

ارزیابی ریزساختاری و خواص مغناطیسی آلیاژ آمورف پایه کبالت $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ تولید شده به روش مذاب‌ریسی و آلیاژسازی مکانیکی

محسن بزرگمهر^۱، مجید حسین‌زاده^{۱*} و مجید عسکری^۲

۱- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۶/۰۱)

چکیده - آلیاژهای آمورف پایه کبالت جهت کاربردهای مختلفی شامل استفاده در صنایع الکترونیک، حسگرها و حافظه‌های مغناطیسی با توجه به خواص مغناطیسی ویژه خود شامل مغناطوتنگش نزدیک به صفر، نفوذپذیری مغناطیسی و مغناطش اشباع بالا مورد توجه بسیاری از محققان برای انجام تحقیقات بنیادی هستند. هدف از انجام این پژوهش ساخت و بررسی خواص مغناطیسی آلیاژ آمورف پایه کبالت با استفاده از فرایند ذوب‌ریسی مذاب و آلیاژسازی مکانیکی است. آلیاژ تولیدی به هر دو روش توسط میکروسکوپی الکترونی روبشی، دستگاه پراش سنج پرتو ایکس و دستگاه مغناطوسنج ارتعاشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب تولید شده به روش ذوب‌ریسی با دیسک مبرد دارای خواص نرم مغناطیسی مناسب‌تری می‌باشد.

واژگان کلیدی: مغناطیس نرم، آلیاژهای آمورف، ذوب‌ریسی مذاب، خواص مغناطیسی، آلیاژسازی مکانیکی

Evaluation of Microstructure and Magnetic Properties of Cobalt-based Amorphous Alloy $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ Produced by Melt Spinning and Mechanical Alloying

M. Bozorgmehr¹, M. Hosseinzadeh^{1*} and M. Askari²

1- Department of Materials Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Abstract: Cobalt-based amorphous alloys attracted the attention of many researchers to carry out fundamental research for their application in electronics, sensors and magnetic memory due to their special magnetic properties including close to zero

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: majid.h.2008@gmail.com

Magnetostriction, magnetic permeability and high saturation magnetization. The purpose of this study is the formation and evaluation of microstructure and magnetic properties of cobalt-based amorphous alloy produced by melt spinning and mechanical alloying. The final compositions produced by both methods were studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and vibrating magnetoresistance. The results showed that compound produced by chill block melt spinning has a better magnetic properties.

Keywords: *Soft magnetic, Amorphous alloys, Melt spinning, Magnetic properties, Mechanical alloying*

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر آلیاژهای آمورف مغناطیسی به‌علت دارا بودن خواص مغناطیسی کاربردی در زمینه وسایل الکترومغناطیس با کارایی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. آلیاژهای آمورف و نانو بلوری بر پایه آهن یکی از پرطرفدارترین مواد از گروه مواد مغناطیسی نرم هستند. خواص جالب توجه آلیاژ Co-Si-B منجر به ایجاد قابلیت بالای این آلیاژ در کاربردهایی نظیر حسگرهای مغناطیسی شده است. برای مثال ماده مغناطیسی نرم کبالت در کاربردهایی نظیر الکترونیک صنعتی، تجهیزات مخبراتی و وسایل حسگر به‌کار می‌رود [۲]. آلیاژهای آمورف از روش‌های مختلفی مانند تجزیه حرارتی، آلیاژسازی مکانیکی و ذوب‌ریسی مذاب به‌دست می‌آیند. در مقایسه با سایر روش‌ها، فرایند انجماد سریع می‌تواند باعث شکل‌گیری فازهای بلوری شبه پایدار و آمورف و همچنین قابلیت وسیع حل شدن جامد در بالای محدوده تعادلی شود [۳]. آلیاژهای آمورف برای کاربرد به‌عنوان هسته‌های مغناطیسی نرم معمولاً در معرض یک عملیات حرارتی آنیل تنش‌زدایی قرار می‌گیرند تا خواص مغناطیسی آنها بهینه شده و در بسامدهای پایین مورد استفاده قرار گیرند [۴]. آلیاژهای آمورف پایه کبالت جهت کاربردهای مختلفی شامل استفاده در صنایع الکترونیک و حسگرها و حافظه‌های مغناطیسی با توجه به خواص مغناطیسی ویژه خود شامل مغناطوتنگش نزدیک به صفر، نفوذپذیری مغناطیسی و مغناطش اشباع بالا مورد توجه بسیاری از محققان برای انجام تحقیقات بنیادی هستند [۵]. در یک دهه اخیر، آلیاژهای نانو بلوری مغناطیسی نرم پایه کبالت از طریق تبلور آلیاژهای آمورف به‌همراه فرایندهای عملیات حرارتی تولید شده‌اند. فرایند بلوریزه شدن^۱ یا تبلور آلیاژهای آمورف یک پدیده پیچیده است که به ترکیب شیمیایی آلیاژ و همچنین

متغیرهای عملیات حرارتی بستگی دارد [۶]. برحسب ترکیب شیمیایی آلیاژ، انتقال از ساختار شبه پایدار آمورف به حالت بلوری (تعادلی یا شبه پایدار) می‌تواند در یک مرحله (تبلور پلی‌مورفیک یا یوتکتیک) و یا در یک فرایند چند مرحله‌ای (تبلور اولیه) صورت بگیرد [۸ و ۷]. تبلور اولیه آلیاژهای آمورف Co-Si-B بدون افزودن عنصر آلیاژی آهن با فاز کبالت با ساختار بلوری هگزاگونال فشرده شناخته شده است [۱۰ و ۹]. آلیاژهای آمورف تعادل ترمودینامیکی ندارند و این موضوع ناشی از انجماد سریع از فاز مایع است. در واقع، خواص فیزیکی این مواد ناپایداری نسبی زیادی را نسبت به هر دو متغیر دما و زمان نشان می‌دهد. واضح است که این ناپایداری‌ها مانع از کاربردهای عملی آلیاژهای آمورف می‌شود [۱۱]. آلیاژهای آمورف توسط روش‌های مختلفی مانند ذوب‌ریسی مذاب، آلیاژسازی مکانیکی، رسوب بخار و آلیاژسازی شیمیایی ساخته می‌شوند. در روش ذوب‌ریسی مذاب با انجماد سریع آلیاژهای فلزی مواد آمورف و نانو بلور تولید می‌شود. آلیاژ با سامانه دو تایی Co-B به‌راحتی توسط فرایند ذوب‌ریسی مذاب آمورف می‌شود. همچنین آلیاژهای پیچیده‌تر با خواص ویژه توسط اضافه شدن عناصر دیگر به این سامانه آلیاژی در درجه حرارت‌های خاص از فاز آمورف متبلور می‌شوند. مواد آمورف بر پایه آهن و کبالت دارای خواص مغناطیسی نرم خوب شامل مغناطش اشباع، نفوذپذیری مغناطیسی بالا و نیروی وادارندگی و تلفات پایین هستند [۱۳ و ۱۲]. در یک دهه اخیر انواع مختلف فلزات شیشه‌ای یا فلزات آمورف توسعه پیدا کرده است. فلزات شیشه‌ای بالک^۲ به‌علت دارا بودن خواص منحصر به‌فرد در مهندسی و علم مواد بسیار مورد توجه قرار دارند. سامانه‌های آلیاژی آمورف بر پایه Pd, Zr, Ti, Ni, Co, Fe و Mg با نرخ سرد شدن کمتر از 10^3 کلوین بر ثانیه و ضخامت بالای یک

میلی متر تولید شده‌اند. شکل‌گیری فلزات شیشه‌ای بالک به متغیرهای مختلف ماده مانند خلوص و اندازه اتمی عناصر تشکیل دهنده و همچنین متغیرهای خارجی شامل نرخ سرد شدن و درجه حرارت ریخته‌گری بستگی دارد [۱۴].

۲- مواد و روش تحقیق

با توجه به اینکه اولین مرحله تولید هر آلیاژ، طراحی و انتخاب آلیاژ است، آلیاژ باید در ابتدا توسط دستگاه آسیاکاری در ترکیب‌های مختلف به منظور ارزیابی خواص، به صورت پودری تولید شود. به منظور جلوگیری از آلودگی پودرها و ایجاد محفظه خنثی جهت نمونه‌برداری، از محفظه با محیط کنترل شده قابل دسترس^۳ نیز استفاده شد. مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی به صورت پودری و ساخت شرکت مرک بوده و اندازه ذرات در حدود ۲۰-۱۰۰ میکرون و درصد خلوص مواد بیشتر از ۹۹ درصد بود. همچنین برای فرایند مذاب‌ریسی با دیسک مبرد، مواد مورد استفاده به صورت کلوخه‌ای و ساخت شرکت آلد‌ریچ و درصد خلوص بیشتر از ۹۹ درصد، تهیه شد. در فرایند مذاب‌ریسی با دیسک مبرد قبل از انجام عملیات مذاب‌ریسی ابتدا شمش آلیاژی تهیه شد. دستگاه آسیای سیاره‌ای مورد استفاده در این پژوهش شامل چهار محفظه از جنس فولاد زنگ نزن بود. جنس گلوله‌های مورد استفاده نیز از فولاد کروم سخت انتخاب شد. در هر محفظه، یک ورودی و خروجی گاز آرگون برای ایجاد محیط خنثی تعبیه شده است. این دستگاه توانایی کارکرد تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه را دارد. نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ به ۱ و سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. قبل از هربار شروع فرآیند، گاز آرگون به مدت ۳۰ ثانیه درون محفظه آسیاکاری برای ایجاد محیطی خنثی دمیده شد. دستگاه مذاب‌ریسی با دیسک مبرد تحت عنوان CBMS^۴ که شمایی از آن در شکل ۱ نشان داده شده است با مشخصات ذیل استفاده شد:

- روش ذوب: القایی با توان ۱۵ کیلووات؛

- جنس روزنه خروجی: کوارتز خالص با قطر داخلی

۱۸ میلی‌متر؛

- وزن آلیاژ در هر آزمایش مذاب‌ریسی: ۵ الی ۱۵ گرم؛

- فشار محفظه قبل از پرکردن مجدد با گاز آرگون (با خلوص

۹۹/۹۹۹ درصد): 5×10^{-5} میلی‌بار؛

- قطر دیسک مس - بریلیومی: ۲۴ میلی‌متر؛

- سرعت خطی دیسک: حداکثر ۴۰ متر بر ثانیه.

ابتدا از مواد اولیه که به صورت کلوخه‌ای تهیه شده بودند، شمش آلیاژی به وزن ۶۰ گرم تهیه شد. شمش حاصله به چهار قسمت با وزن ۱۲ الی ۱۵ گرم تقسیم شد تا از هر قسمت برای تولید نوار با سرعت‌های متفاوت استفاده شود. قطر سوراخ روزنه ۵۵۰ میکرومتر و خلاء نهایی قبل از تزریق گاز آرگون ۰/۰۲ میلی‌بار بود. به کمک دستگاه مغناطوسنج ارتعاشی^۵ (VSM) رفتار مغناطیسی نمونه‌های پودری و همچنین نوارهای تولیدی، مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های فنی این دستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

به منظور بررسی تشکیل آلیاژ در پودرهای آسیاکاری شده، ارزیابی فازی و بررسی تشکیل فاز آمورف در نمونه‌های پودری و نواری از آزمایش پراش پرتو ایکس^۶ (XRD) استفاده شد. دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده در این پژوهش دستگاه مدل PW3710 ساخت شرکت فیلیپس با هدف مسی و فیلتر نیکلی می‌باشد. لوله پرتو ایکس مورد استفاده در این دستگاه شامل لوله مسی با طول موج ۱/۵۴۲ آنگسترم است. ولتاژکاری دستگاه ۴۰ کیلوولت، جریان ۲۵ میلی‌آمپر و اندازه گام ۰/۰۵ درجه است. مشخصه‌یابی فازهای موجود در الگوهای پراش پرتو ایکس در محدوده زاویه ۲۰ الی ۹۰ درجه و توسط نرم‌افزار X' Pert High Score انجام شد. برای بررسی تغییرات اندازه ذرات، مورفولوژی و ساختار میکروسکوپی نمونه‌های پودری از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ (SEM) مدل VEGA-TESCAN-XMU استفاده شد. با توجه به اینکه بررسی ریز ساختار نوارهای آمورف نیاز به بزرگنمایی‌های بالاتری دارد، بررسی ریزساختار نمونه‌های تولیدی به روش مذاب‌ریسی با دیسک مبرد



شکل ۱- نمایی از دستگاه مذاب‌ریسی با دیسک مبرد

جدول ۱- مشخصات فنی دستگاه مغناطوسنج مورد استفاده در این تحقیق

مشخصات فنی دستگاه	مغناطیس سنج نمونه مرتعش
میدان	بیش از ۱/۵ تسلا در شکاف هوایی ۱۰ میلی‌متر
پایداری دامنه	±۱٪ خوانده و ±۰/۰۵٪ دامنه کامل
قدرت تفکیک دامنه	۰/۲ Oe در میدان پایین و ۲ Oe در میدان بالا
شکاف آهنربا	شکاف متغیر از ۱۰ تا ۱ سانتی‌متر
کنترل دما	دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد)

تشکیل فاز آمورف، الگوهای پراش پرتو ایکس آلیاژ $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ در شکل ۲ آورده شده است. در زمان ۱۰ دقیقه تمام عناصر آلیاژی به صورت مجزا در ترکیب قرار دارند و هیچ‌گونه انحلالی رخ نداده است. در زمان پنج ساعت عناصر آهن و مولیبدن هنوز به صورت کامل انحلال نیافت. با رسیدن به زمان ۳۰ ساعت، عملیات انحلال تقریباً به صورت کامل انجام شد. عنصر آهن پس از ۳۰ ساعت در ترکیب حل شده است. همچنین فاز شبه پایدار (FCC) Co (به دلیل افزایش تنش و انحلال عناصر) در زمان‌های ۳۰ و ۵۰ ساعت ظاهر شد. با افزایش زمان نیز تغییر دیگری مشاهده نمی‌شود و تنها شدت قله مربوط به کبالت کاهش یافت.

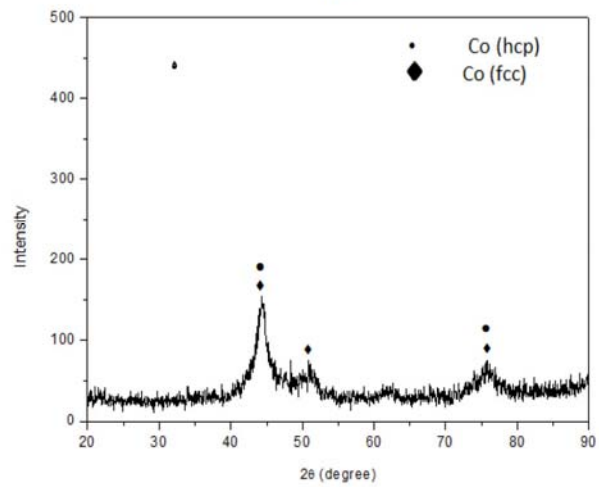
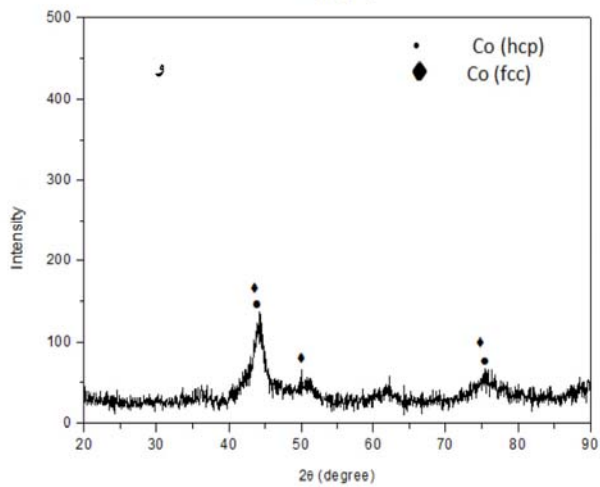
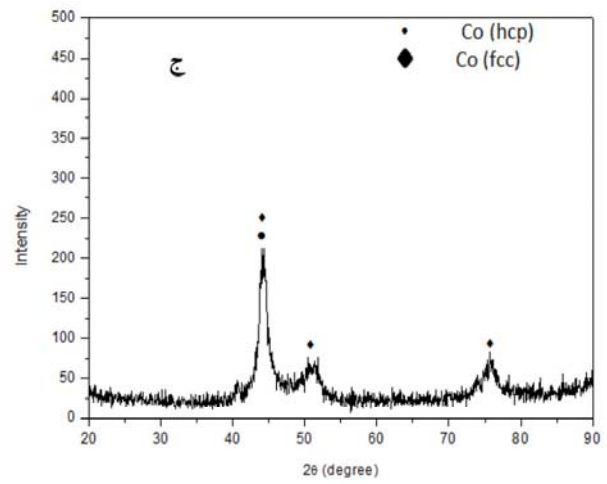
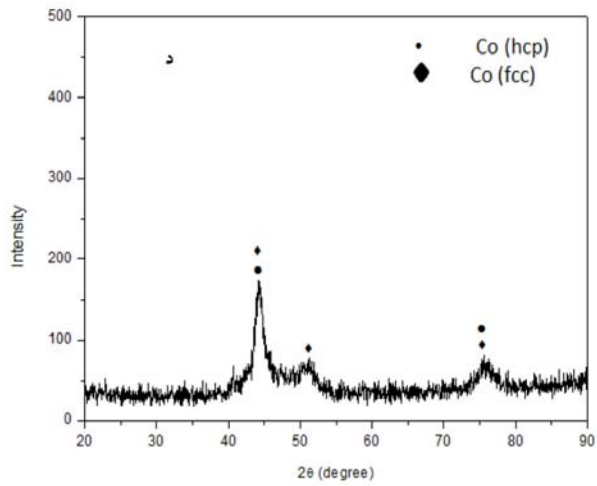
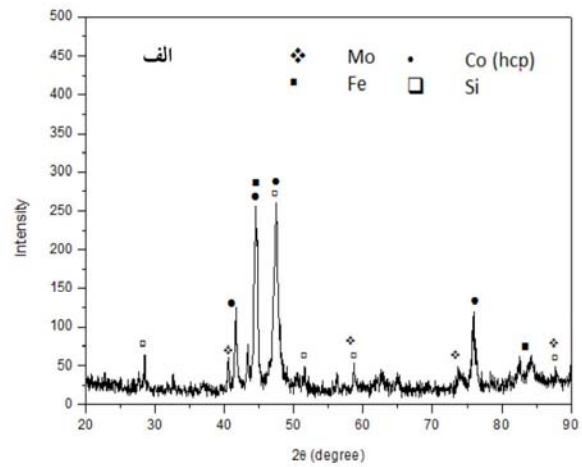
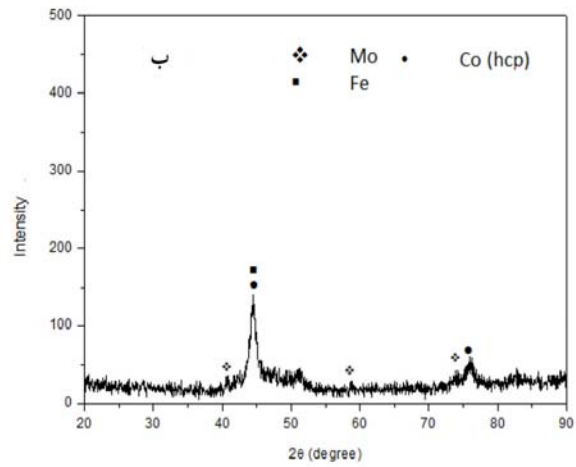
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودرهای آلیاژ $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ را، به ترتیب در زمان‌های ۱۰ دقیقه و ۵، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ساعت در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل MIRA 3-XMU انجام شد. جهت تهیه تصاویر پودرها، مقداری از پودر روی چسب مخصوص قرار گرفت. سپس به منظور رسانا کردن پودرها، لایه نازکی از طلا روی سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پراکنش نشانده شد. همچنین به منظور تهیه تصاویر نوارها، ابتدا نوارها توسط چسب مخصوص به سطح نمونه‌گیر چسبانده و سپس پوشش طلا اعمال شد.

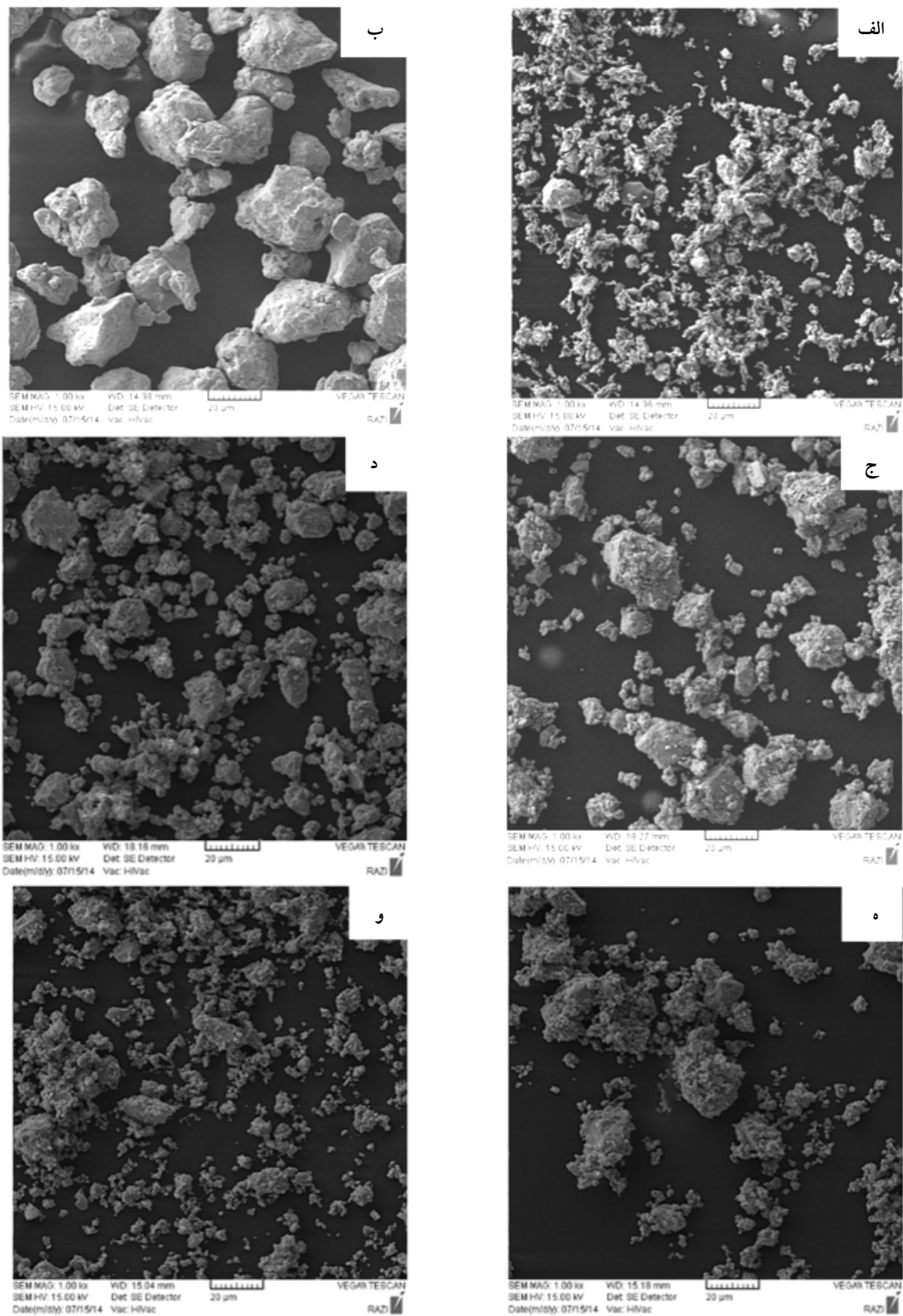
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تولید ترکیب $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ توسط آلیاژسازی مکانیکی

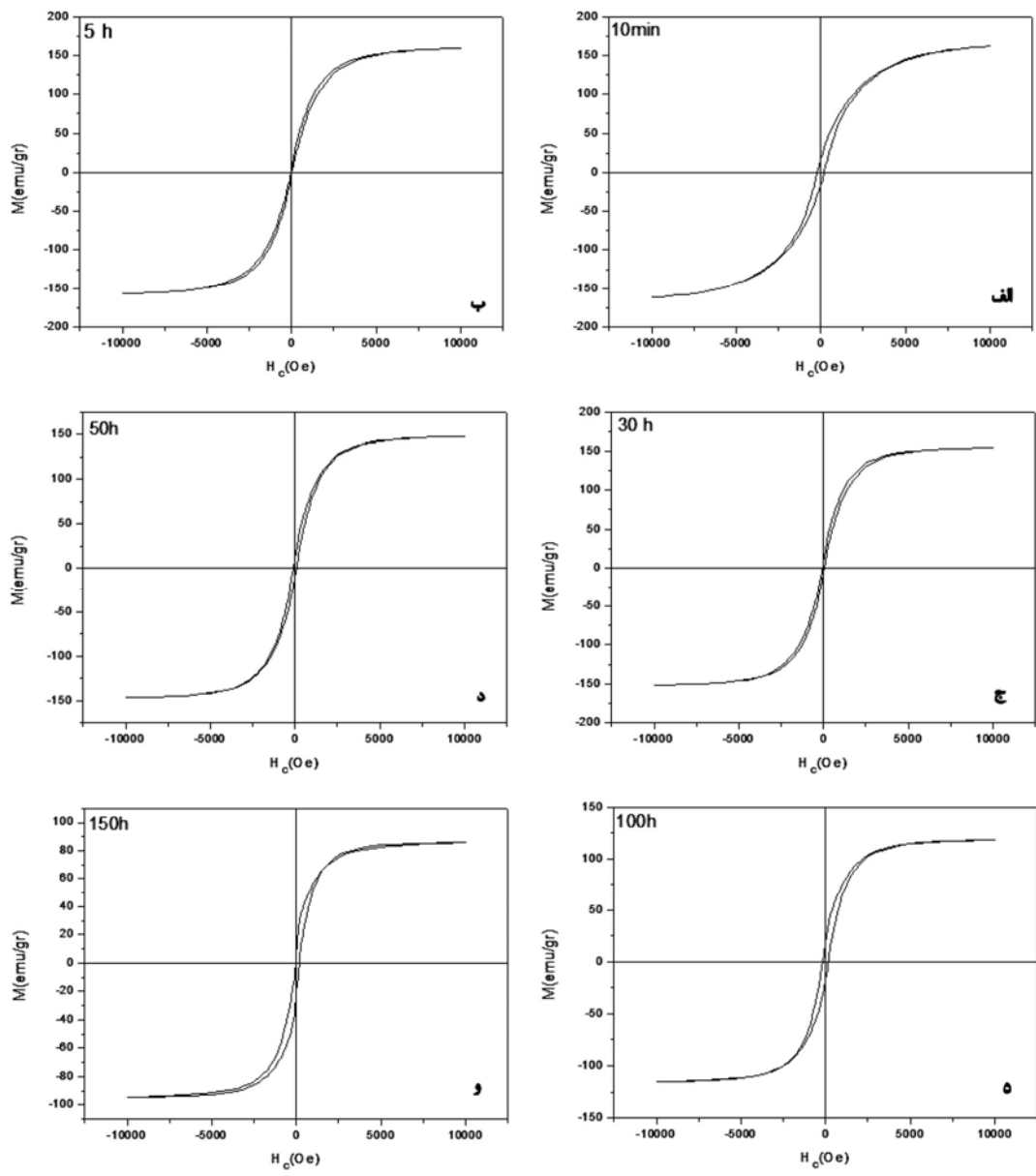
عامل متغیر در این آلیاژ، مدت زمان آسیابکاری است. به منظور بررسی تأثیر زمان آسیابکاری بر تشکیل فاز آمورف، عملیات آسیابکاری تا ۱۵۰ ساعت ادامه یافت. به منظور بررسی چگونگی



شکل ۲- الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه آسیاکاری شده به مدت: (الف) ۱۰ دقیقه، (ب) ۵ ساعت، (ج) ۳۰ ساعت، (د) ۵۰ ساعت، (ه) ۱۰۰ ساعت و (و) ۱۵۰ ساعت



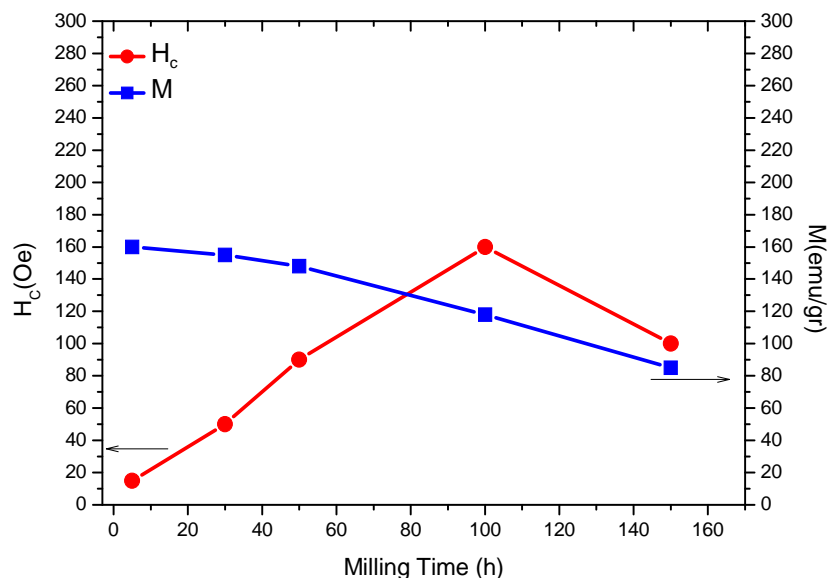
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودرهای آسیا شده به مدت: الف) ۱۰ دقیقه، ب) ۵ ساعت، ج) ۳۰ ساعت، د) ۵۰ ساعت، ه) ۱۰۰ ساعت و و) ۱۵۰ ساعت با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر



شکل ۴- منحنی‌های پسماند مغناطیسی برای پودرهای آسیاکاری شده در مدت زمان‌های: الف) ۱۰ دقیقه، ب) ۵ ساعت، ج) ۳۰ ساعت، د) ۵۰ ساعت، ه) ۱۰۰ ساعت و و) ۱۵۰ ساعت

مورفولوژی و اندازه متوسط ذرات تغییری نداشته و تأثیر مخربی بر خواص مغناطیسی در زمان‌های بالاتر نخواهد داشت. شکل ۴ منحنی‌های پسماند مغناطیسی مربوط به آلیاژ $Co_{70}B_{20}Si_5Fe_4Mo_1$ را نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی

در ساعات اولیه آسیاکاری پودرها در حال کار سخت شدن هستند و پدیده غالب، جوش سرد ذرات است. با افزایش زمان، نسبت شکست ذرات پودری به جوش سرد افزایش و اندازه ذرات کاهش یافته است. از زمان ۵۰ ساعت به بعد



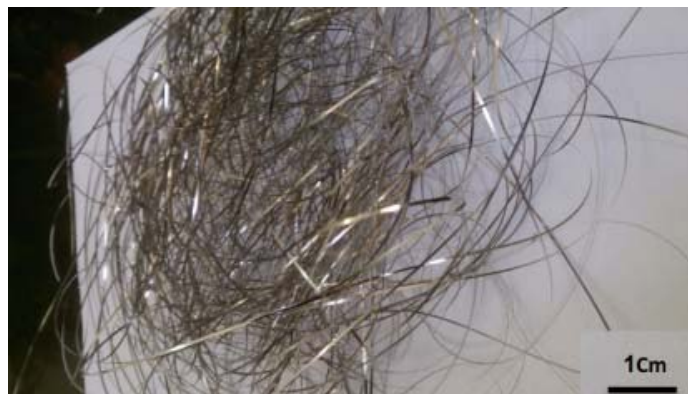
شکل ۵- مقادیر مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا برای ترکیب $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ پس از انجام آسیاکاری در زمان‌های مختلف

فوق با سرعت‌های متفاوت چرخش دیسک شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه تهیه شد. در شکل ۶ نمونه‌ای از نوارهای تولید شده به‌روش مذاب‌ریسی با دیسک مورد نشان داده شده است. همچنین، شکل ۷ منحنی‌های پسماند مغناطیسی و شکل ۸ تغییرات مقادیر مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا برحسب تغییرات سرعت خطی حرکت دیسک را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۰ نیروی پسماندزدا با تغییر سرعت خطی دیسک تغییر نکرده و در مقدار ثابت ۲۰e باقی مانده است. مقادیر مغناطش اشباع نیز تغییرات اندکی را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ منحنی‌های پسماند مغناطیسی مربوط به نمونه آسیاکاری شده به مدت ۱۵۰ ساعت و نمونه مذاب‌ریسی شده با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، نوار آمورف خواص نرم فوق‌العاده مناسبی، از جمله نیروی پسماندزدا پایین را نسبت به نمونه پودری نشان می‌دهد. دلیل این امر به احتمال زیاد عدم وجود ناخالصی‌ها، عوامل آلوده‌کننده، فازهای ناخواسته، تنش و غیره در روش مذاب‌ریسی با دیسک مبرد است. همچنین در روش آلیاژسازی مکانیکی علاوه بر زمینه آمورف، بلورهای محلول جامد غنی از کبالت نیز در ساختار وجود دارد و ساختار به‌طور کامل آمورف نشده است. با توجه به عدم تغییر مقادیر

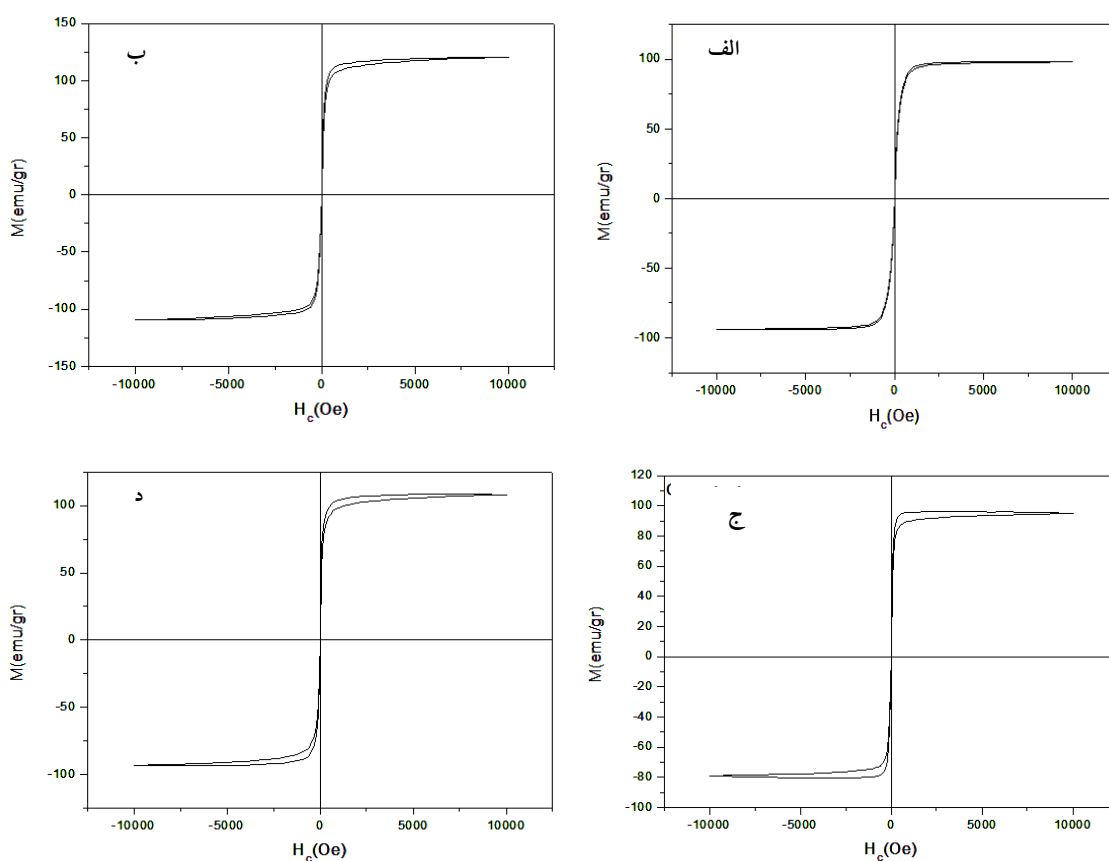
دقیق‌تر و تحلیل نتایج، مقادیر مغناطش اشباع (M) و نیروی پسماندزدا (H_c) برحسب زمان آسیاکاری برای ترکیب فوق در شکل ۵ آورده شده است. با افزایش زمان آسیاکاری، مقدار نیروی پسماندزدا در حال افزایش است. این امر به احتمال زیاد به دلیل انحلال عناصر آلیاژی در زمینه کبالت، ایجاد ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها، وجود تنش ناشی از عملیات آسیاکاری، تشکیل ترکیبات ناپایدار و غیره می‌باشد. این افزایش تا زمان ۱۰۰ ساعت ادامه دارد و پس از آن مقدار نیروی پسماندزدا کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل آغاز شکل‌گیری زمینه آمورف باشد. در حقیقت بخش زیادی از ساختار به‌صورت آمورف به‌همراه محلول جامد غنی از کبالت با شبکه FCC تبدیل شده است. تغییرات مغناطش اشباع نیز این مطلب را تأیید می‌کند.

۳-۲- تولید ترکیب $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ توسط مذاب‌ریسی با دیسک مبرد

پس از بررسی آلیاژ $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ توسط فرایند آسیاکاری، در مرحله بعد آلیاژ $\text{Co}_{70}\text{B}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}_1$ به‌روش مذاب‌ریسی با دیسک مبرد به‌صورت نوارهایی با عرض ۰٫۷ الی ۰٫۸ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ الی ۲۳ میکرومتر تولید شد. آلیاژ



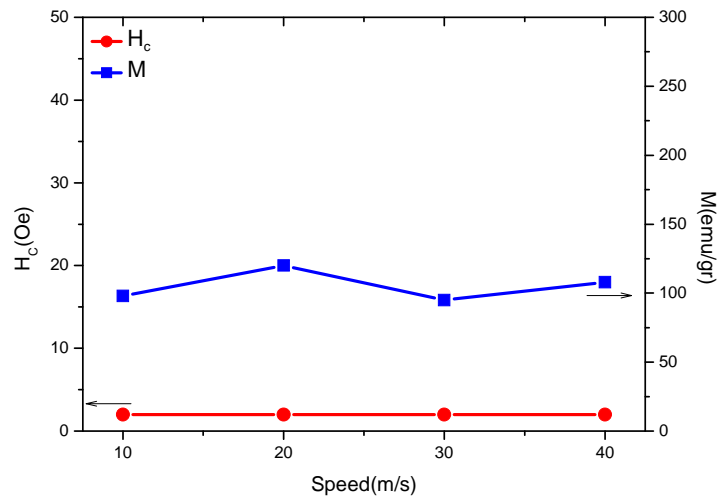
شکل ۶- نمونه‌ای از نوارهای تولید شده از آلیاژ $\text{Co}_{17}\text{O}_{20}\text{Si}_5\text{Fe}_4\text{Mo}$



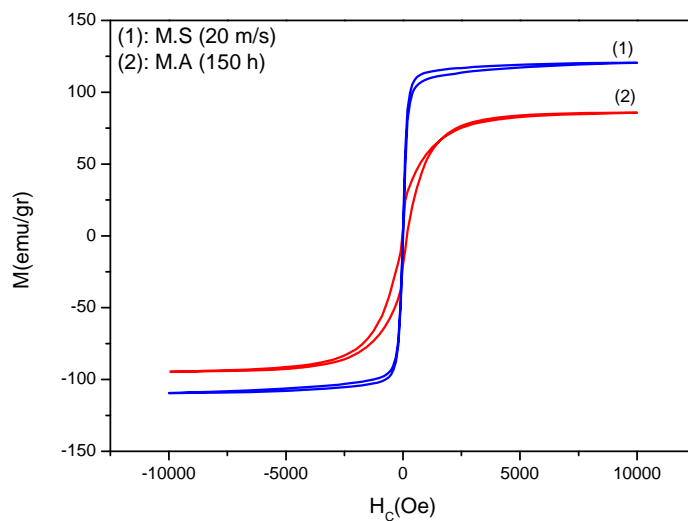
شکل ۷- منحنی پسماند مغناطیسی نوار تولیدی با سرعت‌های: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰ متر بر ثانیه

مذاب‌ریسی با دیسک مبرد را در سرعت‌های متفاوت دیسک چرخان نشان می‌دهد. نوارهای تولیدی در سرعت‌های متفاوت، کاملاً به ساختار آمورف تبدیل شده‌اند. برای اطمینان از تشکیل

مغناطش و نیروی پسماندزدا در سرعت‌های متفاوت دیسک چرخان، به‌نظر می‌رسد نوارها دارای ساختار یکسان باشند. شکل ۱۰ الگوهای پراش پرتو ایکس نوارهای تولیدی به‌روش



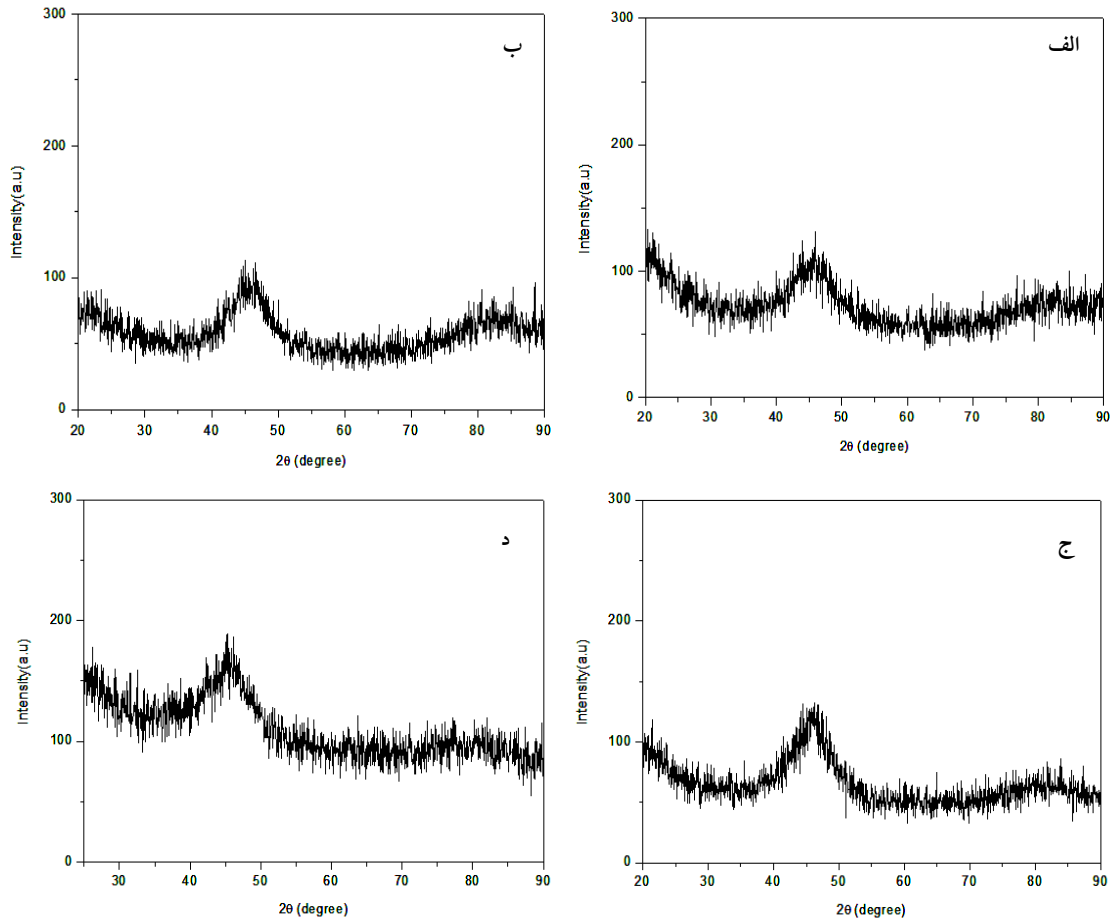
شکل ۸- مقادیر مغناطش اشباع و نیروی پسماندزدا برای ترکیب $C_{0.7}B_{2.0}Si_5Fe_4Mo_1$ تولید شده به روش مذاب‌ریسی با دیسک مبرد بر حسب سرعت دیسک چرخان



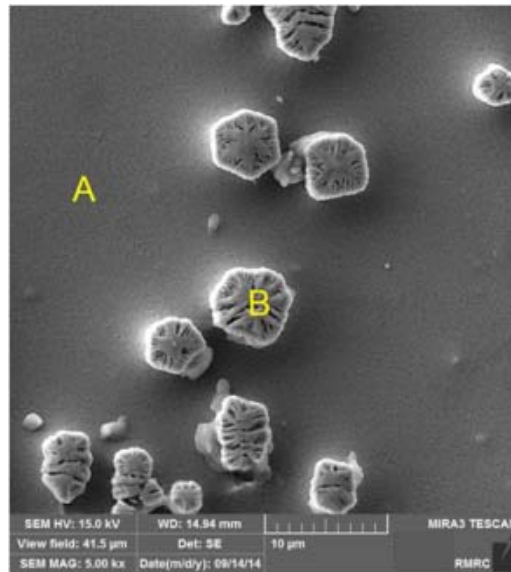
شکل ۹- منحنی‌های پسماند مغناطیسی مربوط به آلیاژ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی به مدت: (۱) ۱۵۰ ساعت و (۲) آلیاژ تولیدی به روش مذاب‌ریسی با دیسک مبرد با سرعت دیسک ۲۰ متر بر ثانیه

را در سرعت‌های متفاوت دیسک چرخان نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در شکل ۱۱، حضور رسوبات بلوری در نوار تولید شده با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه است. این در حالی است که در الگوی پراش پرتو ایکس این نوار، هیچ‌گونه فاز بلوری تشخیص

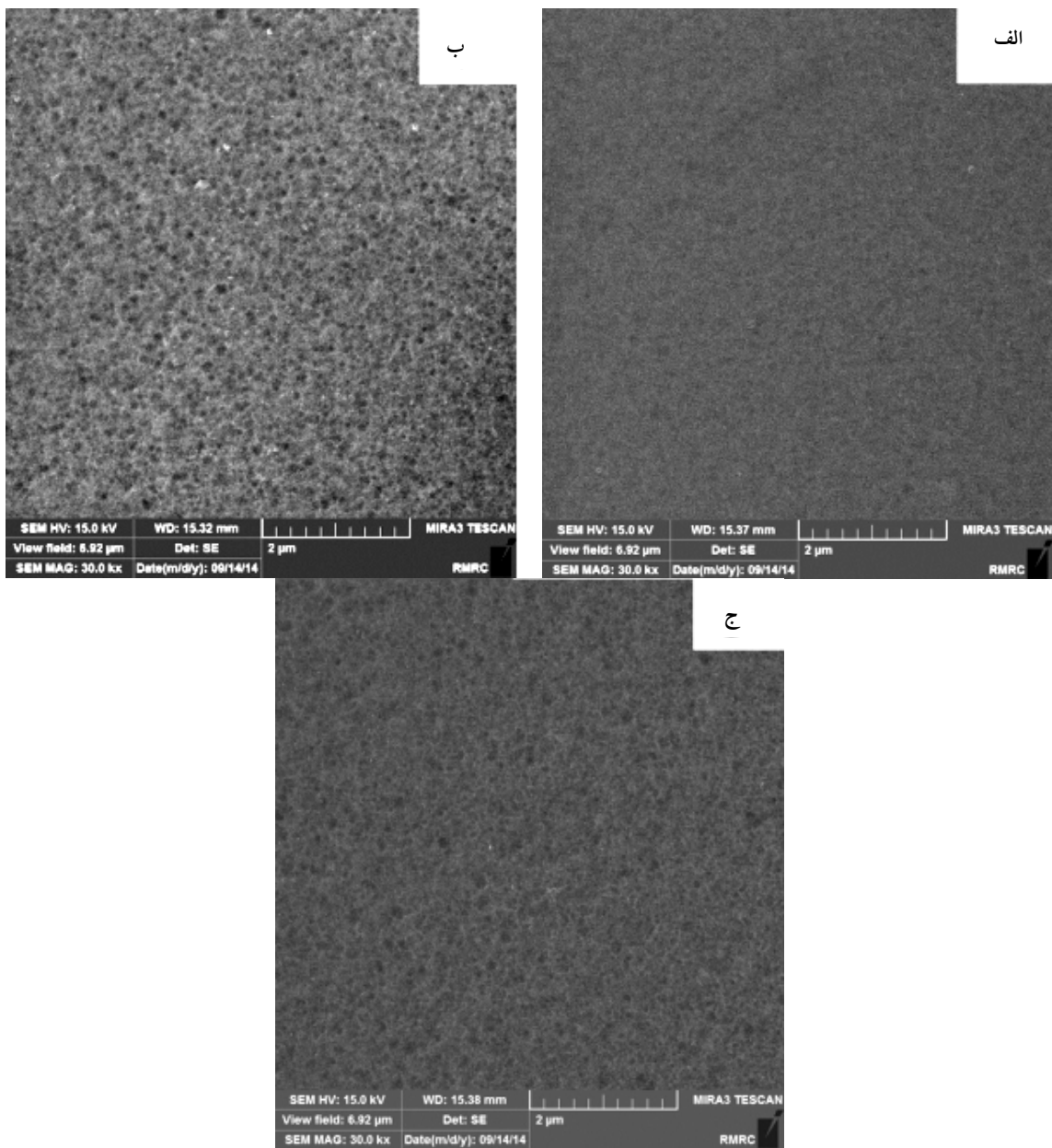
فاز آمورف در ۱۰۰ درصد از ساختار، تصمیم بر آن شد تا نوارهای تولیدی ابتدا حکاکی شده و سپس ریزساختار آن، توسط میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی بررسی شود. شکل ۱۱ و ۱۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نوارهای تولیدی



شکل ۱۰- الگوی پراش پرتو ایکس نوار تولید شده به روش مذاب‌ریسی با سرعت‌های: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰ متر بر ثانیه



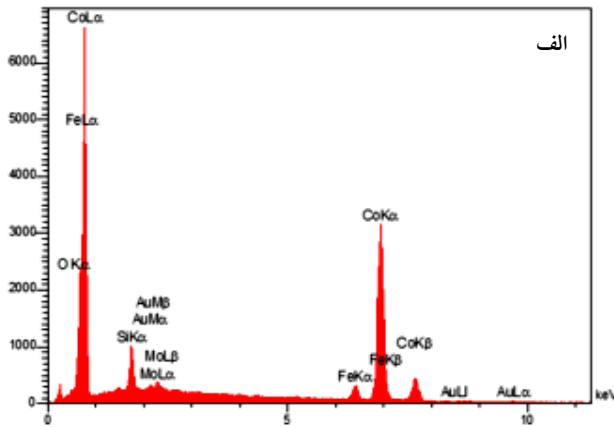
شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نوار تولید شده با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



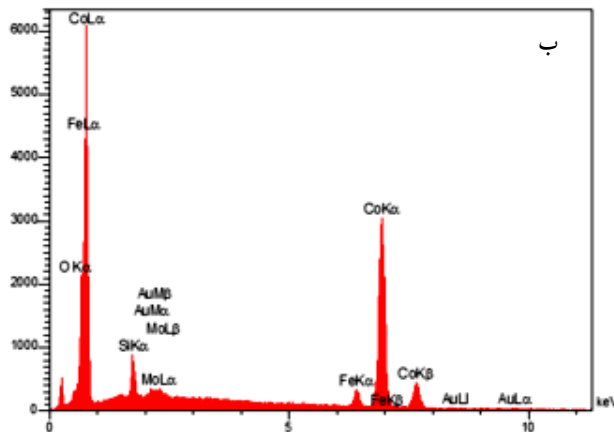
شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نوار تولید شده با سرعت: الف) ۲۰ متر بر ثانیه،
ب) ۳۰ متر بر ثانیه و ج) ۴۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۳ ارائه شده است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد هیچ‌گونه اختلافی در ترکیب شیمیایی زمینه و رسوبات وجود ندارد [۱۵]. به نظر می‌رسد سرعت ۱۰ متر بر ثانیه برای انجام فرایند انجماد سریع کافی نباشد و جوانه‌زنی و رشد فازهای بلوری را به دنبال داشته است، لذا حداقل سرعت مورد نیاز برای

داده نشد. از لحاظ کیفیت ظاهری نیز نمونه‌های حاصل در این سرعت حرکت دیسک، نسبت به سایر نوارها متفاوت بوده و انعطاف‌پذیری کمتری را از خود نشان می‌داد. به منظور شناسایی ماهیت این رسوبات، آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی برای دو نقطه A و B (مطابق شکل ۱۱) انجام شد که نتایج این آزمون



عنصر	کبالت	آهن	مولیبدن	بور	سیلیسیوم	طلا	اکسیژن
درصد اتمی	۶۸٫۵	۳٫۷	۱٫۶	۲۰٫۵	۲٫۵	۲٫۶	۰٫۶



عنصر	کبالت	آهن	مولیبدن	بور	سیلیسیوم	طلا	اکسیژن
درصد اتمی	۶۹٫۱	۴٫۱	۱٫۴	۱۷٫۳	۱٫۹	۴٫۹	۱٫۳

شکل ۱۳- آزمون طیفسنجی تفکیک انرژی: الف) زمینه آمورف (نقطه A در شکل ۱۱)، ب) رسوبات برفکی شکل (نقطه B در شکل ۱۱)

بور و کاهش درصد سیلیسیوم، خواص مغناطیسی بهبود می‌یابد. وجه تمایز ترکیبات تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی از دیدگاه خواص مغناطیسی این است که افزایش زمان آسیاکاری باعث افت خواص مغناطیسی در ترکیبات شده است. این امر به احتمال زیاد به دلیل تشکیل فازهای جدید، زیاد شدن چگالی نابجایی‌ها، کاهش اندازه ذرات و دانه‌های پودری، افزایش سطح مرز دانه‌ها و افزایش احتمال حضور

آلیاژ $Co_{70}B_{20}Si_3Fe_4Mo_1$ سرعت‌های بالاتر از ۱۰ متر بر ثانیه است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به نوارهای تولیدی با سرعت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که ساختار به‌طور کامل آمورف شده است.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج آزمون مغناطوسنج ارتعاشی نشان می‌دهد با افزایش درصد

شد. نتایج نشان می‌دهد روش مذاب‌ریسی با دیسک میرد منجر به تولید ماده با خواص مغناطیسی مناسب‌تری می‌گردد.

ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها بر اثر افزایش زمان آسیاکاری است. این عوامل حرکت آسان دیواره حوزة‌های مغناطیسی را با مشکل مواجه کرده و موجب افت خواص مغناطیسی خواهند

واژه‌نامه

1. crystallization
2. bulk metallic glasses (BMGs)
3. glove box
4. chill block melt spinning
5. vibrating sample magnetometer
6. x-ray diffraction
7. scanning electron microscopy

مراجع

1. Chiriac, H., Moga, A-E., Urse, M., Necula, F., and Hison, C., "On the Amorphization and Magnetic Properties of Co-Fe-Si-B Powders", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 250-252, pp. 766-770, 1999.
2. Buttino, G., Cecchetti, A., and Poppi, M., "Temperature Dependence of Structural and Magnetic Relaxation in Amorphous and Nanocrystalline Co-Based Alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 241, pp. 183-189, 2002.
3. Szewieczek, D., Tyrlik-Held, J., and Lesz, S., "Changes of Mechanical Properties and Fracture Morphology of Amorphous Tapes Involved by Heat Treatment", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 190-195, 2001.
4. Kwapulinski, P., Rasek, J., Stoklosa, Z., and Haneczok, G., "Magnetic Properties of Amorphous and Nanocrystalline Alloys Based on Iron", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157-158, pp. 735-742, 2004.
5. Byun, T. Y., Oh, Y., Yoon, C. S., and Kim, C. K., "Crystallization and Magnetic Properties of $(Co_{0.75}Cr_{0.25})_{80}Si_5B_{15}$ Metallic Glass", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 368, pp. 283-286, 2004.
6. Szewieczek, D., Tyrlik-Held, J., and Lesz, S., "Changes of Mechanical Properties and Fracture Morphology of Amorphous Tapes Involved by Heat Treatment", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 190-195, 2001.
7. Szewieczek, D., and Lesz, S., "Influence of Structure on Magnetic and Mechanical Properties of Amorphous and Nanocrystalline $Fe_{85.4}Hf_{1.4}B_{13.2}$ Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 254-259, 2005.
8. Lesz, S., Szewczyk, R., Szewieczek, D., and Bienkowski, A., "The Structure and Magnetoelastic Properties of the Fe-Based Amorphous Alloy with HF Addition", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol., 157-158, pp.743-748, 2004.
9. Voropaeva, L., Gurov, A., Stelmukh, V., Novokhatskaya, N., and Serebryakov, A., "Medium-Range Ordering and Crystallization of Co-Si-B Based Alloys with Fe Additions", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 192-193, pp. 153-156, 1995.
10. Stelmukh, V., Gurov, A., Voropaeva, L., Novokhatskaya, N., and Serebryakov, A., "Nanocrystallization of Amorphous Co-Si-B Alloys with Strong Compound Forming Additions", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 192-193, pp. 570-573, 1995.
11. Stoklosa, Z., Rasek, J., Kwapulinski, P., Haneczok, G., Bzdura, G., and Lelatko, J., "Optimization of Soft Magnetic Properties in Nanoperm Type Alloys", *Material Science and Engineering C*, Vol. 23, pp. 49-53, 2003.
12. Lesz, S., Nowosielski, R., Zajdel, A., Kostrubiec, B., and Stoklosa, Z., "Investigations of Crystallization Behaviour of $Co_{80}Si_9B_{11}$ Amorphous Alloy", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 28, pp. 91-97, 2007.
13. Gloriant, T., Surinach, S., and Baró, M. D., "Stability and Crystallization of Fe-Co-Nb-B Amorphous Alloys", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 333, pp. 320-326, 2004.
14. Nowosielski, R., and Witrak, A., "Formation and Structure of $Co_{50}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6$ Bulk Metallic Glasses", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 36, pp. 28-33, 2009.
15. Jaffari Jezeh, M. R., Tavoosi, M., Ghasemi, A., and Farshadnia, R., "Metastable Phases in $Co_{70}B_{20}Si_5Fe_4Mo_1$ Alloy Fabricated by Non-Equilibrium Processes", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 427, pp. 26-33, 2015.