

ساخت نانوبلورهای فریت کبالت با بازپخت بین فلزی Co-Fe آلیاژسازی شده و مطالعه رفتار مغناطیسی آن

محسن حکیمی^{۱*}، پرویز کاملی^۲، باقر اصلی بیکی^۳ و علی فقیه^۲

۱- آزمایشگاه تحقیقات و فناوری مغناطیس، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

۲- آزمایشگاه ابررسانایی و مغناطیس، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jame.35.4.83

چکیده - در این پژوهش نانوبلورهای فریت کبالت از بازپخت ترکیب آلیاژی Co-Fe حاصل از آسیاب کاری در اتمسفر هوا به دست آمد. تاثیر دمای بازپخت بر تشکیل فاز فریت کبالت و ویژگی های ساختاری و مغناطیسی محصول مورد مطالعه قرار گرفت. فاز یابی نمونه بازپخت شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد نشان داد که حدود ۴۶ درصد وزنی نمونه به فریت کبالت CoFe_2O_4 تبدیل شده است. این میزان در نمونه های بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد به ترتیب به ۹۵ و ۹۰ درصد می رسد. کاهش مغناطش اشباع نمونه با بازپخت به تبدیل فاز Co-Fe به فریت کبالت ارتباط داده شد. اثر اندازه دانه ها و کم شدن نسبت سطح به حجم منجر به یک افزایش در مغناطش اشباع نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به نمونه ۸۰۰ درجه سانتی گراد شده است. بیشترین وادارندگی در نمونه بازپخت شده در ۸۰۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد که کوچک بودن اندازه بلورکها در این نمونه دلیل اصلی این افزایش نسبی است.

واژگان کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، فریت کبالت، وادارندگی، نانوبلور

Preparation of Cobalt Ferrite Nanocrystallites by Annealing of Alloyed Intermetallic Co-Fe and Study of Magnetic Behavior

M. Hakimi^{1*}, P. Kameli², B. Aslibeiki³ and A. Faqeeh²

1- Research and Technology of Magnetism Laboratory, Faculty of Physics, University of Yazd, Yazd, Iran.

2- Laboratory of Superconductivity and Magnetism, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: hakimi.m@yazd.ac.ir

Abstract: In this work, cobalt ferrite nanocrystallites were synthesized by air annealing of milled Co-Fe compound. Effect of annealing temperature on phase formation of cobalt ferrite and structural and magnetic properties of the product was studied. Analysis of annealed sample in 450 °C showed that around 46 weight percent of the specimen was changed to Co₂FeO₄. This value increased to 95 and 90% for 800 °C and 900 °C annealed samples respectively. Reduction of saturation magnetization under annealing was related to transformation of Co-Fe to cobalt ferrite. Increasing the value of saturation magnetization in 900 °C annealed sample compared to 800 °C one was attributed to decreased surface to volume ratio and crystallite size. The main reason of occurrence of maximum coercivity in 800 °C annealed sample was its low crystallite size.

Keywords: Mechanical alloying, Cobalt ferrite, Coercivity, Nanocrystallite

۱- مقدمه

اولیه استفاده شده از دسته هیدروکسیدها و کربنات‌های کبالت و آهن هستند [۱۱]. طبق دانش نویسندگان این مقاله تاکنون از فرایند آسیاب کاری پودرهای فلزی برای تولید فریت کبالت استفاده نشده است.

در این پژوهش نانوبلورهای فریت کبالت از بازپخت ترکیب آلیاژی Co-Fe که از فرایند آسیاب کاری پودرهای فلزی Co و Fe حاصل شده است به دست آمد و تاثیر دمای بازپخت بر تشکیل فاز فریت کبالت و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی محصول مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

نمونه‌های CoFe₂ با ۱۵ ساعت آسیاب پودرهای فلزی خالص کبالت و آهن به دست آمدند. به این منظور از آسیاب سیاره‌ای انرژی بالا با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه استفاده شد. پودرهای فلزی اولیه با استوکیومتری مناسب به همراه تعدادی گلوله فولادی با نسبت وزنی یک به ده داخل کاپ‌های مربوطه ریخته شد و برای مدت زمان‌های مختلف ۱، ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت تحت فرایند آسیاب کاری قرار گرفت. در ادامه از نمونه ۱۵ ساعت آسیاب شده تحت اتمسفر هوا آزمون گرمایی مشتقی (DTA) گرفته شد. سپس این نمونه به مدت ۶ ساعت در اتمسفر هوا در سه دمای مختلف ۴۵۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بازپخت شد. آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بر نمونه‌ها انجام گرفت. به منظور تحلیل داده‌های XRD و بررسی نظم بلوری با کمک نرم‌افزار FullProf آزمون ریتولد انجام گرفت. اندازه بلورک‌ها با استفاده از رابطه شرر محاسبه شد. همچنین از نمونه‌ها تصویر SEM گرفته شد. حلقه پسماند

در سال‌های اخیر توجه زیادی به نانوذرات اکسیدهای فلزی معطوف شده است. وجود ویژگی‌های غیرمعمول نوری، الکتریکی و مغناطیسی در این مواد که اغلب با اندازه ذرات ماده متغیر است از جمله دلایل این جذابیت است. فریت کبالت (CoFe₂O₄) با وادارندگی بزرگ و مغناطش اشباع متوسط یکی از این ترکیبات اکسیدی است که به‌عنوان یک ماده سخت مغناطیسی شناخته شده است. ثابت ناهمسان‌گردی (K₁) آن 290 kJ/m³ و دمای کوری این ماده در حالت حجمی برابر با ۵۱۷ درجه سانتی‌گراد است. این ویژگی‌ها در کنار پایداری بالای فیزیکی و شیمیایی این ترکیب باعث شده که این ترکیب در کاربردهای ضبط مغناطیسی از جمله نوارهای ویدئویی و دیسک‌های حافظه مورد استفاده قرار گیرد [۱، ۲]. مشخصات مغناطیسی ذرات فریت کبالت به طور موثری به اندازه ذرات، شکل آنها و خلوص ماده وابسته است. بر این اساس روش‌های متعددی برای ساخت این مواد مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه روش‌های هیدروترمال [۳] سل ژل [۴] هم‌رسوبی [۵] کاهش فراصوتی [۶] و واکنش حالت جامد [۷] را می‌توان نام برد.

آلیاژ سازی مکانیکی روشی کارآمد در ساخت ترکیبات بین فلزی به‌شمار می‌رود. هم‌چنین گزارش‌های متعددی برای استفاده از این روش برای ساخت ترکیبات اکسیدی وجود دارد [۸]. هرچند گزارش‌های مختلفی برای تولید ترکیبات فریت‌های منگنز و کبالت با روش‌های ترکیبی مکانیکی - شیمیایی وجود دارد [۹، ۱۰] اما تولید ترکیبات فریتی با روش مستقیم آلیاژ سازی مکانیکی بسیار محدود است. در این موارد نیز مواد

مغناطیسی نمونه‌ها نیز با استفاده از یک دستگاه مغناطیس‌سنج VSM با بزرگی میدان دو تسلا اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

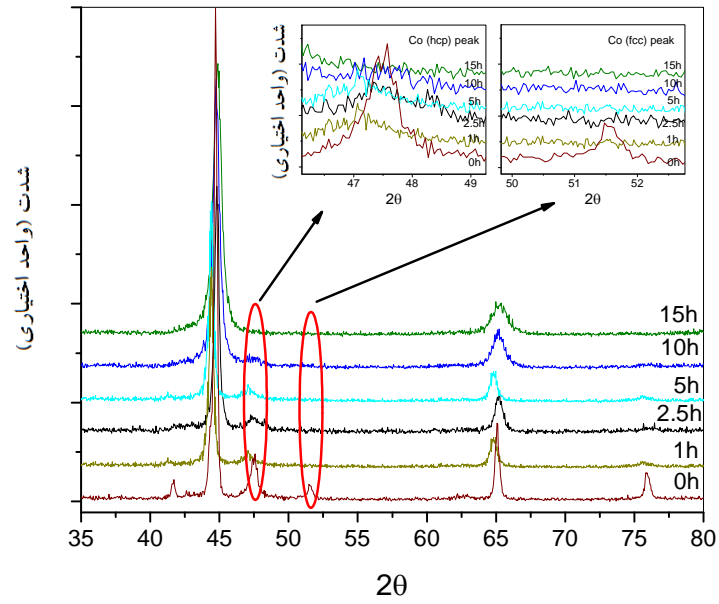
شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های حاصل از آسیاب کبالت و آهن با نسبت مولی یک به دو پس از ۰، ۱، ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت آسیاب‌کاری را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان آسیاب‌کاری از شدت تعدادی از قله‌های مواد اولیه کاسته می‌شود و قله‌های مربوط به فاز مکعبی نهایی باقی می‌ماند. نکته‌ای که قابل توجه است اینکه کبالت اولیه در دو ساختار Fcc و hcp موجود است. فاز Fcc ناپایدار است و در همان ساعت اولیه آسیاب‌کاری حذف می‌شود، اما حذف فاز با ساختار hcp به مدت زمان بیش‌تری نیاز دارد و قله مربوطه پس از ۱۰ ساعت آسیاب‌کاری هنوز هم در نمونه وجود دارد. تغییرات این دو قله در مقیاسی بزرگ‌تر در الحاقی شکل نشان داده شده است. آزمون کمی XRD نمونه ۱۵ ساعت آسیاب شده نشان می‌دهد که فاز غالب در این نمونه ترکیب CoFe_2 با ساختار مکعبی (گروه فضایی Pm-3m) با متغیر شبکه $0/2842$ نانومتر است. با این وجود طیفی از ترکیبات بین آهن خالص با متغیر شبکه $0/2867$ نانومتر تا نمونه $\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$ با متغیر شبکه $0/2857$ نانومتر و ساختار بلوری مشابه در ترکیب نیز می‌تواند وجود داشته باشد.

شکل ۲ تصاویر SEM نمونه‌های ۰، ۲/۵، ۵ و ۱۵ ساعت آسیاب‌کاری شده را نشان می‌دهد. در نمونه قبل از آسیاب دو ماده کبالت و آهن قابل تشخیص است. در نمونه ۲/۵ ساعت آسیاب شده بر اثر ضربه‌های حاصل از برخورد گلوله‌ها به یکدیگر و به دیواره آسیاب ذرات بزرگی ایجاد شده که ناشی از حل شدن اولیه دو ماده در هم است. در نمونه ۵ ساعت آسیاب شده ذرات همگن تر شده‌اند و در نمونه ۱۵ ساعت بر اثر برخورد گلوله‌ها ذرات شکسته شده‌اند و همگنی کاهش یافته است و از اندازه ذرات کاسته

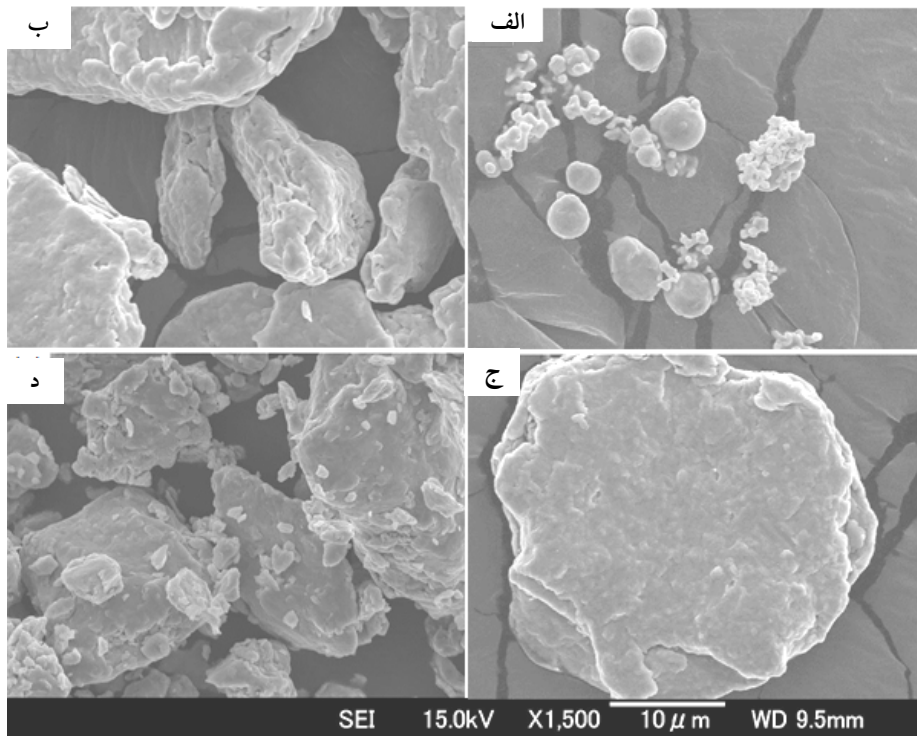
شده است.

به منظور تعیین دمای اکسید شدن نمونه، آنالیز حرارتی در اتمسفر هوا بر روی نمونه انجام شد. شکل ۳ منحنی DTA نمونه ۱۵ ساعت آسیاب کاری شده که در دو روند گرم شدن و سرد شدن اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در منحنی گرم شدن یک دره پهن دیده می‌شود که از حدود 300 درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و در 500 درجه سانتی‌گراد به کمینه خود می‌رسد. وجود چنین دره‌ای معین کننده رخداد فرایندی گرماگیر است. از آنجا که این اندازه‌گیری در اتمسفر هوا انجام شده است. این رفتار را می‌توان به اکسید شدن نمونه و تشکیل فازهای جدید نسبت داد. بر این اساس سه دمای 450 ، 800 و 900 درجه سانتی‌گراد برای بازپخت نمونه و بررسی امکان تشکیل فاز فریت کبالت انتخاب شد.

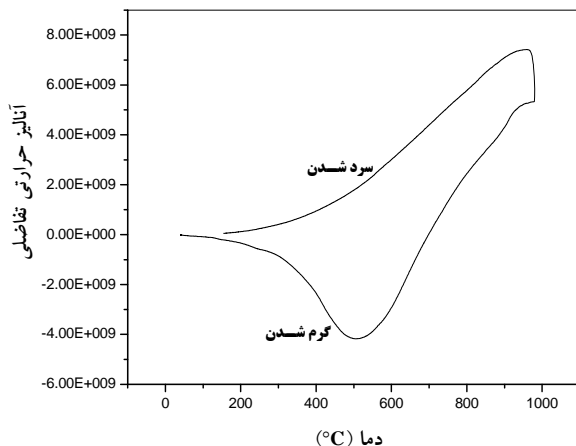
منحنی پراش نمونه‌های بازپختی و نمونه قبل از بازپخت در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. در نمونه بازپخت شده در دمای 450 درجه سانتی‌گراد قله‌های مربوط به نمونه قبل از بازپخت کوچک شده، فاز جدیدی شکل گرفته است. این فاز در دو نمونه بازپخت شده در دماهای بالاتر فاز غالب را تشکیل می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر ساختار، تحلیل ریتولد بر این طیف‌ها انجام گرفت که به‌عنوان مثال نتایج این آزمون برای نمونه بازپخت شده در دمای 800 درجه سانتی‌گراد در شکل ۵ نشان داده شده است. داده‌های تجربی طیف XRD، طیف محاسباتی تطبیق داده شده توسط نرم‌افزار ریتولد، تفاضل دو الگوی تجربی و محاسباتی و هم‌چنین قله‌های براگ در شکل نمایش داده شده است. در ادامه نتایج حاصل از پراش پرتو X به‌طور مبسوط توضیح داده می‌شود. نمونه بازپخت شده در دمای 450 درجه سانتی‌گراد با چهار فاز مختلف تطبیق داده شد. این فازها عبارت از 46% وزنی ترکیب CoFe_2O_4 با ساختار مکعبی (گروه فضایی Fd-3m) و متغیر شبکه $0/8392$ نانومتر، 37% درصد وزنی ترکیب CoFe با ساختار مکعبی (گروه فضایی Pm-3m) و متغیر شبکه



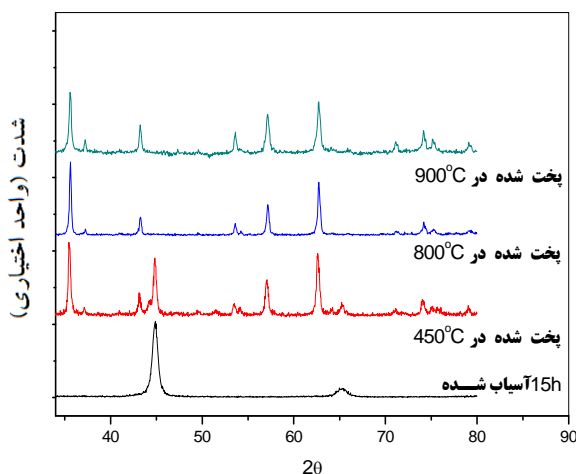
شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های آسیاب کاری شده در زمان های مختلف (تصویر الحاقی مربوط به تغییرات قله های مربوط به فاز کبالت با ساختار Fcc و hcp با زمان آسیاب کاری)



شکل ۲- تصاویر SEM نمونه های الف (الف)، ب (ب)، ج (ج) و د (د) ۱۵ ساعت آسیاب کاری شده



شکل ۳- منحنی DTA نمونه ۱۵ ساعت آسیاب کاری شده در دو روند گرم شدن و سرد شدن



شکل ۴- مقایسه پراش پرتو x نمونه های قبل و بعد از بازپخت در دماهای مختلف

اشباع است. در واقع عناصر آهن و کبالت دارای مغناطش اشباع بالاتری نسبت به فریت کبالت‌اند و با آلیاژ سازی این دو عنصر و ترکیب آن‌ها با اکسیژن و تشکیل فاز فریت اسپینلی کبالت، مغناطش اشباع نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اندازه دانه‌های بلوری و متغیر شبکه نیز روی مغناطش اشباع نمونه‌ها تاثیر می‌گذارد. همان‌طور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر مغناطش اشباع دو نمونه

۰/۲۸۵۷ نانومتر، ۱۰ درصد وزنی کبالت مکعبی (گروه فضایی Fm-3m) و متغیر شبکه ۰/۳۵۴۴ نانومتر و ۸ درصد وزنی آهن رومبوهیدرال (گروه فضایی R-3c) و متغیر شبکه‌های ۰/۵۰۳۲ a و ۰/۳۷۳۳ c نانومتر هستند. آزمون‌ها هم‌چنین نشان داد دو نمونه بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز تک‌فاز نیستند. فاز اصلی این دو نمونه فریت کبالت است و به ترتیب حاوی ۵ و ۱۰ درصد ترکیب اکسید آهن هماتیت $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ هستند. متغیر شبکه فریت کبالت در نمونه ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً برابر است (۰/۸۳۸۸ نانومتر) اما این متغیر در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ناچیزی بزرگ‌تر شده است (۰/۸۳۹۱ نانومتر). در مقابل کشیدگی سلول شبکه اکسید آهن در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشابه نمونه ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است (c/a=۲/۷۴۰) ولی در نمونه ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سلول در راستای محور c فشرده شده است (c/a=۲/۷۲۰). اندازه بلورک‌های مربوط به فاز فریت کبالت که از رابطه شرر محاسبه شد برای نمونه‌های بازپخت شده در ۹۰۰، ۸۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۴۵ و ۳۹ و ۵۵ نانومتر به دست آمد و اندازه بلورک‌های مربوط به فاز CoFe_2 نمونه بازپخت شده در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز ۳۹ نانومتر حاصل شد.

به‌منظور مطالعه ویژگی‌های مغناطیسی از نمونه حاصل از آسیاب کاری و هم‌چنین دو نمونه بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمون مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) گرفته شد. حلقه پسماند این سه نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که بر اثر بازپخت مقدار مغناطش اشباع کاهش و وادارندگی نمونه افزایش یافته است. مقادیر کمی سه متغیر مغناطش اشباع، وادارندگی و باقی‌ماندگی نمونه‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

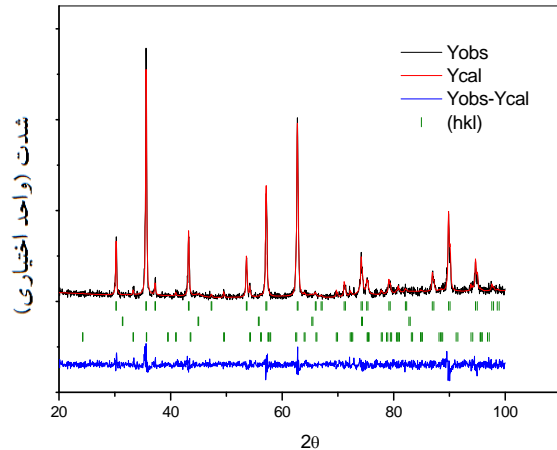
در رابطه با نمونه بازپخت نشده، خاصیت مغناطیسی قوی ترکیبات بین فلزی Co-Fe دلیل مقدار بزرگ مغناطش

جدول ۱- مقادیر کمی سه متغیر مغناطش اشباع، وادارندگی و باقی ماندگی نمونه های مختلف

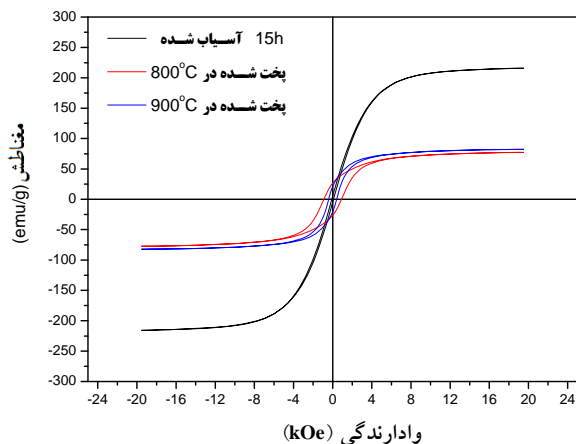
نمونه	مغناطش اشباع (emu/g)	باقی ماندگی (emu/g)	وادارندگی (Oe)
۱۵ ساعت آسیاب شده	۲۰۲	۶	۹۹
بازپخت شده در ۸۰۰°C	۶۴	۲۷	۹۲۵
بازپخت شده در ۹۰۰°C	۷۴	۲۱	۴۱۲

بزرگ تر بودن اندازه دانه های این نمونه است. از طرف دیگر با توجه به این که درصد فریت کبالت در نمونه ۸۰۰ درجه سانتی گراد بیش تر از نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد است، این مساله نیز به بزرگتر بودن مغناطش اشباع نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد کمک می کند.

نکته مهم تری که از اندازه گیری منحنی پسماند نمونه ها به دست آمد مربوط به تفاوت میدان وادارندگی نمونه هاست. وادارندگی تقریباً بزرگ ۹۲۵ Oe در حلقه پسماند نمونه ۸۰۰ درجه سانتی گراد و سپس کاهش آن به مقدار ۴۱۲ Oe در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد هم خوانی نزدیکی با نتایج مربوط به پژوهش انجام شده توسط ماز و همکارانش [۱۲] دارد. نویسندگان این گزارش میدان وادارندگی نانوذرات فریت کبالت با اندازه ۲۵ نانومتر را برابر ۱۲۰۰ Oe به دست آوردند و نشان دادند که با افزایش اندازه دانه تا ۴۵ نانومتر مقدار وادارندگی تا ۲۰۰ Oe کاهش می یابد. نتایج آن ها نشان داد که بیشینه مقدار وادارندگی در ذرات ۲۸ نانومتر دیده می شود که این عدد حد تک حوزه شدن فریت کبالت با روش سنتز آنها بود. بنابراین می توان اینطور نتیجه گرفت که در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد اندازه نانوبلورک ها از حد تک حوزه عبور کرده، با افزایش دمای ساخت، مقدار وادارندگی این نمونه کاهش یافته است. با توجه به اندازه بلورک های به دست آمده از رابطه شرر و نتایج منحنی های



شکل ۵- آزمون ریتولد نمونه بازپخت شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد (منحنی مشکی رنگ داده های تجربی، منحنی قرمز رنگ داده های نظری، خطوط عمودی قله های براگ و منحنی زیر خطوط عمودی تفاضل داده های تجربی و طیف نظری را نشان می دهد).



شکل ۶- حلقه پسماند مغناطیسی نمونه ۱۵ ساعت آسیاب شده و دو نمونه بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد

۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد باهم متفاوت است و نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد مغناطش اشباع بزرگ تری نسبت به نمونه ۸۰۰ درجه سانتی گراد دارد. پژوهش ها نشان می دهد که در نانوذرات مغناطیسی، با افزایش اندازه ذره و کاهش نسبت سطح به حجم مقدار مغناطش اشباع افزایش می یابد. از این رو دلیل اصلی بزرگ تر بودن مغناطش اشباع نمونه ۹۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به نمونه ۸۰۰ درجه سانتی گراد

نشان داد دو نمونه بازپخت شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز تک‌فاز نیستند. فاز اصلی این دو نمونه فریت کبالت است و به ترتیب حاوی ۵ و ۱۰ درصد ترکیب اکسید آهن هماتیت $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ هستند. مغناطش اشباع نمونه با بازپخت کاهش می‌یابد که ناشی از تبدیل فاز Co-Fe به فریت کبالت است. اثر اندازه دانه‌ها و کم شدن نسبت سطح به حجم در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند دلیل قوی‌تری برای افزایش مغناطش نسبت به نمونه ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. نکته دیگر پهن شدن حلقه پسماند در نمونه ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و کم شدن مجدد پهنای در نمونه ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است. گذار از حد تک حوزه شدن و ابعاد نانومتری بلورک‌های فریت کبالت دو عامل اصلی رفتار میدان وادارندگی در نمونه‌ها هستند.

پسماند مغناطیسی می‌توان تخمین زد که نانوذرات فریت کبالت تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی در این پژوهش تک حوزه نیستند.

۴- نتیجه‌گیری

نانوبلورهای فریت کبالت از بازپخت ترکیب آلیاژی Co-Fe که از فرایند آسیاب‌کاری پودرهای فلزی Co و Fe حاصل شده است، به دست آمد. آزمون کمی XRD نمونه ۱۵ ساعت آسیاب شده نشان می‌دهد که فاز غالب در این نمونه ترکیب CoFe_2 با ساختار مکعبی (گروه فضایی Pm-3m) با متغیر شبکه $0/2842$ نانومتر است. نمونه بازپخت شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد با چهار فاز مختلف CoFe ، CoFe_2O_4 ، کبالت مکعبی و آهن خالص رومبوئیدرال تطبیق داده شد. آزمون‌ها هم‌چنین

مراجع

- Pallai, V., and Shah, D., O., "Synthesis of high-coercivity cobalt ferrite particles using water-in-oil microemulsions", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 163, pp. 243-248, 1996.
- Skomski, R., "Nanomagnetics", *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 15, pp. R1-R56, 2003.
- Gong, Y. X., Zhen, L., Jiang, J. T., Xu, C. Y., and Shao W. Z., "Synthesis and microwave Electromagnetic Properties of CoFe Alloy Nanoflakes Prepared with Hydrogen-Thermal Reduction Method", *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, pp. 064302-064303, 2009.
- Schleich, D. M., and Zhang, Y., "Preparation of some Metal Ferrite MFe_2O_4 Thin Films through a Nonaqueous Sol Method", *Materials Research Bulletin*, Vol. 30, pp. 447-452, 1995.
- Yaseneva, P., Bowker, M., and Hutchings, G., "Structural and Magnetic Properties of Zn-Substituted Cobalt Ferrites Prepared by Co-Precipitation Method", *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 13, pp. 18609-18614, 2011.
- Mohan, M., Chandra, V., and Manoharan, S. S., "A New Nano CoFe_2 Alloy Precursor for Cobalt Ferrite Production via Sonoreduction Process", *Current Science*, Vol. 94, pp. 25-28, 2008.
- Berbenni, V., Milanese, C., Bruni, G., Girella, A., and Marini, A., "Mechanochemical Solid-state Synthesis of Cobalt(II) Ferrite and Determination of its Heat Capacity by MTDSC", *Z. Naturforsch*, Vol. 65b, pp. 1434-1438, 2010.
- Sherif, E. E. M., "Mechanical Alloying: Nanotechnology", *Materials Science and Powder Metallurgy*, Elsevier, 2015.
- Bėčytė, V., Mažeika, K., Rakickas, T., and Pakštas, V., "Study of Magnetic and Structural Properties of Cobalt-Manganese Ferrite Nanoparticles Obtained by Mechanochemical Synthesis" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 172, pp. 6-101, 2016.
- Velinov, N., Dimitrov, D., Koleva, K., Ivanov, K., and Mitov, I., "Mechanochemical Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Copper-Cobalt Ferrites" *Acta Metallurgica Sinica*, Vol. 28(3), pp. 367-372, 2015.
- Manova, E. Kunev, B. Paneva, D. Mitov, I. Petrov, L. Estournès, C., D'Orléan, C., Rehspringer, J.L., and Kurmoo, M., "Mechano-Synthesis, Characterization, and Magnetic Properties of Nanoparticles of Cobalt Ferrite, CoFe_2O_4 ", *Chemistry of Materials*, Vol. 16 (26), pp 5689-5696, 2004.
- Maaz, K., Mumtaz, A. S., Hasanain, K., and Ceylan, A., "Synthesis and Magnetic Properties of Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) Nanoparticles Prepared by Wet Chemical Route", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 308, pp. 289-295, 2007.