



ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نوارهای $\text{Co}_{68.5-x}\text{Fe}_4\text{W}_x\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ ($x=0.8, 2$) در حالت‌های بی شکل و بلورینه

احمد امیرآبادی زاده*، معظمه حسن زاده، رضا سرحدی، محمدرضا رسولی

آزمایشگاه تحقیقاتی مغناطیس و ابررسانایی، گروه فیزیک دانشگاه بیرجند، بیرجند

(دریافت مقاله: ۹۷/۴/۵، نسخه نهایی: ۹۷/۸/۲۸)

چکیده: در این پژوهش برای نخستین بار نوارهای مغناطیسی بر پایه کبالت شامل تنگستن با ترکیب‌های $\text{Co}_{67.7}\text{Fe}_4\text{W}_{0.8}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ و $\text{Co}_{66.5}\text{Fe}_4\text{W}_2\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ به روش نخریسی در آب ساخته شدند. الگوهای پراش پرتو ایکس این نوارها نشان می‌دهد که آنها بی‌شکل هستند. دمای بلورینگی، آنتالپی و ظرفیت گرمایی ویژه نوارها با استفاده از داده‌های گرماسنجی محاسبه و مقایسه شد. ویژگی مغناطیسی نوارها، دمای کوری، مغناطوتنگش و همچنین میزان سختی نوارها به روش ریزسختی سنجی تعیین شد که نتایج نشان می‌دهد که این نوارها فرومغناطیس نرم هستند. نوارها با بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی از حالت بی‌شکل بودن خارج و بلورینه شدند. در اثر بلورینگی، ناهمسانگردی مغناطوبلوری در نوارها ظاهر شده و موجب تغییر ویژگی‌های مغناطیس آنها از فرومغناطیس نرم به فرو مغناطیس سخت شده است. این نتایج با توجه به گشتاور مغناطیسی و شعاع اتمی کبالت و تنگستن توجیه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نوارهای مغناطیسی بی‌شکل؛ ویژگی‌های ساختاری؛ ویژگی‌های مغناطیسی؛ دمای بلورینگی.

مقدمه

آلیاژهای فلزی بی‌شکل (شیشه‌های فلزی) با روش‌های گوناگون و با ترکیبات مختلف ساخته می‌شوند. بیشتر آنها ترکیبی از عناصر واسط و خاکی نادر با ساختار بی‌شکل و فرومغناطیس نرم هستند. این نوارها دارای کاربردهای بسیاری در برقراری ارتباط از راه دور با حسگرهای مغناطیسی هستند [۱، ۲]. همچنین این نوارها دارای ویژگی ناهمسانگردی مغناطیسی، به عنوان یکی از مهمترین پارامترها در کنترل مغناطیدگی و نفوذپذیری مغناطیسی و ویژگی‌های مغناطیسی دینامیکی هستند و منجر به بهینه کردن ویژگی‌های مغناطیسی می‌شوند [۳]. به تازگی ویژگی‌های ساختاری، مغناطیسی، ترمودینامیکی و مکانیکی نوارهای فرومغناطیس نرم با پایه کبالت، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی منحصر به فرد و کاربرد آنها در فناوری بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴]. یکی از موارد بسیار مورد توجه، ترکیب عناصر متفاوت و تاثیر تغییر مقدار آنها بر

ویژگی‌های مغناطیسی نوارها بوده است [۵]. همچنین افزودن مواد مختلف و ساخت نوارها به روش‌های متفاوت و تاثیر آن بر ویژگی‌های ترمودینامیکی، مغناطیسی و مکانیکی نوارها موضوع پژوهش‌های بسیار بوده است [۶، ۷]. تنگستن یکی از مقاوم‌ترین عناصر موجود در جدول تناوبی است. این فلز با داشتن نقطه ذوب بالا در صنعت فلزنگاری کاربرد ویژه‌ای دارد و انتظار می‌رود که ویژگی‌های مغناطیسی و ترمودینامیکی نوارهای بر پایه کبالت با افزودن تنگستن به آنها تغییر یابد. روش‌های متفاوتی برای ساخت نوارهای مغناطیسی وجود دارد. متداول‌ترین روش، مذاب ریزی با دیسک مبرد (Chill Block Melt) (Spinning(CBMS) برای تولید نوارهای پیوسته و طویل است که در مرجع [۳] به تفصیل توضیح داده شده است. یکی از ویژگی‌های نوارهای مغناطیسی برپایه کبالت دمای بلورینگی آنهاست. اگر نوارهای مغناطیسی برای مدت کوتاهی در این دما

آلیاژسازی و ذوب ریسی، هوای داخل محفظه تخلیه شده و با گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ پر شده بود. شرایط تهیه هر دو آلیاژ یکسان و به طوری انتخاب شد که نوارهایی با عرض کمتر از ۱ میلیمتر و ضخامت حدود ۳۰-۲۰ میکرومتر به دست آیند. سرعت بالای انجماد تشکیل ساختار بی شکل نمونه ها را تضمین می کرد. برای مقایسه بهتر، ویژگی های ظاهری دو نوار $\text{Co}_{67.7}\text{Fe}_4\text{W}_{0.8}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ و $\text{Co}_{66.5}\text{Fe}_4\text{W}_2\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ و نوار مغناطیسی بر پایه کبالت با ترکیب $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ با کد اسمی SA در جدول ۱، لیست شده اند.

ویژگی های ساختاری

برای تعیین ساختار نوارهای W_1 و W_2 از پراش پرتو ایکس (XRD) با پراش سنج (DISCOVER D₈(Bruker) با تابش $Cu-K\alpha$ با طول موج ۱/۵۴۱۸ آنکستروم استفاده شد. الگوهای پراش با قله ی پراش پهن در شکل ۱ نشان می دهد که هر دو نوار W_1 و W_2 فاقد نظم بلند برد و بی شکل هستند. مواد فرومغناطیس به صورت بی شکل به دلیل نداشتن ناهمسانگردی بلوری دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالاتر و مغناطیس اشباع بیشتری هستند. همچنین بی شکل بودن نوارها منجر به پاسخ امپدانس مغناطیسی و کاربرد بسیار این نوارها در ساخت حسگرهای مغناطیسی می شود.

قرار بگیرند از حالت بی شکل به حالت بلورین تبدیل می شوند. در این پژوهش، ضمن معرفی نوارهای بی شکل برپایه کبالت دارای تنگستن که برای نخستین بار ساخته شده اند، ویژگی های ساختاری، مغناطیسی و ترمودینامیکی و همچنین سختی مکانیکی آنها بررسی شده است. همچنین با تعیین دمای بلورینگی و بازپخت نمونه در این دما ویژگی های مغناطیسی نوارها در حالت بی شکل و بلوری مقایسه شده است.

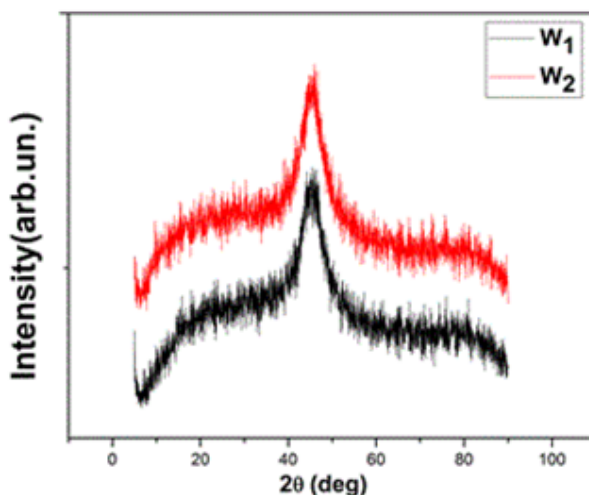
بحث و بررسی

روش ساخت

دو نوار مغناطیسی برپایه کبالت، یکی با ترکیب شیمیایی $\text{Co}_{67.7}\text{Fe}_4\text{W}_{0.8}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ با کد اسمی W_1 و دیگری با ترکیب $\text{Co}_{66.5}\text{Fe}_4\text{W}_2\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ با کد اسمی W_2 با استفاده از انجماد سریع به روش مذاب ریسی با دیسک مبرد ساخته شد. آلیاژسازی و مذاب ریسی در دستگاه دو منظوره ای که در جهاد دانشگاهی شریف طراحی و ساخته شده است انجام شد. مواد اولیه شامل آهن (Fe)، کبالت (Co)، سیلیسیم (Si)، بور (B)، تنگستن (W) با خلوص بیشتر از ۹۹/۵٪ بودند. عملیات آلیاژسازی در دستگاهی دو منظوره، که قابلیت ذوب القایی و همچنین عملیات ذوب ریسی در حضور گاز محافظ را دارد در بوتله هایی از جنس نیتريد بور انجام شد. پیش از عملیات

جدول ۱ ویژگی های ظاهری نوارهای W_1 و W_2

| نمونه | $\text{Co}_{68.5}\text{Fe}_4\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ | $\text{Co}_{66.5}\text{Fe}_4\text{W}_2\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ | $\text{Co}_{67.7}\text{Fe}_4\text{W}_{0.8}\text{Si}_{16.5}\text{B}_{11}$ |
|-------------------------|--|--|--|
| نام نمونه | SA | W_2 | W_1 |
| ضخامت (μm) | 24 ± 0.1 | 24 ± 0.1 | 26 ± 0.1 |
| پهنا (mm) | 0.71 ± 0.1 | 0.72 ± 0.1 | 0.72 ± 0.1 |



شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نوارهای W_1 و W_2 ، پیش از بازپخت در دمای بلورینگی

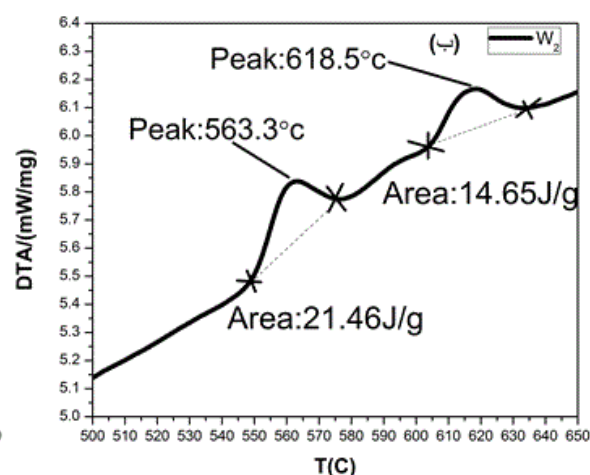
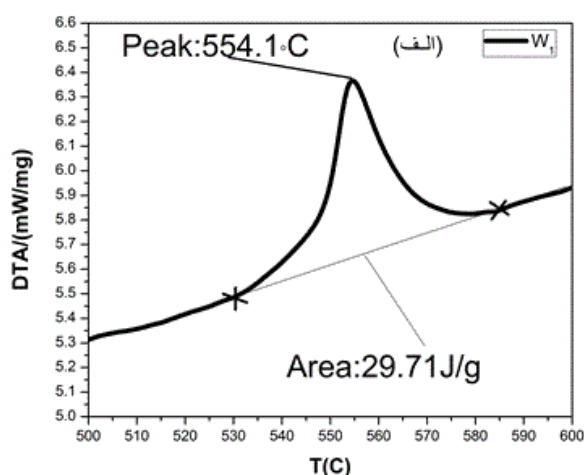
ویژگی‌های ترمودینامیکی

به منظور اندازه گیری آنتالپی، گرمای ویژه، و دمای بلورینگی نوارهای مغناطیسی بر پایه کبالت W_1 و W_2 از گرماسنجی افتراقی (DTA) و گرماسنجی روبشی افتراقی Differential Scanning Calorimetry (DSC) با دستگاه مدل NETZSCH SAT PC/PG استفاده شده که نتایج در جدول ۲ گزارش شده است. این نتایج با ویژگی‌های ترمودینامیکی نوارهای مغناطیسی SA [۹،۸] مقایسه شده‌اند. قله منحنی گرماسنجی دمای بلورینگی را تعیین می‌کند [۱۰]. شکل‌های ۲ الف و ب منحنی‌های گرماسنجی نوارهای W_1 و W_2 را نشان می‌دهد. در شکل ۲ الف به روشنی دیده می‌شود که این منحنی برای نوار W_1 یک قله در دمای 554.1°C درجه سانتیگراد دارد که این دما، دمای بلورینگی آن است. هم چنین در شکل ۲ ب برای نوار W_2 شاهد دو قله، یکی در دمای 563.3°C و دیگری در دمای 618.5°C درجه سانتیگراد هستیم که دمای بلورینگی آن هستند. دمای بلورینگی یکی از کمیت‌های بسیار مهم ترمودینامیکی است، زیرا ویژگی‌های مغناطیسی و فیزیکی پیرامون آن بسیار متغیر هستند. از آنجا که در نمونه W_1 مقدار تنگستن کمتر از نمونه W_2 است و تنگستن فلزی سخت، سنگین و دارای بالاترین درجه ذوب در بین عنصرهاست و استحکام خود را در دماهای بالا حفظ می‌کند،

بنابراین افزایش مقدار آن در نمونه دوم نسبت به نمونه اول منجر به بالاتر بودن دمای بلورینگی آن شده است. این نتیجه با دمای بلورینگی نوار SA نیز همخوانی دارد [۸]، به طوری که دمای بلورینگی آن از نوار W_2 و همچنین نوار W_1 کمتر است. برای محاسبه ی آنتالپی، سطح زیر قله منحنی گرماسنجی اندازه‌گیری می‌شود [۱۱]. با توجه به شکل ۲ الف، مقدار به دست آمده برای نوار W_1 برابر با $\Delta H = 29.71 \text{ J/g}$ است. با توجه به شکل ۲ ب برای نوار W_2 دو مقدار $\Delta H = 21.46 \text{ J/g}$ و $\Delta H = 14.65 \text{ J/g}$ برای آنتالپی محاسبه می‌شود. تعیین ظرفیت گرمایی ویژه به روش بیان شده در مراجع [۱۱،۱۰] نیاز به اندازه گیری سه نمونه، نمونه خالی بدون هیچ اطلاعاتی، نمونه استاندارد با ظرفیت گرمایی ویژه مشخص و البته نمونه مورد بررسی است. بر این اساس، مقادیر ظرفیت گرمایی نوارهای SA، W_1 و W_2 به ترتیب برابر با 0.46 J/gK ، [۸]، 0.27 J/gK و 0.23 J/gK بدست آمد. یکی از عوامل موثر بر ظرفیت گرمایی ویژه جرم‌مولی است. ظرفیت گرمایی کبالت، $C_p = 0.421 \text{ J/gK}$ ، از ظرفیت گرمایی تنگستن، $C_p = 0.132 \text{ J/gK}$ ، بیشتر است. بنابراین مقدار بیشتر کبالت در نمونه SA نسبت به دو نمونه W_1 و W_2 منجر به تفاوت مقدار ظرفیت گرمایی در نوارها شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های ترمودینامیکی دو نوار W_1 و W_2 ، به دست آمده از منحنی گرماسنجی.

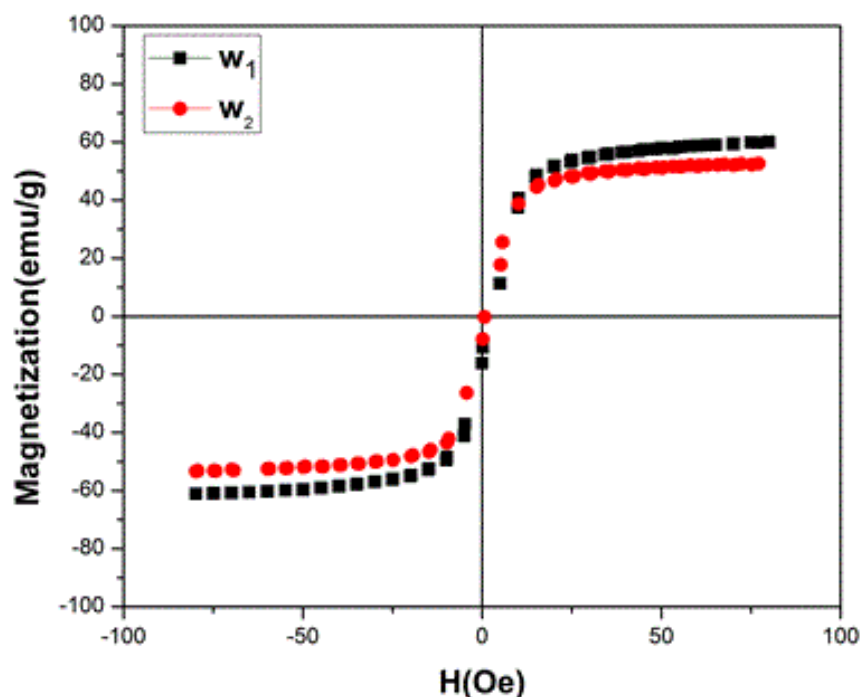
| نام نمونه | SA | W_2 | W_1 |
|---|-------|-----------------|--------|
| دمای بلورینگی ($^\circ\text{C}$) Tg | ۵۱۲٫۱ | ۵۶۳٫۳۰ - ۶۱۸٫۱۵ | ۵۵۴٫۱۰ |
| آنتالپی ($\Delta H(\text{J/g})$) | ۵۶٫۳۳ | ۱۴٫۶۵ - ۲۱٫۴۶ | ۲۹٫۷۱ |
| ظرفیت گرمایی ویژه (J/gK) C_p | ۰٫۴۶ | ۰٫۲۳ | ۰٫۲۷ |

شکل ۲ منحنی گرماسنجی نوارهای مغناطیسی الف) W_1 و ب) W_2

ویژگی‌های مغناطیسی

ویژگی‌های مغناطیسی نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 با استفاده از مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی VSM, Lake Shore 7407 در دمای اتاق بررسی شد. در شکل ۳ منحنی پسماند مغناطیسی آنها نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر مقادیر مغناطش اشباع M_s ، میدان وادارندگی H_c و مغناطش مانده M_r در نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 به دست آمده از منحنی‌های شکل ۳ در جدول ۳ گزارش شده است. به منظور بررسی تاثیر افزودن تنگستن بر ویژگی‌های مغناطیسی، این نتایج با نمونه SA [۱۲] مقایسه شده‌اند.

با توجه به منحنی پسماند مغناطیسی نوارهای W_1 و W_2



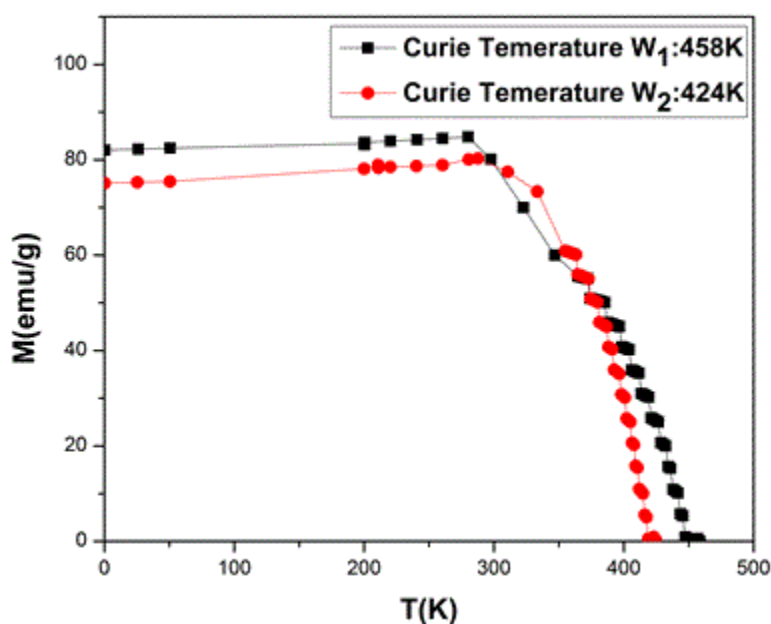
شکل ۳ منحنی پسماند مغناطیسی نوارهای مغناطیسی بی شکل W_1 و W_2 در دمای اتاق، پیش از باز پخت در دمای بلورینگی

جدول ۳ ویژگی‌های مغناطیسی دو نوار W_1 و W_2 در دمای اتاق، پیش از بازپخت در دمای بلورینگی

| دمای کوری T_c (K) | ضریب مغناطوتنگش λ_s | مغناطش اشباع M_s (emu/g) | مغناطش مانده M_r (emu/g) | میدان وادارندگی H_c (Oe) | نمونه |
|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| ۶۷۴ | -0.06×10^{-6} | ۷۶ | ۶۳٫۷۳ | ۰٫۴۹ | SA |
| ۴۲۴ | ناچیز | ۵۳٫۳۴ | ۴۶٫۱۲ | ۰٫۴۹ | W_2 |
| ۴۵۸ | -0.12×10^{-6} | ۶۱٫۱۴ | ۵۰٫۲۵ | ۰٫۴۲ | W_1 |

کبالت بر دمای کوری را نشان می‌دهد [۸،۹]. تغییر در ویژگی مغناطیسی آلیاژها در اثر جایگذاری عناصر مختلف به عوامل متعددی مانند تفاوت در ساختار الکترونی عناصر جایگزین، تغییر پیکربندی حالت نوار، تغییر فاصله بین اتمی به خاطر اختلاف در شعاع اتمی عناصر جایگزیده، نسبت داده شده است [۱۳]. ضریب مغناطوتنگش اشباع λ_s نوارهای مغناطیسی به ترکیب آنها بستگی دارد [۱۴]. برای اندازه گیری ضریب مغناطوتنگش نوارهای مورد بررسی از روش پیمانه کرنشی استفاده شد [۱۵-۱۷]. مقادیر ضریب مغناطوتنگش در نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 در جدول ۳ بیان شده است که برای نوارهای مغناطیسی با ترکیب مشابه این نمونه، مانند نوار SA مورد انتظار است [۱۸]. ضریب مغناطوتنگش نزدیک به صفر نقش بسیار مهمی در استفاده از این نوارها برای حسگرهای مغناطیسی و پاسخ امیدانس مغناطیسی دارد. از نظر علمی مواد با مغناطوتنگش نزدیک به صفر به علت توزیع مغناطوکشسانی رفتار مغناطیسی بهتری نشان می‌دهند. در مقایسه با موادی که مغناطوتنگش مخالف صفر دارند باعث تخریب رفتار فرومغناطیسی نرم می‌شوند. مغناطوتنگش بسیار ناچیز به دست آمده برای نوارها با ویژگی مغناطیسی آنها که در بخش ویژگی‌های ساختاری بیان شد همخوانی دارد.

یکی از پارامترهای مهم مواد فرومغناطیس، دمای کوری آنهاست. روش‌های متفاوتی برای اندازه گیری دمای کوری یک نمونه فرومغناطیس وجود دارد. در اینجا از منحنی مغناطش نسبت به دما (M-T) اندازه گیری شده توسط مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (Lake Shore 7407 (VSM) استفاده شد. میدان اعمالی در اندازه گیری ها ۱۰۰۰ Oe بود و نمونه به صورت موازی در میدان قرار می‌گرفت. افزایش دما باعث کاهش ویژگی مغناطیسی می‌شود تا جایی که مغناطش نمونه به صفر می‌رسد. نمودار M-T مربوط به نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 در گستره‌ی دمایی ۱۰۰ تا ۵۰۰ کلوین در شکل ۴ نشان داده شده است. در نوار مغناطیسی W_1 در دمای بالاتر از ۴۵۸ K، گذار از حالت فرومغناطیس به پارامغناطیس رخ داده است که این دما، دمای کوری نوار مغناطیسی W_1 است. در نوار مغناطیسی W_2 ، گذار از حالت فرومغناطیس به پارامغناطیس در دمای ۴۲۴ K صورت می‌گیرد. چنانکه دیده می‌شود در نمونه W_1 گذار در دمای بالاتری نسبت به نمونه W_2 رخ داده است. با توجه به اینکه مقدار عناصر سیلیسیم و بور در هر دو نمونه یکسان است. تفاوت مقادیر مغناطش اشباع و دمای کوری در دو نمونه مربوط به تفاوت مقادیر کبالت در آنهاست. این نتایج با توجه به دمای کوری نوار SA نقش بارز



شکل ۴ منحنی تغییرات دمایی مغناطش برای نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 .

ویژگی‌های مکانیکی

یکی از ویژگی‌های مکانیکی نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 ، با استفاده از آزمایش ریزسختی سنجی به روش ویکرز براساس استاندارد ASTM E384-17، با نیروی ۲۵gf با فرورونده هرم الماسه، در شرایط آزمایشگاهی با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بررسی شد. آزمون ریزسختی ویکرز از متداولترین آزمون‌های ریز سختی سنجی بوده و اصول آن مانند آزمون ویکرز استاندارد است، با این تفاوت که به جای نیروی فرورونده چند کیلوگرمی، نیروها در حد گرم هستند. این آزمون با میکروسکوپ‌های متالورژیکی که برای این کار طراحی شده اند، انجام می‌شود. فرورونده هرم الماسی کوچک روی صفحه یک عدسی شیئی ویژه جاسازی شده است. سطح نمونه‌ها برای بررسی‌های ریزنگاری پرداخت و براق شد. مشاهده قطعه زیر میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی‌های مختلف، امکان متمرکز کردن عدسی بر دانه‌های مجزای ماده و فروکردن هرم الماسی با نیروی کم در آن نقطه را فراهم می‌سازد. پس از آن قطر لبه مربع شکل فرورفتگی به دقت اندازه‌گیری و عدد سختی با استفاده از رابطه زیر [۱۹] محاسبه می‌شود:

$$HV = \frac{F}{A} \approx \frac{1.8544F}{d^2} \quad (1)$$

که، HV عدد سختی ویکرز با دندانه الماسه هرمی‌شکل برحسب کیلوگرم بر میلی‌متر مربع، F بار وارده بر حسب کیلوگرم و d قطر مربع فرو رفتگی برحسب میلی‌متر است. نتایج آزمایش ریزسختی سنجی برای نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 در جدول ۴ بیان شده است. چنانکه دیده می‌شود با افزودن مقدار بیشتر تنگستن به نوار مغناطیسی W_2 که منجر به کاهش مقدار کبالت در آن شده است، سختی نوارها به طور

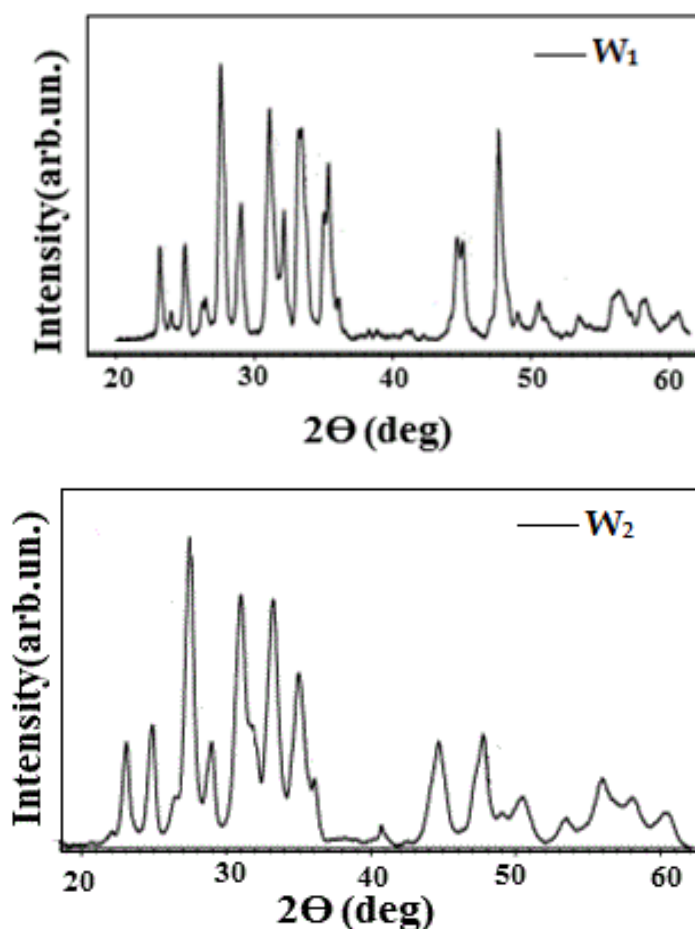
میانگین کاهش یافته است. بنابراین نوار W_1 تحمل بار بیشتری نسبت به نوار W_2 دارد.

ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی در حالت بلورینگی

چنانکه بیان شد نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 در دمای اتاق بی‌شکل هستند. با توجه به بخش ویژگی‌های ترمودینامیکی: دمای بلورینگی برای نوار W_1 ۵۵۴/۱۰ درجه سانتیگراد است و برای نوار W_2 ، دو دمای بلورینگی وجود داد که یکی در ۵۶۳/۳۰ درجه و یکی در دمای ۶۱۸/۵ درجه سانتیگراد است. از این رو، نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 در دمای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه بازپخت شدند. در الگوهای پراش پرتو ایکس شکل ۵، و چندین قله وجود دارد و هر دو نوار مغناطیسی W_1 و W_2 با بازپخت در دمای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد از حالت بی‌شکل در آمده اند. فازهای مربوط به طیف XRD هر دو نوار با قطعیت قابل شناسایی نیستند و تنها نشان از حالت بلوری نوارها پس از باز پخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی دارند. کاهش تنش داخلی در نمونه‌ها به دلیل بهبود ویژگی‌های بلوری در اثر بازپخت در دمای بالاست. انرژی گرمایی می‌تواند باعث قرارگیری بهتر اتم‌ها در جایگاه‌های خود در ساختار بلوری ماده شود. همچنین نفوذ دانه‌ها و ادغام آنها در یکدیگر از نتایج افزایش انرژی گرمایی است. این فرایند نقایص بلوری در ماده را کاهش می‌دهد [۲۰]. همچنین از آنجا که مواد فرومغناطیس به صورت بی‌شکل دارای رفتار مغناطیسی متفاوتی نسبت به حالت بلورینه هستند. بازپخت نمونه‌ها منجر به کاهش نفوذ پذیری مغناطیسی و افت ویژگی‌های مغناطیسی در اثر به وجود آمدن ناهمسانگردی مغناطوبلوری می‌شود.

جدول ۴ نتایج ریزسختی سنجی برای دو نوار W_1 و W_2 .

| نمونه | W_2 | W_1 |
|-------------------|---------|-------|
| موقعیت سختی سنجی | مغز | مغز |
| نیروی اعمالی (gf) | ۲۵ | ۲۵ |
| عدد سختی (HV) | سختی ۱ | ۹۴۶ |
| | سختی ۲ | ۱۰۰۳ |
| | سختی ۳ | ۹۷۴ |
| | میانگین | ۹۷۴ |

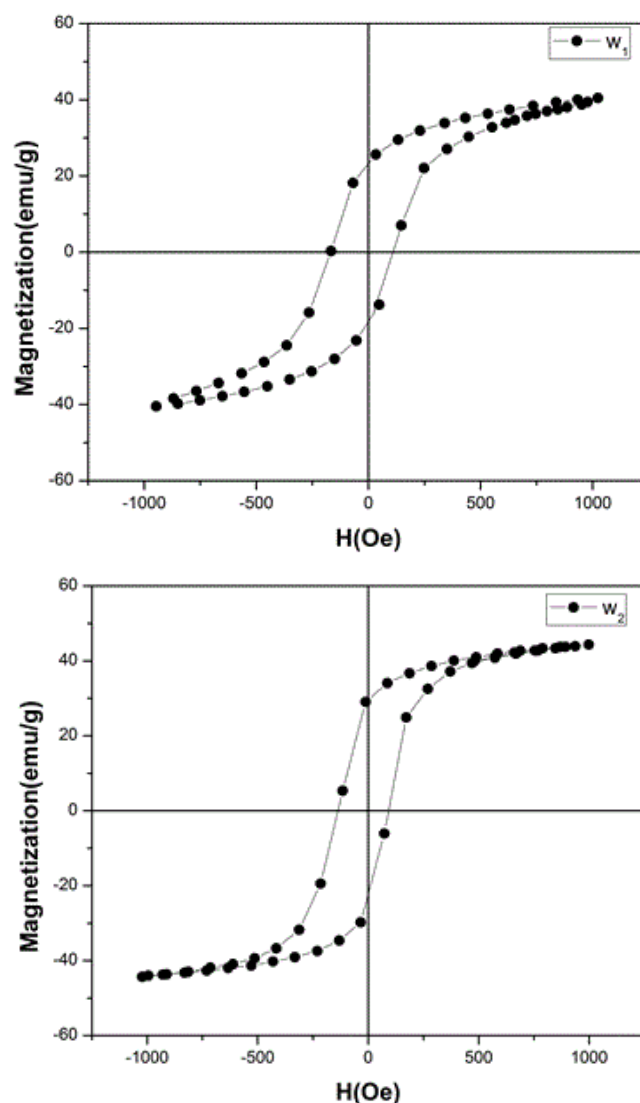


شکل ۵ الگوی پراش پرتو ایکس نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 پس از بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی

مغناطیسی ویژگی نرم بودن خود را از دست می دهند. با بررسی نتایج به دست آمده، مقدار مغناطش اشباع در نمونه W_1 پس از بازپخت از نمونه W_2 بیشتر بوده است که ویژگی مغناطیسی آن مربوط به مقدار بیشتر کبالت در نمونه W_1 نسبت به W_2 است. پس از بازپخت دو نمونه، با وجود میخکوب شدن دیواره های حوزه و به وجود آمدن ناهمسانگردی مغناطوبلوری همچنان مقدار بیشتر کبالت در نمونه W_1 نقش اصلی را در مغناطیدگی دارد. مقدار بیشتر کبالت در نوار SA نسبت به دو نوار W_1 و W_2 تاییدی بر اثر یون کبالت بر مغناطیس اشباع است. پس از بازپخت میدان وادارندگی در نمونه W_1 از نمونه W_2 بیشتر است، بنابراین این نمونه پس از بازپخت نسبت به نمونه W_2 فرومغناطیس سخت تری است. این نتیجه در مقایسه با میدان وادارندگی نوار SA که دارای مقدار بیشتر یون کبالت نسبت به هر دو نمونه است، همخوانی دارد.

به منظور تعیین ویژگی‌های مغناطیسی، نوارهای W_1 و W_2 پس از بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی، از مغناطیس سنج ارتعاشی استفاده شد.

چنانچه در شکل ۶ دیده می شود در این نوارها، پس از قرار گرفتن در دمای بالاتر از دمای بلورینگی (۶۰۰ درجه سلسیوس) به علت تغییر ریز ساختاری نمونه و به وجود آمدن ناهمسانگردی مغناطوبلوری، مقدار میدان وادارندگی افزایش یافته و نمونه از حالت فرومغناطیس نرم به حالت فرومغناطیس سخت تبدیل شده است. در جدول ۵ مقادیر مغناطش اشباع MS ، میدان وادارندگی H_C و مغناطش مانده M_r در نمونه های W_1 و W_2 و SA پس از بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی آورده شده است. وجود ناهمسانگردی القایی نسبتا بالا در نوارهای مغناطیسی، در اثر بازپخت، منجر به افزایش مراکز میخکوب شده و افزایش تنش داخلی می شود. بنابراین نوارهای



شکل ۶ منحنی پسماند مغناطیسی نوارهای مغناطیسی W_1 و W_2 پس از بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی.

جدول ۵ ویژگی‌های مغناطیسی دو نوار W_1 و W_2 پس از بازپخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی.

| مغناطش اشباع M_s (emu/g) | مغناطش مانده M_r (emu/g) | میدان وادارندگی H_C (Oe) | نمونه |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| ۷۲٫۲۰ | ۴۷٫۲۲ | ۱۸۱٫۲۷ | SA |
| ۳۹٫۵۶ | ۲۸٫۶۴ | ۱۰۱٫۴۴ | W_2 |
| ۴۷٫۹۷ | ۳۰٫۶۸ | ۱۳۳٫۹۶ | W_1 |

برداشت

در این پژوهش برای نخستین بار، نوارهای مغناطیسی بر پایه کبالت با دو مقدار متفاوت تنگستن بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که این نوارها پیش از بازپخت در دمای بلورینگی، بی شکل و فرومغناطیس نرم با ضریب مغناطوتنگش نزدیک به

صفر هستند. همچنین ویژگی‌های ترمودینامیکی نوارها مانند ظرفیت گرمای ویژه و آنتالپی، ویژگی‌های مغناطیسی مانند دمای کوری و ویژگی‌های مکانیکی مانند میزان سختی نوارها بررسی و تفسیر شدند. با توجه به اینکه مقدار عناصر سیلیسیم و بور در هر دو نمونه یکسان است، تفاوت مقادیر مغناطش

- [7] A talay S., "Comparative study of magnetoimpedance effect in current and field annealed $(Co_{0.9}Fe_{0.05}Ni_{0.05})_{75}Si_{15}B_{10}$ amorphous ribbons", *Physica B: Condensed Matter* 368 (1-4) (2005) 273-278.
- [8] Liu J., Cao F., Xing D., Zhang L., Qin F., Peng H., Xue X., and Sun J., "Enhancing GMI properties of melt-extracted Co-based amorphous wires by twin-zone Joule annealing", *Journal of Alloys and Compounds* (541) (2012) 215-221.
- [9] Domínguez L., Blanco J., Aragonese P., González J., Valenzuela R., Vázquez M. and Hernando A., "Circumferential magnetization processes in CoFeBSi wires," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (79)(1996) 6539.
- [10] Dachs E., Benisek A., "A sample-saving method for heat capacity measurements on powders using relaxation calorimetry", *Cryogenics* 52(8) (2011) 460-464.
- [11] Simon P., Cibulková Z., "Measurement of Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry" (2003).
- [12] Amirabadizade A., cheki fourg S., Rasouli M R., "The effect of field-current annealing of cobalt-based amorphous corroed ribbon magnet-impedance response", *The Annual Physics Conference of Iran* (1396).
- [13] Muraca D., Cremaschi V., Knobel M. & Sirkin H., "Influence of Ge on magnetic and structural properties of Joule-heated Co-based ribbons: Giant magnetoimpedance response", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320(15) (2008) 2068-2073.
- [14] De La Prida., V M García Miquel., Á H, Kurlyandskaya G., "Wide-angle Magnetoimpedance field sensor based on two crossed amorphous ribbons", *Sensors and Actuators A Physical* 142(2) (2008) 496-502.
- [15] Amirabadizadeh A., Tajabor N., Alinejad M.R., Pouraian F., "The effect of substitution of Ni for Co on magnetostrictive strain in $GdCo_4xNi_xB$ compounds" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276 Part 3 (2004) 2081-2083.
- [16] Tajabor N., Amirabadizadeh A., Alinejad M.R., Salamati H., Pouraian F., "Anomalous behavior of temperature dependence of magnetostriction in $NdFe_{11}Ti$ ", *Journal of*

اشباع و دمای کوری در دو نمونه مربوط به تفاوت مقادیر کبالت است. با بازیخت نوارها در دمای بالاتر از دمای بلورینگی، نوارها از فرومغناطیس نرم به فرومغناطیس سخت تبدیل شده‌اند. میدان وادارندگی برای نوار W_1 از ۰/۴۲ اورستد به ۱۳۳/۹۶ اورستد و برای نوار W_2 از ۰/۴۹ اورستد به ۱۰۱/۴۴ اورستد تغییر کرده است. همچنین مغناطیس اشباع پیش از بازیخت و هم پس از آن در نمونه W_1 نسبت به W_2 به علت وجود مقدار بیشتر یون کبالت بیشتر است. الگوی XRD نوارها نشان می‌دهد که نوارها در اثر بازیخت در دمای بالاتر از دمای بلورینگی از حالت بی شکل خارج شده و بلورینه شده‌اند. دلیل تفاوت ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نوارهای W_1 و W_2 در حالت بی شکل و بلورینه به نقش بسیار مهم کبالت و تنگستن موجود در نوارها مربوط است.

مراجع

- [1] Kurlyandskaya G.V., Barandiarán J. M., Vázquez M., García D. & Dmitrieva N.V., "Influence of geometrical parameters on the giant magnetoimpedance response in amorphous ribbons", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000) 740-742.
- [2] Graham C. D & Egami Jr. T., "Magnetic properties of amorphous alloys Annual", *Review of Materials Science* 8(1) (1987) 423-457.
- [3] Amirabadizadeh A., Rasouli M.R., Mardani R., Sarhadi R., "Investigation of magnetic anisotropy in Co-based microwires", *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 24 (3) (2016) 587-594.
- [4] Kolano R., Kuzminski M., Gawior W., Wojcik N., "Induced transverse magnetic anisotropy and domain structure in Co-based amorphous ribbons", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 133 (1-3) (1994) 321-324.
- [5] Kolano R., Gawior W.W., Wojcik N., Kuzminski M., "Induced transverse magnetic anisotropy in Co-based amorphous alloys with different values of the saturation induction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 140 (1995) 343-344.
- [6] Hernando B., Sa'nchez M. L., Prida V. M & Tejedor M., "Magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline ribbons", *Journal of Applied Physics* 90(2001) 4783.

- [19] Smith R.L. & Sandland G.E., *"An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness"*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol. I (1922) 623–641.
- [20] Raufi T., Ehsani M.H., Sanovi Khoshnod D., *"Investigation of particle size effect on structural and magnetic properties of $La_{0.6} Sr_{0.4} MnO_3$ manganite"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (4) (2017) 691-702.
- Magnetism and Magnetic Materials 272–276 Part 3 (2004) 2093-2095.
- [17] Gholizadeh A., Tajabor N., Pourarian F., *"A comparative study of magnetostrictive strain in $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$ -ingot and $Pr_3Fe_{24.75}Co_{2.75}Ti_{1.5}$ -melt spun"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22 (1) (2014) 13-22.
- [18] M. Victor., H. García-Miquel., and G. V. Kurlyandskaya., *"Wide-angle magnetoimpedance field sensor based on two crossed amorphous ribbons"*, Sensors and Actuators A: Physical, 142 (2) (2008) 496-502.