

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و
انتخاب مواد

بررسی مکانیزم شکل‌گیری ساختار نانو و خواص مغناطیسی آلیاژ
نانو کریستالین $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی

مؤلف:

حسن احمدیان باغبادرانی

استاد راهنما:

دکتر شهریار شرفی

استاد مشاور:

مهندس فاطمه بقایی

بهمن ماه ۱۳۹۰



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مواد و متالورژی

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: حسن احمدیان باغبادرانی

استاد راهنما: دکتر شهریار شرفی

استاد مشاور: مهندس فاطمه بقایی

داور ۱: آقای دکتر مرتضی زند رحیمی

داور ۲: آقای دکتر غلامحسین اکبری

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: آقای دکتر غلام رضا خیاطی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: خانم دکتر مریم احتشامزاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

پدر دلسوز و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی :

حمد و سپاس بی کران پروردگار یکتا را که آگاه ساخت ما را بر بی آگاهی خویشتن و سپس آموختمان، آموختن را ...

اکنون که به یاری خداوند متعال این رساله به پایان رسیده است، بر خود لازم می دانم نهایت سپاس و امتنان خود را نثار تمام عزیزانی که به من مجال آموختن دادند، نمایم؛

خانواده عزیزم که تمام آموزه هایم در بستر محبت و توجه آنها بالیده است،

استاد فرهیخته و گرانقدرم، جناب آقای دکتر شهریار شرفی که در انجام این پایان نامه مرا از راهنمایی -

ها و حمایت های بی شائبه خویش بهره مند ساختند و اندرزهایشان همواره چراغ راه من بود،

جناب آقای مهندس مهدی دلشاد چرمهینی که مساعدت ها و راهنمایی هایشان بسیاری از ناهمواری ها را برایم هموار نمود،

همچنین از کارشناس های مرکز تحقیقات دانشگاه سرکار خانم مهندس فاطمه بقایی و خانم مهندس

اطهره دادگری نژاد به دلیل راهنمایی های تخصصی و انجام آنالیزهای موفق میکروسکوپی،

برای تمام این عزیزان سلامتی و توفیق روزافزون آرزومندم.

چکیده:

در این تحقیق، آلیاژ نانو ساختار $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ به روش آلیاژسازی مکانیکی در زمان های مختلف آسیاکاری تولید شد. مورفولوژی ذرات پودر، خواص میکروساختاری و خواص مغناطیسی نمونه ها به ترتیب توسط دستگاه های میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس و مغناطیس سنج ارتعاشی بررسی شدند. محلول جامد با ساختار مکعبی مرکز پر و ترتیب آلیاژ شدن کبالت ← نیکل ← آهن، با اندازه متوسط دانه ۱۵ نانومتر، بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری بدست آمد و با افزایش زمان آسیا اندازه دانه کاهش یافت. کمترین میزان اندازه دانه ($\sim 10\text{nm}$) بعد از ۳۵ ساعت آسیا حاصل شد. نشان داده شد که از میان پارامترهای متالورژیکی، سرعت آلیاژ شدن با غلظت اولیه عناصر و دماهای ذوب آنها هم خوانی بیشتری دارد. مکانیزم شکل گیری ساختار نانو در سیستم آلیاژی مذکور، در دو مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی بررسی شد. نتایج نشان داد هنگامیکه یکی از فرآیند های شکست یا جوش سرد در مقیاس ماکروسکوپی غالب بر دیگری بود، در مقیاس میکروسکوپی افزایش دانسیته نابجایی ها و شکل گیری مرز دانه هایی با زاویه کم روی داد (از صفر تا ۲ ساعت آسیا). با حصول حالت پایداری بین جوش سرد و شکست (از ۲ تا ۳۵ ساعت آسیاکاری)، مرز دانه های اصلی تشکیل شدند. همچنین ساختار لایه ای بعد از ۱۰ ساعت آسیاکاری شکل گرفت. با اعمال تغییر فرم پلاستیک بیشتر، فواصل بین لایه ها کاهش یافت و لایه ها حلقوی شدند. کمترین مقدار پارامتر شبکه (nm ۰/۲۸۵۱۲) بعد از ۲۰ ساعت آسیاکاری بدست آمد. مغناطش اشباع نیز بعد از ۲۰ ساعت آسیاکاری به علت تکمیل فرآیند آلیاژسازی از ۸۵ تا ۱۸۵ Am^2/kg افزایش یافت. نیروی مغناطیس زدا بعد از ۲ ساعت آسیاکاری به دلیل اثر دانه های ریز (مدل ناهمسانگردی تصادفی) از ۶۷ تا ۳۲ Oe، کاهش یافت.

کلید واژه: آلیاژسازی مکانیکی، آلیاژهای نانو ساختار، ریزساختار، خواص مغناطیسی

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه ...
۵	فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین
۶	۱-۲ فناوری نانو
۶	۱-۱-۲ مواد نانو ساختار
۹	۲-۱-۲ روش های کلی ساخت مواد نانو ساختار
۹	۲-۱-۳ تولید مواد نانو ساختار به روش آلیاژسازی مکانیکی
۱۰	۲-۱-۴ انواع آسیاب های مورد استفاده در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۱۱	۲-۱-۵ عوامل تأثیر گذار بر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۱۶	۲-۱-۶ مکانیزم آلیاژسازی مکانیکی
۲۰	۲-۱-۷ کاربردهای آلیاژسازی مکانیکی
۲۱	۲-۲ مغناطیس
۲۲	۲-۲-۱ منشأ خاصیت مغناطیسی مواد
۲۲	۲-۲-۲ انواع مواد مغناطیسی
۲۳	۲-۲-۳ مغناطش
۲۴	۲-۲-۴ هیستریزیس
۲۶	۲-۲-۵ نیروی پسماندزاد مغناطیسی
۲۷	۲-۲-۶ حوزه های مغناطیسی
۲۹	۲-۲-۷ ناهمسانگردی مغناطیسی

۳۱.....	۳-۲ آلیاژهای آهن-کبالت
۳۴.....	۴-۲ آلیاژهای آهن-کبالت-نیکل
۳۴.....	۲-۴-۱ مغناطش اشباع در آلیاژهای آهن-کبالت-نیکل
۳۸.....	۲-۴-۲ نیروی پسماندزدا در آلیاژهای آهن-کبالت-نیکل
۳۹.....	۲-۴-۳ اثر اندازه دانه بر نیروی پسماندزدا
۳۹.....	۲-۴-۴ اثر رسوب بر نیروی پسماندزدا
۴۰.....	۲-۴-۵ اثر کار سرد بر نیروی پسماندزدا
۴۱.....	۲-۵ مروری بر تحقیقات انجام شده
۴۶.....	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۴۷.....	۳-۱ مواد اولیه
۴۷.....	۳-۲ آسیاکاری پودرها و متغیرهای آن
۴۹.....	۳-۳ آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)
۴۹.....	۳-۳-۱ تعیین پارامتر شبکه توسط نتایج آزمون XRD
۵۰.....	۳-۳-۲ تعیین اندازه کریستالیت و کرنش شبکه‌های
۵۱.....	۳-۳-۳ محاسبه کسر حجمی مرز دانه ها
۵۲.....	۳-۳-۴ آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۵۲.....	۳-۳-۵ آزمون مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM)
۵۴.....	فصل چهارم: ارائه نتایج
۵۵.....	۴-۱ بررسی ساختاری با استفاده از پراش اشعه ایکس

۲-۴	روند تغییرات مورفولوژی، اندازه دانه و میکرو کرنش حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی	۵۹.....
۳-۴	روند تغییرات پارامتر شبکه و کسر حجمی مرز دانه ها حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی	۶۲.....
۴-۴	خواص مغناطیسی	۶۳.....
۱-۴-۴	منحنی هیستریزس	۶۶.....
۲-۴-۴	مغناطش اشباع و نیروی مغناطیس زدا	۶۶.....
	فصل پنجم: تحلیل و بحث نتایج	۶۷.....
۱-۵	بررسی ساختاری با استفاده از پراش اشعه ایکس	۶۸.....
۱-۱-۵	ترتیب آلیاژ شدن عناصر	۶۸.....
۲-۵	مکانیزم تشکیل ساختار نانو در طی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی	۷۰.....
۱-۲-۵	افزایش چگالی نابجایی ها و تشکیل مرز دانه های فرعی	۷۰.....
۱-۱-۲-۵	مقیاس ماکروسکوپی	۷۰.....
۲-۲-۵	چرخش دانه های فرعی و تشکیل مرز دانه های اصلی	۷۲.....
۱-۲-۲-۵	مقیاس ماکروسکوپی	۷۲.....
۳-۵	روند تغییرات پارامتر شبکه و کسر حجمی مرز دانه ها حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی:	۷۳.....
۴-۵	خواص مغناطیسی	۷۴.....
۱-۴-۵	منحنی هیستریزس	۷۴.....
۲-۴-۵	بررسی مغناطش اشباع و نیروی مغناطیس زدا	۷۴.....
	نتیجه گیری کلی و پیشنهادات	۷۶.....
	منابع	۸۰.....

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲: مدل دو بعدی ماده نانو ساختار ۷
- شکل ۲-۲: تصویر شماتیک تقسیم بندی مواد نانو ساختار بر اساس ترکیب شیمیایی و ابعاد آنها. ۸
- شکل ۳-۲: شماتیکی از مراحل تشکیل نانو ذرات به روش بالا به پایین و روش پایین به بالا. ۱۰
- شکل ۴-۲: مراحل آلیاژسازی مکانیکی. ۱۷
- شکل ۵-۲: توزیع اندازه ذرات در حال تعادل. ۱۸
- شکل ۶-۲: نمایش ریز دانه شدن ساختار در طی آسیاکاری مکانیکی. ۲۰
- شکل ۷-۲: شماتیکی از انواع مواد مغناطیسی. ۲۴
- شکل ۸-۲: مراحل مغناطیس شدن ماده بر اساس نظریه حوزه های مغناطیسی. ۲۵
- شکل ۹-۲: (a) حلقه هیستریزس و (b) مراحل مختلف مغناطش. ۲۶
- شکل ۱۰-۲: چرخش ممان مغناطیسی در مرزهای ۱۸۰ درجه. ۲۹
- شکل ۱۱-۲: رفتار مغناطیسی متفاوت جهات کریستالی در آهن. ۳۱
- شکل ۱۲-۲: منحنی اسلتر - پاولینگ، متوسط ممان اتمی بر حسب ترکیب شیمیایی. ۳۲
- شکل ۱۳-۲: نفوذپذیری اولیه و ماکزیمم بر حسب درصد اتمی کبالت در آلیاژ آهن-کبالت. ۳۲
- شکل ۱۴-۲: نمودار فازی آهن-کبالت. ۳۳
- شکل ۱۵-۲: دیاگرام فازی (a) نانو ذرات و (b) توده آلیاژی، آهن-کبالت-نیکل در دمای ۲۹۸ درجه کلوین. ۳۵
- شکل ۱۶-۲: ممان مغناطیسی اتمی بر حسب درصد اتمی کبالت در آلیاژ آهن-کبالت. ۳۵
- شکل ۱۷-۲: مغناطش اشباع بر حسب ترکیب شیمیایی در آلیاژ آهن-کبالت. ۳۶
- شکل ۱۸-۲: مغناطش اشباع نانو ذرات آهن-کبالت-نیکل در دمای ۳۰۰ درجه کلوین. ۳۷
- شکل ۱۹-۲: نیروی مغناطیس زدای نانو ذرات آهن-کبالت-نیکل در دمای ۳۰۰ درجه کلوین. ۳۸
- شکل ۲۰-۲: رابطه اندازه دانه و نیروی پسماندزدا. ۴۰
- شکل ۲۱-۲: اثر رسوبات آلومینا بر پسماندزدایی آلیاژ آهن - کبالت. ۴۰
- شکل ۲۲-۲: اثر عملیات حرارتی آنیل بر پسماندزدایی آلیاژهای پایه آهن-کبالت. ۴۱
- شکل ۲۳-۲: تغییرات پارامتر شبکه در (a) آهن خالص، (b) آهن در آلیاژ $Fe_{50}Co_{50}$ و (c) آلیاژ $Fe_{50}Co_{50}$ ۴۳
- شکل ۱-۳: مورفولوژی ذرات پودر خالص در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی. ۴۹
- شکل ۲-۳: شمایی از دستگاه مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی. ۵۵

- شکل ۴-۱: آنالیز پراش پرتو ایکس پودرهای مخلوط شده آهن-کبالت-نیکل..... ۵۵
- شکل ۴-۲: آنالیز تفرق اشعه ایکس پودرهای $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ آسیا شده به مدت ۰/۷۵ ساعت..... ۵۵
- شکل ۴-۳: آنالیز تفرق پرتو ایکس پودرهای $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ آسیا شده به مدت ۲ ساعت..... ۵۶
- شکل ۴-۴: آنالیز تفرق پرتو ایکس پودرهای $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ آسیا شده به مدت ۱۰ ساعت..... ۵۶
- شکل ۴-۵: آنالیز تفرق پرتو ایکس پودرهای $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ آسیا شده به مدت: (a) ۲۰ و (b) ۳۵ ساعت..... ۵۷
- شکل ۴-۶: روند تغییر الگوی پراش پودرها در طی آسیاکاری به صورت سه بعدی و روند حذف پیک های نیکل... ۵۸
- شکل ۴-۷: تصویر SEM نمونه $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ قبل از آسیاکاری..... ۵۹
- شکل ۴-۸: روند تغییرات: مورفولوژی، اندازه کریستالیت و میکرو کرنش حین فرآیند آسیاکاری..... ۶۰
- شکل ۴-۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی بالا از پودرهای $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ ۶۱
- شکل ۴-۱۰: حلقوی شدن لایه ها پس از آسیاکاری به مدت ۲۰ ساعت..... ۶۲
- شکل ۴-۱۱: تغییر پارامتر شبکه آهن و کسر حجمی مرز دانه ها بر حسب زمان آسیاکاری..... ۶۳
- شکل ۴-۱۲: منحنی هیستریزس نمونه های $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ در زمان های مختلف آسیاکاری..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳: تغییرات (a) مغناطش اشباع و (b) نیروی مغناطیس زدا در زمانهای مختلف آسیاکاری..... ۶۵

فهرست جدول ها

جدول ۱-۳: ترکیب و درصد وزنی عناصر سازنده آلیاژ $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ ۴۷

جدول ۱-۵: دماهای ذوب سه عنصر و انرژی های پیوند جفت های محتمل در سیستم سه تایی آهن-کبالت-نیکل..... ۶۹

فصل اول: مقدمه

در سال ۱۹۵۹ در انستیتو تکنولوژی دانشگاه کالیفرنیا ریچارد فینمن^۱ برنده جایزه نوبل فیزیک سخنرانی مشهور خود تحت عنوان «در کف، اتاق های زیادی وجود دارد» را ارائه کرد [۱]. او مخاطبین خود را با این جمله که اگر بتوان موادی در مقیاس اتمی یا مولکولی ساخت، افقی تازه به روی بشر گشوده خواهد شد، تهییج کرد. فینمن اشاره کرد که برای محقق شدن این رویداد به دستگاه هایی جهت اندازه گیری این ساختارهای کوچک یا به عبارتی ساختارهای «نانو» نیاز است. او در مورد نانو ذرات، نانو ساختارها و نانو دستگاه ها زمانی صحبت می کرد که هنوز حتی این اصطلاحات وجود نداشتند. تا سال ۱۹۸۰ نیز دستگاه هایی که رویای فینمن بودند ساخته نشدند. اما بعد از آن دستگاه هایی مانند: میکروسکوپ روبشی تونلی^۲ و میکروسکوپ نیروی اتمی^۳ چشمها و انگشتان مورد نیاز جهت اندازه گیری خواص و دستکاری ساختارهای نانو را فراهم کردند [۲]. هم اکنون در زمینه های مختلف دانشمندانی به ساخت و آنالیز مواد نانو ساختار، جهت کشف پدیده ای جدید می پردازند. پدیده ای که در ساختارهایی با اندازه مشخصه ای^۴ که حداقل در یک بعد از طول بحرانی (که معمولاً صد نانو متر تعریف می شود) کوچکتر باشد، روی می دهد [۳]. در حقیقت هنگامی که اندازه مشخصه ساختاری ماده در محدوده ای بین اتمهای مجزا و توده ماده قرار گیرد، ماده از خود ویژگیهای بسیار متفاوتی نسبت به حالت توده ای و اتمی نشان می دهد. ریز کردن مواد تا مقیاس نانو، خواص بنیادی از جمله دمای ذوب، خواص مغناطیسی و حتی رنگ را بدون تغییر ترکیب شیمیایی ماده، تغییر می دهد [۴].

روش های فیزیکی و شیمیایی بسیار متنوعی جهت ساخت مواد نانو ساختار وجود دارد که می توان از روش های بنیادین زیست شناختی، روش های پیچیده رسوبی شیمیایی^۵ و چینش خود به خودی مولکول ها^۶ نام برد. هر کدام از روش های ساخت مواد نانو ساختار بسته به خواص و کاربردهای مورد انتظار دارای مزایا و معایبی هستند [۵].

یکی از مشهورترین روش های فیزیکی ساخت موادی با ساختار نانو، آلیاژسازی مکانیکی است. این روش شامل شکست و جوش متوالی ذرات پودر در طی آسیاکاری می باشد [۶]. مکانیزم تشکیل نانو ساختار حین آلیاژسازی مکانیکی در سیستم های دارای اجزاء نرم بدین صورت است که در اثر

¹.Richard Feynman

².Scanning Tunneling Microscope

³.Atomic Force Microscope

⁴.Characteristic Size

⁵.Chemical Precipitation

⁶.Self-assembling molecules

سرعت تغییر فرم بالایی که در مراحل اولیه آلیاژسازی مکانیکی به سیستم وارد می‌شود، دانسیته نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. ترکیب این نابجایی‌ها موجب تشکیل مرزهای فرعی می‌شود. با ادامه آسیاکاری انرژی مکانیکی صرف چرخاندن دانه‌های نانومتری و تبدیل مرزهای فرعی به مرزهای اصلی می‌گردد [۷]. ویژگی‌هایی نظیر سهولت کار، انعطاف‌پذیری، انجام عملیات در حالت جامد و مقرون به صرفه بودن فرآیند، باعث گسترش آلیاژسازی مکانیکی در سال‌های اخیر شده و انتشار نوآوری‌های مرتبط با این موضوع در کنفرانس‌ها و مجلات علمی به صورت روز افزون مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه دیگر در مورد این فرآیند، استفاده از آن در مقیاس صنعتی است [۸].

استفاده از مواد مغناطیسی در صنایع گوناگون از جمله الکترونیک، مخابرات، تولید ژنراتورها، موتورهای الکتریکی و ساخت وسایل پزشکی پیشرفته گسترش روزافزونی یافته است. بررسی‌های پژوهشگران نشان داده است که آلیاژهای نانوکریستال در مقایسه با پلی‌کریستال‌های دانه درشت، خواص الکتریکی و مغناطیسی بهتری دارند که از این جمله می‌توان به افزایش مقاومت الکتریکی، کاهش ناهمسانگردی مغناطیسی و کاهش اثر دیواره حوزه‌های مغناطیسی^۷ که ناشی از ریز شدن اندازه کریستالیت‌ها تا ابعاد نانومتری و نیز قرار گرفتن کسر زیادی از اتم‌ها در مرزخانه‌ها می‌باشد، اشاره کرد [۹].

به طور کلی مواد مغناطیسی به دو گروه اصلی سخت و نرم تقسیم‌بندی می‌شوند. در مواد مغناطیسی سخت، مقدار مغناطش باقی‌مانده حتی پس از حذف میدان مغناطیسی قابل توجه است در حالی که در مواد مغناطیسی نرم با حذف میدان مغناطیسی اعمالی، خاصیت مغناطیسی بسیار کمی در ماده باقی می‌ماند [۱۰]. تمام مواد مغناطیسی نرم شامل حداقل یک یا تعداد بیشتری از عناصر فرومغناطیس آهن، کبالت و نیکل می‌باشند. آهن خالص یک ماده فرومغناطیس مطلوب است، اما مقاومت کمی دارد و این امر سبب افزایش تلفات جریان گردابی^۸ می‌شود. آلیاژسازی آهن با عناصر دیگر می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری^۹ و کاهش تلفات هسته^{۱۰} گردد [۱۱].

آلیاژهای آهن-کبالت به دلیل خواص مغناطیسی منحصر به فردشان از جمله مغناطش اشباع^{۱۱} زیاد، پسماندزایی^{۱۲} کم، نفوذپذیری زیاد، تلفات پسماند^{۱۳} و تلفات جریان گردابی اندک و نقطه کوری^{۱۴}

^۷.Magnetic domain wall

^۸.Eddy current loss

^۹.Permeability

^{۱۰}.Core loss

^{۱۱}.Magnetization saturation

^{۱۲}.Coercivity

بالا، از جمله بهترین مواد مغناطیسی نرم برای کاربردهای دما بالا نظیر توربین‌ها، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و موتورهای الکتریکی می‌باشند. این آلیاژها نخستین بار در سال ۱۹۲۹ توسط المن^{۱۵} تولید شدند [۱۲]. آلیاژهای آهن-کبالت آلیاژهای جانشینی هستند که در محدوده ۸۰-۰ درصد اتمی کبالت، دارای ساختار کریستالی bcc می‌باشد و در صورتی که درصد اتمی کبالت بیشتر شود، دارای ساختار fcc خواهند بود [۱۳]. اگرچه آلیاژ (Hyperco35) $Fe_{65}Co_{35}$ بیشترین میزان مغناطش اشباع را در بین تمام آلیاژهای دوتایی دارد، اما ترکیب $Fe_{50}Co_{50}$ (Hyperco50) نفوذپذیری بیشتر، پسماندزدایی کمتر و ناهمسانگردی مگنتو کریستالین^{۱۶} نزدیک به صفر دارد. از این رو برای استفاده به عنوان ماده مغناطیسی نرم تجاری مناسب‌تر می‌باشد [۶،۱۴،۱۵] اما علی‌رغم خواص مغناطیسی مطلوب، این آلیاژ تافنس و استحکام تسلیم کمی دارد و در اثر استحاله منظم شدن که در زیر دمای ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد، ترد و شکننده می‌شود. این امر سبب کاهش کاربرد صنعتی این آلیاژ شده است. در اثر افزودن نیکل به آلیاژ هم اتمی آهن-کبالت نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت الکتریکی آلیاژ افزایش و خواص مکانیکی آن بهبود می‌یابد [۱۲،۱۶]. در نتیجه آلیاژهای سه تایی آهن-کبالت-نیکل دارای خواص مغناطیسی مطلوبی جهت به کارگیری در حافظه اصلی کامپیوترها هستند [۱۷].

در تحقیق حاضر پودرهای نانو کریستال با ترکیب شیمیایی $Fe_{45}Co_{45}Ni_{10}$ با استفاده از روش آلیاژسازی مکانیکی تولید شدند. بدین منظور پودرهای آهن، کبالت و نیکل در یک آسیاب سیاره‌ای (Fritsch P6) تحت اتمسفر آرگون در زمان‌های مختلف (۰/۷۵، ۲، ۱۰، ۲۰ و ۳۵ ساعت) آسیا شدند. به منظور بررسی تغییرات مورفولوژیکی و میکروساختاری پودرها به ترتیب از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. پارامترهای ساختاری از جمله اندازه کریستالیت‌ها، میکرو کرنش و پارامتر شبکه از الگوهای پراش بدست آورده شد. خواص مغناطیسی نمونه‌ها نیز توسط مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی^{۱۷} (VSM) مورد بررسی قرار گرفت. در مقایسه این پژوهش با سایر تحقیقات در این زمینه [۹،۱۳،۱۷،۱۸] تفاوت‌های زیر قابل مشاهده اند: ترکیب شیمیایی آلیاژ، بررسی ترتیب آلیاژ شدن عناصر حین آلیاژسازی مکانیکی در سیستم آلیاژی مذکور، مطالعه مکانیزم تشکیل نانو ساختار حین آلیاژسازی مکانیکی.

¹³. Hysteresis loss

¹⁴. Curie point

¹⁵. Elmen

¹⁶. Magnetocrystalline anisotropy

¹⁷. Vibrating Sample Magnetometer

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱ فناوری نانو

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فینمن مقاله ای را درباره ی "قابلیت های فناوری نانو در آینده" منتشر ساخت. با وجود موفقیت هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب شده بود، ریچارد فینمن را به عنوان پایه گذار علم نانو می شناسند. او در یک سخنرانی اعلام کرد که می توان تمام دایره المعارف بریتانیکا را بر روی یک سنجاق کوچک نگارش کرد [۱۹].

یک نانومتر یک میلیاردم متر (10^{-9} m) است. این مقدار حدوداً چهار برابر قطر یک اتم است. مکعبی با ابعاد $2/5$ نانومتر ممکن است حدود ۱۰۰۰ اتم را شامل شود. کوچکترین مدارهای مجتمع^{۱۸} امروزی با ابعادی در حدود ۲۵۰ نانومتر در هر لایه به ارتفاع یک اتم حدود یک میلیون اتم را دربردارند [۱۹].

در فناوری نانو تنها کوچک بودن اندازه مد نظر نیست. بلکه زمانی که اندازه مواد در این مقیاس قرار می گیرند خصوصیات آنها از جمله رنگ، نقطه ذوب، استحکام، مقاومت در برابر خوردگی، خواص مغناطیسی و... تغییر می یابد [۱۹].

۲-۱-۱ مواد نانو ساختار

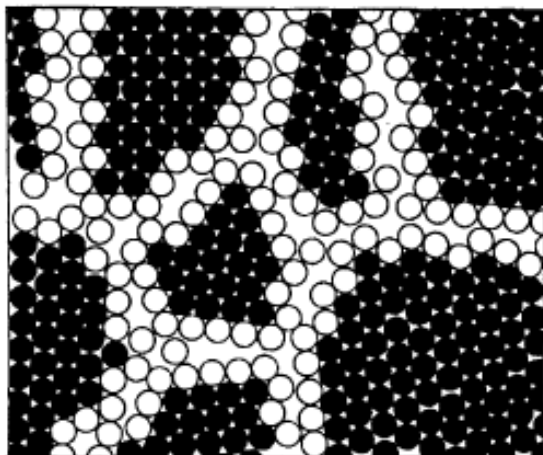
مواد نانو ساختار، جامدات پلی کریستالی یک یا چند فازی هستند، که اندازه دانه های آنها در محدوده یک تا صد نانومتر می باشد. تلاش در زمینه تولید مواد نانو ساختار در سال های اخیر به تحقیقات انجام شده توسط گلیر^{۱۹} در سال ۱۹۸۱ برمی گردد. وی با استفاده از روش رسوب گذاری گازی در محیط خنثی، پودرهای فلزی با ابعاد نانومتری تولید کرد. در مجموع از هر روشی که قابلیت تولید مواد کریستالی با ابعاد بسیار دانه ریز را داشته باشد، می توان برای تولید مواد نانو ساختار استفاده کرد [۲۰، ۲۱].

شکل ۲-۱ توصیفی شماتیک از مدل دو بعدی کره های سخت برای یک ماده نانو ساختار فرضی را ارائه می دهد. اتم های نواحی کریستالی با دایره های سیاه و اتم های نواحی بین کریستالی با اتم های سفید مشخص شده اند. در ساختار یک ماده نانو ساختار، اتم ها به دو شکل در شبکه حضور دارند. اتم های کریستالی که در داخل دانه قرار داشته و فاصله اتمی ثابتی دارند و اتم های مرزدانه ای که فاصله بین

¹⁸ .Integrated Cicuits (IC)

¹⁹ .Gleiter

اتمی متغیری دارند. بنابراین، مواد نانوساختار از نظر ریزساختار ناهمگن بوده و شامل مخلوطی از دانه های کریستالی و نواحی بین کریستالی می باشند [۲۰].



شکل ۲-۱: مدل دو بعدی ماده نانوساختار [۲۰].

مواد نانوساختار را بر اساس شکل، ترکیب شیمیایی و چگونگی پخش جزء نانوساختار، مطابق شکل ۲-۲ تقسیم بندی می کنند. بر اساس شکل کریستال ها، مواد نانوساختار به سه دسته تقسیم می شوند:

۱- مواد با کریستال های لایه ای شکل (یک بعدی)

۲- مواد با کریستال های میله ای شکل (دو بعدی)

۳- مواد با کریستال های هم محور (سه بعدی)

در دسته اول مقادیر طول و پهنا بسیار بزرگ تر از ضخامت، که در حد چند نانومتر است، می باشد. در دسته دوم طول بزرگ تر از پهنا یا قطر، که اندازه شان چند نانومتر است، بوده و دسته سوم هر سه بعد دارای اندازه نانومتری می باشند [۲۲-۲۴].

بر اساس ترکیب شیمیایی کریستال ها، هر سه دسته مواد نانوساختار به چهار گروه تقسیم بندی می شوند. در ساده ترین گروه، تمام کریستال ها و مناطق فصل مشترک دارای ترکیب شیمیایی یکسان می باشند. مثال هایی از این دسته شامل پلیمرهای نیمه کریستالی یا نانومواد متشکل از کریستال های هم محور نانومتری مانند مس می باشد. نانومواد دسته دوم از کریستال ها با ترکیب شیمیایی متفاوت تشکیل گشته اند. ساختارهای کوانتومی معروف ترین مثال این گروه از مواد هستند. نانومواد که در آنها ترکیب شیمیایی کریستال ها با ترکیب شیمیایی مناطق فصل مشترک تفاوت دارد در دسته سوم تقسیم

بندی قرار می‌گیرند [۲۴]. نانوموادى که از نانوکریستال‌های تنگستن تشکیل شده‌اند که در آنها اتم‌های گالیوم در مرز دانه‌ها رسوب داده شده‌اند، نمونه‌ای از این دسته مواد می‌باشد. دسته آخر مواد نانوساختار در اثر پخش کریستال‌های نانومتری در زمینه‌ای با ترکیب شیمیایی متفاوت ایجاد می‌گردد [۲۴].

در بین این تقسیم‌بندی‌ها، بیشترین توجه به ساخت و فشرده‌سازی نانوساختارهای سه بعدی (مواد نانوساختار تولید شده در این پژوهش) و یک بعدی معطوف گشته است. نانوساختارهای سه بعدی در مواردی که به استحکام بالا، چکش‌خواری و خصوصیات مغناطیسی مطلوب نیاز است مورد توجه‌اند و تک بعدی‌ها در کاربردهای الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲، ۲۴].

Chem. comp. of crystallites	Same	Different for different crystallites	Composition of boundaries and crystallites different	Crystallites dispersed in matrix of different composition
Layer-shaped				
Rod-shaped				
Equiaxed crystallized				

شکل ۲-۲: تصویر شماتیک تقسیم بندی مواد نانوساختار بر اساس ترکیب شیمیایی و ابعاد آنها [۲۳].

مواد نانوساختار به دلیل داشتن اندازه دانه‌های بسیار کوچک و چگالی بالای فصل مشترک، خصوصیات مفید متنوعی را در مقایسه با مواد دانه درشت نشان می‌دهند. این خصوصیات شامل استحکام افزایش یافته، نفوذپذیری، چکش‌خواری و چقرمگی بهبود یافته، مقاومت الکتریکی بالاتر،