطالعه قرار گیرد تا بتوان خواص مغناطیسی این آلیاژها را برای کاربردهای خاص، سازمان دهی کرد. در این راستا دو معضل مهم فناورانه وجود دارد. معضل اول آمورف سازی آلیاژ بوده که استفاده از روشهای انجماد سریع نظیر ریسندگی مذاب را لازم دارد. یک مسئله بسیار مهم دیگر ساخت هستههای مغناطیسی شامل شکلدهی و افزایش ضخامت آن میباشد، که این مهم با استفاده از فرآیند ریسندگی مذاب بسیار دشوار است. با توجه به این مسئله مهم هدف پژوهش حاضر بررسی اثر فرآیند پرس گرم به منظور شکلدهی و تولید هستههای مغناطیسی بالک و چگال با ساختار نانوکریستالی جهت استفاده در حسگرهای مغناطیسی بوده و در نظر دارد اثر پرسگرم و عملیات حرارتی آنیل بر ریزساختار و خواص مغناطیسی نوارهای نازک را باهم مقایسه و مورد مطالعه قرار دهد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. Yoshizawa <sup>2</sup>. Finemet



**شکل ۱**. شمایی از دستگاه ذوب ریسی برای تولید نوارهای فلزی آمورف.

جهت بررسی مورفولوژی، از میکروسکوپ الکترون – روبشی (SEM) مدل LEO-VP435 با ولتاژ NKV استفاده شد. خواص مغناطیسی نمونهها با دستگاه مغناطشسنج گرادیان نیروی متناوب (AGFM) مدل PAR,EG&Gu500 در دمای محیط و با حداکثر میدان اعمالی حدود ۶۰۰۰ اورستد مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تشخیص دمای مناسب عملیات مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تشخیص دمای مناسب عملیات DSC<sup>4</sup> مانخت کشور ژاپن مدل Shimadu- DSC60 مورده استفاده قرار گرفت. حرارتدهی نمونه در داخل دستگاه تحت اتمسفر کنترلی آرگون در محدوده C<sup>5</sup> ۸۰۰۰ – ۱۵ و با سرعت اتمسفر کنترلی آرگون در محدوده C<sup>5</sup> ۸۰۰۰ – ۱۵ و با سرعت

به منظور تشکیل دانه های نانو کریستالی احاطه شده در زمینه آمورف در آلیاژ فاینمت، از یک دستگاه پرس ایزواستاتیک گرم ۱۰۰ تنی استفاده گردید. عملیات حرارتی نمونه درون محفظه هایی از جنس فولاد گرم کار<sup>9</sup> (کلاس H12، استاندارد AISI) و با اعمال فشار AP ۰۰۰ در دمای C م04 تحت اتمسفر H۲ ٪۳۰ و Ar ٪۰۷ انجام شد. شکل (۲) سیکل عملیات آنیل با استفاده از فرآیند پرس گرم را نشان می دهد. در سیکل اول اعمال فشار و افزایش دما هم زمان شروع شده تا نمونه به دمای C<sup>°</sup> ۵۸ برسد سپس در دمای ثابت فشار مونه به دمای C<sup>°</sup> در مای و بعد تابت فشار مونه به دمای C<sup>°</sup> و نمونه اعمال و بعد زایایان سیکل دوم اعمال فشار متوقف و نمونه در داخل کوره پرس گرم سرد می گردد.

<sup>6</sup>. Hot Work Tool Steels

۲– روش تحقیق

برای تولید آلیاژ فاینمت از پنج عنصر با مشخصات جدول (۱) استفاده شد.

جدول ١. مشخصات عناصر نمونه.

عنصر	درصد	درصد مولی	اندازه متوسط	شر کت
	خلوص		ذرات (µm)	سازنده
Fe	>૧૧/۶	ν۳/۵	40	مر ک'
Si	>٩٩/٩۵	۱۳/۵	٢	آلدريج <sup>*</sup>
Nb	>٩٩/٨	٣	44	مرک
Cu	>99/9	1	40	مرک
В	>૧૧/૧	٩	٢	مرک
В	>૧૧/૧	٩	٢	مرک

به منظور سنتز نوارهای مغناطیسی آمورف از دستگاه ریسندگی مذاب<sup>۳</sup> با طراحی چند منظرره (ذوب و آلیاژسازی به روش القایی و تولید نوارهای نازک انجماد سریعیافته) استفاده شد. در این روش آلیاژسازی به روش القایی و تحت اتمسفر کنترلی آرگون انجام گردید. مذاب بر روی سطح خارجی یک دیسک مسی در حال چرخش (با سرعت s/m (با سرعت s/m) ریخته شده و نوارهای آمورف با ابعاد مشخص سرد میشود. از آنجا که این چرخ با سرعت زیادی در حال چرخش است در نتیجه فلز مذاب با سرعتی حدود (۲۵ منگاه ای امورف منجمد میشود [۹ و ۱۰]. شکل (۱) شمایی از دستگاه ذوبریسی را نشان میدهد.

ساختار فازی آلیاژ به وسیله آنالیز پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) با دستگاه بروکر<sup>۴</sup> آلمان مدل ADVANCED8 (یکس مشخص گردید. همچنین کلیه پیکهای حاصل از آنالیز پراش سنجی پرتو ایکس در این تحقیق با فاز α-Fe(Si) براساس شماره کارت ۱۳۹۷–۳۸ و طبق استاندارد JCPDS مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>&</sup>lt;sup>5.</sup> Differential scanning calorimetry

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. Merck

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>. Aldrich

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>. Melt spinning

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>. Bruker

علت انتخاب زمان ۳۰ دقیقه در ابتدا و ۱۲۰ دقیقه در انتهای عملیات حرارتی، براساس مطالعات قبلی و انجام شده برای تعیین زمان عملیات حرارتی بهینه میباشد [۱و۸].



عمليات حرارتي آنيل مرسوم نمونهها، مانند فرآيند یرس گرم تحت مخلوطی از گازهای محافظ <sub>H</sub> و Ar با درصد اختلاط و زمان و دمای مشابه بهوسیله یک کوره لولهای مدل Exciton ساخت كشور ايران انجام شد.

در پژوهش حاضر برای اندازهگیری دانههای فرعی (اندازه متوسط بلورک) و مقدار کرنش اعمالی، الگوهای پراش حاصل از آزمون XRD، توسط نرمافزار 'MAUD بر نمودار محاسبه شده توسط نرمافزار منطبق گردید به گونهای که همواره فاکتور <sup>۲</sup> GOF کمتر از دو بهدست آمد. این فاکتور میزان انطباق الگوی پراش آزمایشگاهی را با نمودار محاسباتی نشان مىدهد.

## ۳– نتايج و بحث

شکل (۳) الگوی تفرق اشعه ایکس نوارهای نازک حاصل از مذاب آلیاژ فاینمت را بعد از فرآیند ریسندگی مذاب نشان میدهد. در الگوی پراش مربوطه یک پیک در زاویه °۲۵=۴۵ نیز مشاهده می شود. ظهور این پیک پهن در الگوی یراش یرتو ایکس (که مربوط به فاز (Fe(Si است) تشکیل ساختار آمورف در آلیاژ را نشان میدهد که این حالت به دلیل نرخ سرد شدن سریع نوارهای نازک بهوجود مىآيد. انجماد سريع با نرخ تبريد زياد نتيجه ذاتى



**شکل۳.** الگوی پراش سنجی پرتو ایکس نوارهای آمورف ریختهریسی شده.

شکل (۴) نتایج حاصل از آنالیز EDX نوارهای نازک و عناصر مورد استفاده در آلیاژ فاینمت را نشان میدهد. به منظور کترل نتایج حاصل، آزمون EDX از سه نقطه متفاوت در سطح نوارها انجام شد و میانگین درصد عناصر این سه نقطه در پایین تصوير مشاهد مي شود.

براساس شکل (۴) با توجه به خلوص بالای مواد مورد استفاده و انجام عملیات تحت کنترل با گاز محافظ، تشخیص عنصر بور با خطای بالایی همراه بوده و علت آن کوچک بودن اندازه اتمی عنصر بور میباشد که با خطای بالای ۵۰٪ در آنالیز مشخص شده است. به دلیل داشتن خطا نمی توان مقدار دقیق عناصر را از این روش اعلام نمود. اما وجود عناصر اصلی آلیاژ فاینمت در نوارهای نازک قابل استناد است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. Materials Analysis Using Diffraction

<sup>&</sup>lt;sup>2.</sup> Good of Fit



شکل (۶) الگوی پراش پرتو ایکس نوارهای مغناطیسی را بعد از فرآیند پرس گرم نشان میدهد. همان طور که میدانید عملیات حرارتی باعث افزایش ارتفاع پیکها و کاهش پهنای پیک اصلی شده که دلیل آن کریستاله شدن فاز آمورف و بزرگتر شدن بلورکها میباشد. در فرآیند پرس گرم اعمال فشار سبب کوچکتر شدن اندازه متوسط بلورکها در مقایسه با عملیات حرارتی آنیل مرسوم میشود که در الگوی پراش این مورد با پهنتر شدن و كاهش شدت پيكها مشخص شده است [ او ۲].



شکل ۶. الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه آنیل شده بهوسیله پرس گرم.



WD: 16.42 mm Det: SE Detector Vac: HIVac RAZI

شکل ۴. تصویر SEM سطح و میانگین نتایج حاصل از آنالیز EDX نوارهای آمورف

DSC یک تکنیک تحلیل دمایی است که در آن تفاوت در میزان حرارت مورد نیاز برای افزایش دمای نمونه و مرجع، به عنوان یک تابع دما، اندازه گیری میشود. برای تشخیص دمای مناسب عملیات حرارتی نمونهها از تکنیک DSC استفاده گردید. نمونه آمورف این آلیاژ دو پیک حرارتی را نشان میدهد که از مقایسه آنها با مراجع معتبر [۴] مشخص شد پیک اول مربوط به تشکیل بلورهای فاز (α-Fe(Si و پیک بعدی مربوط به تبلور فازهای بوراید است. آنیل در دماهای بالاتر از ℃ ۵۵۰ باعث رسوب ترکیبات بور Fe<sub>2</sub>B و Fe<sub>3</sub>B با اندازه متوسط بلورک حدود ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر شده و در ادامه باعث رشد دانه می گردد که نتیجه آن کاهش شدید خواص مغناطیسی نرم میباشد [۴]. این نتایج در شکل (۵) کاملاً مشخص است و بهخوبی با نتایج قبلی مربوط به رفتار حرارتی آلياژ أمورف فاينمت همخواني دارد.

الگوی پراش پرتو ایکس حاصل از عملیات حرارتی آنیل مرسوم در شکل (۷) آمده است. مساحت زیر هر قله مستقیماً به درصد فاز استحاله یافته بستگی دارد. از مقایسه دو الگوی پراش مربوط به فرآیند پرس گرم و عملیات حرارتی آنیل مرسوم می اتون نتیجه گرفت که اندازه متوسط بلورکها بعد از اعمال فشار در فرآیند پرس گرم کوچکتر از عملیات حرارتی آنیل مرسوم می باشد.



محاسبه اندازه متوسط دانه با استفاده از نرم افزار MAUD اندازه گیری سایز دانه و کرنش شبکه نمونه های سنتز شده به دلایل گوناگون مورد توجه قرار دارد؛ زیرا ترکیب فازی، رفتار استحاله ای و ... نمونه ها به شدت به اندازه متوسط دانه و کرنش ذرات وابسته است. در نمونه های تهیه شده به صورت لایه نازک و ... به دلیل وجود تنش و در نتیجه کرنش میشود. وجود تنش موجب تغییر فاصله صفحات بلورین، تغییر محسوسی در پهنای خطوط پراش اشعه ایکس ایجاد میشود. وجود تنش موجب تغییر فاصله صفحات بلورین، جابه جایی محل پیکها و پهنتر دیده شدن پیکها بیش از حد معمول خواهد شد. برای آنالیز الگوی پراش پرتو ایکس میتوان از روش های ویلیام سون – هال<sup>۱</sup> و شرر<sup>۲</sup> استفاده کرد ولی به دلیل وجود محدودیت هایی همچون نادیده گرفتن اثر ناهمسانگردی کرنش دقت لازم جهت اندازه گیری را ندارند. به همین منظور در پژوهش حاضر از روش ریت –ویلد<sup>۳</sup> که به

بنابراین اندازه متوسط بلورکهای ارائه شده میتواند مطابقت خوبی با اندازه واقعی بلورکها در آلیاژ فاینمت داشته باشد. اندازه متوسط دانههای فرعی و کرنش شبکه برای نوارهای نازک ریخته ریسی شده با استفاده از نرم افزار MAUD در جدول (۲) بدست آمده است.

**جدول ۲**. بررسی اندازه متوسط بلورک آلیاژ فاینمت بعد از عملیات حرارتی.

کرنش شبکه ( <sup>۳</sup> -۱۰×)	اندازہ بلورک (nm)	روش آنیل
٣/٣	١٧	آنيل مرسوم
١۶/٨	17	پرس گرم

با توجه به جدول (۲) در هر دو نمونه متوسط اندازه بلورکها در مقیاس نانو میباشد و نمونه تحت پرسگرم نسبت به نمونه آنیل مرسوم دارای کرنش شبکه بیشتر است. بهترین خواص مغناطیسی نرم مربوط به آلیاژ فاینمت در متوسط اندازه دانه حدود ۱۰ تا ۲۰ نانومتر به دست میآید که متوسط اندازه دانه حدود ۱۰ تا ۲۰ نانومتر به دست میآید که علت اصلی آن سد کمتر در مرز دانه ها در ابعاد نانو و چرخش آسان حوزههای مغناطیسی میباشد. با توجه به این که میدان وادارنده به طور معکوس با متوسط اندازه دانه در آلیاژها با خواص مغناطیسی نرم ارتباط دارد، میتوان نتیجه گرفت که مغناطیسی نرم می گردد [۴]. باتوجه به اهمیت این موضوع در تولید و سنتز آلیاژها با خواص مغناطیسی نرم لازم است که متوسط اندازه بلورکها در هر روش تولید بررسی شده و تاثیر آن در خواص مغناطیسی نمونه ها مشخص گردد.

شکل (۸) ساختار نمونه در اثر پرس گرم را نشان میدهد که احتمالاً، فازهای مشاهده شده به رنگ روشن در زمینه تصویر شامل نانودانههای α-FeSi است که درون فاز آمورف بیندانهای FeSiB احاطه شده است.

پس از آسیابکاری و فشردگی نوارهای نازک بهوسیله فرآیند پرس گرم، مواد تحت تنش قرار گرفته و به شدت تغییر شکل پلاستیکی میدهند. عیوب شبکه، نابهجاییها و نقص در چیده شدن اتمها باعث تغییر میدانهای داخلی تنش در مواد میشود که نتیجه آن تغییر تعادل انرژی در کل ساختار دانه

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. Williamson- Hall

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>. Scherrer

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>. Riet- veld

است [۱۴]. گرچه حضور این عیوب در ساختار باعث کاهش شدید خواص مغناطیسی نرم، از جمله کاهش مغناطش اشباع و افزایش میدانوادارنده شده است؛ اما خواص حاصل در محدوده نرم مغناطیس بسیار خوب (Hc-^Oe ·σ- ۱۳۰emu/g) میباشد. همچنین بررسیهای ظاهری از نمونه پرس گرم شده نشان داد تولید هستههای مغناطیسی کاملا بالک و چگال با ترکیب آلیاژ فاینمت و با اعمال فشار ۱۰۰ MPa وجود ندارد.



**شکل** ۸ محصور شدن نانوکریستالهای α-FeSi در زمینه آمورف FeNbB.

شکل (۹) منحنی مغناطش نوارهای مغناطیسی را در حالت خام و بعد از فرآیند پرس گرم و آنیل مرسوم نشان میدهد. خواص مغناطیسی نرم نمونهها نیز باهم مقایسه گردید و نتایج آن حاصل در جدول (۳) مشاهده می شود.



شکل ۹. منحنی مغناطش نمونه ها در شرایط متفاوت.

**جدول ۳.** خواص مغناطیسی نرم نوارهای مغناطیسی در شرایط متفاوت.

مغناطش اشباع (emu/g)	میدان وادارنده (Oe)	شرايط نمونه
101	١	نوار آمورف
711	• /V	آنيل مرسوم
१८४	٨	پرس گرم

همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود خواص مغناطیسی نوارهای آمورف بعد از فرآیند پرس گرم به شدت کاهش یافته است. با توجه به شکل (۹) و نتایج حاصل از نرم افزار MAUD دلایل کاهش خواص مغناطیسی نمونه بعد از فرآیند پرس گرم ناشی از افزایش تنش داخلی و تشکیل ترکهای ریز در ساختار به دلیل اعمال فشار در زمان عملیات حرارتی می باشد، در صورتی که عملیات حرارتی آنیل مرسوم باعث بهبود خواص مغناطیسی نرم (کاهش میدان وادارنده و افزایش مغناطش اشباع) در مقایسه با آنیل توسط فرآیند پرس گرم می شود.

۴- نتیجه گیری

۱- استفاده از فرآیند پرس گرم برای تولید هستههای مغناطیسی کاملا بالک و چگال با ترکیب آلیاژ فاینمت و با اعمال فشار MPa بالک و چگال با ترکیب آلیاژ فاینمت و با اعمال فشار MPa در مای C° ۵۰۰ وجود ندارد.
۲- طبق نتایج حاصل از روش ریت- ویلد و نرم افزار MAUD، در آلیاژ فاینمت متوسط اندازه بلورکهای حاصل از فرآیند پرس گرم (۱۲۸۳) نسبت به آنیل مرسوم (۱۷۸۳) کوچکتر است.
۳- فرآیند پرس گرم (۱۲۸۳) نسبت به آنیل مرسوم (۱۷۸۳) کوچکتر است.
۳- فرآیند پرس گرم در مقایسه با عملیات حرارتی آنیل مرسوم منباع نمونههای تهیه شده از آلیاژ فاینمت میشود.
۴- بررسی تصویر بهدست آمده از نوارهای آمورف بعد از فرآیند پرس گرم با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی فرآیند پرس گرم با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) احتمال تشکیل نانوکریستالهای ABC) محصور در زمینه آمورف BCD

- 7. Willard A., Daniil, *Journal of Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, 2009, 48, 373-400.
- ۸. محمدی فشارکی ح.، نورمحمدی، یوسفی، اولین همایش مواد پیشرفته در صنایع هوایی و انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج، اردیبهشت ۱۳۹۱.
- 9. H. Liebermann, Rapidly solidified alloys (processes, structures, properties, applications), New York, 1993.
- جزایری قرهباغ ع.، فناوری انجماد سریع و کاربرد آن در تولید مواد آمورف و نانوبلوری، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف،۱۳۹۰.
- ۱۱. نوحی ز.، طرقینژاد، گلعزار، سمپوزیوم نانو۹۳، دانشگاه آزاد واحد نجف آباد، ۱۳۹۳.
- 12. R.A. Young, The Rietveld Method, New York, 1993.
- Viswanathan V., Laha and Balani and Agarwal and Seal, Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 54, 121-285.

 Jiancheng T., Dangping and Zhongzhi and Baiyun Huang and Wensheng, *Journal of Alloys Compounds*, 2010, 493, 134–136.

- 2. Mchenry M. E., Willard and David and Laughlin, Amorphous and nanocrystalline materials for applications as softmagnets, Pennsylvania, 1999.
- 3. Yoshizawa Y., Yamauchi, *Journal of Materials Science* and Engineering, 1991, 133, 176-179.
- G. Herzer, Nanocrystalline soft magnetic alloys, Germany, 1997.
- Gavrilovic A., Minica and Rafailovic and Angerer and Wosik and Maricic and Minic, *Journal of Alloys Compounds*, 2010, 504, 462-467.
- Akhter J.I., Iqbal and Siddique and Ahmad 1 and Haq and Shaikh and Hu, *Journal of Materials Science and Technol*, 2009, 25, 48-52.