

ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش و گذار فاز مغناطیسی در محلول جامد $Nd_{14}Dy_2Fe_{78}B_6$

ناصر تجبر^۱، محمدرضا علی نژاد^۱ و فایز پورآرین^۲

۱- گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- دانشگاه کارنگی ملون، آمریکا

دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۴/۳۰

دریافت مقاله: ۷۹/۱۰/۱۹

چکیده

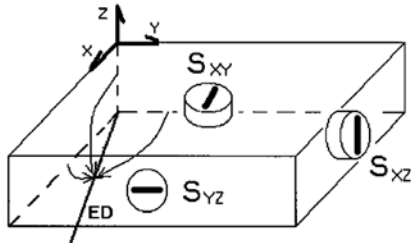
در این مقاله گذار فاز مغناطیسی و ناهمسانگردی مغناطوالاستیکی یک نمونه بس بلور $Nd_{14}Dy_2Fe_{78}B_6$ به کمک اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب و مغناطوتنگش گزارش شده است. این ترکیب به روش ریخته‌گری از مذاب تهیه شد. تصاویر SEM و طیف XRD آن نشان داد که نمونه بس بلور و غیر تک‌فاز بوده و عمده‌ترین ترکیب موجود در آن فاز ۱-۱۴-۲ است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نشان داد که نمونه در دمایی در حدود 130 K تغییر فاز مغناطیسی می‌دهد، که ناشی از بازجهتگیری تدریجی اسپینها همراه با اویچش ساختار بلوری است. مغناطوتنگش نیز در سه امتداد عمود بر هم از بدنه نمونه، در بازه دمایی 77 K الی 300 K و تا میدانهای $1/5\text{ T}$ اندازه‌گیری شد، که در دماهای کمتر از 125 K مقدار آن با ضریب دو تا سه برابر متفاوت به دست آمد. این ناهمسانگردی در مغناطوتنگش حاکی از سمتگیری ترجیحی بلورکها در حجم نمونه است. علاوه بر این، مغناطوتنگش در ناحیه گذار فاز دارای کمینه است که مقدار آن در سه امتداد مختلف نیز متفاوت است. کمینه مغناطوتنگش بر اساس رفتار بحرانی گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای Fe در ناحیه گذار قابل تفسیر است.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانگردی مغناطوالاستیکی، پذیرفتاری مغناطیسی متناوب، مغناطوتنگش، بازجهتگیری اسپینی، رفتار بحرانی

۱. مقدمه

(۱-۱۴-۲) با ساختار تتراگونال است. با فرینه کردن مقدار فاز ۱-۱۴-۲ به کمک بازپخت، و همسوسازی حوزه‌ها به وسیله میدان خارجی، آهنربایی با خواص مغناطیسی سخت که انرژی آن بیش از 50 MGOe است به دست می‌آید [۱]. با کاهش دما، چند گذار فاز ساختاری و اسپینی در ترکیب ۱-۱۴-۲ اتفاق می‌افتد، که ناشی از رقابت بر همکنشهای تبادلی (بین دو زیرشبکه Fe و RE) با مغناطوتنگش و نیز میدانهای ناهمسانگردی بلوری اتمهای RE و Fe است [۲]. در مطالعات نظری انجام شده پیرامون خواص

یکی از روشهای ساخت آهنرباهای دایم قوی از ترکیبات RE-M، که در آن RE عنصر خاکی نادر (Nd، Dy، Tb و ...) و M یک عنصر سبک (C، B، N و ...) است، تهیه آلیاژهای چندفازه طی مراحل ریخته‌گری، آسیاب کاری، جهتدهی دانه‌ها با میدان مغناطیسی و بازپخت است. مطالعه خواص مغناطیسی این گونه ترکیبات پس از هر یک از مراحل ساخت همواره مورد توجه بوده است. آلیاژ $RE_{16}Fe_{78}B_6$ یکی از ترکیبات این خانواده است که مهمترین فاز موجود در آن، فاز $RE_2Fe_{14}B$



شکل ۱. نمایش نحوه تعریف دستگاه مختصات دکارتی نسبت به بدنه نمونه اصلی و چگونگی برش دادن سه نمونه استوانه‌ای و امتداد پیمانه نصب شده روی هر یک از آنها. خط ممتد موب ED امتداد آسان مورد انتظار را نشان می‌دهد.

متناوب نمونه با استفاده از دستگاه Ac-Susceptometer در فاصله دمایی ۷۷ K الی ۳۰۰ K و بازه بسامدی ۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز در دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شد.

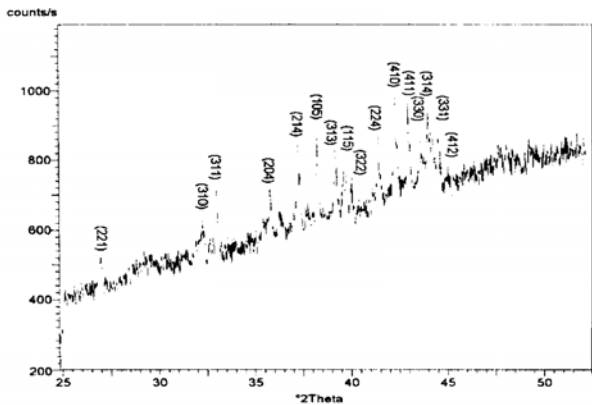
۳. نتایج

مطالعات ساختاری روی نمونه‌هایی که با روش فوق تهیه شده باشند نشان داده است که می‌توان شکل دانه‌ها را به سه گونه درشت (به قطر بیش از ده میکرون)، سوزنی، و ریز (با قطر کمتر از یک میکرون) دسته‌بندی کرد، که این توزیع شکل به آهنگ سردسازی و ضخامت نمونه وابسته است. معمولاً ذرات درشت در سطح آزاد نمونه و ذرات ریز در سطحی که با قالب در تماس است شکل می‌گیرند. دانه‌ها که عمدتاً از فاز اصلی $\text{RE}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ تشکیل شده‌اند توسط فازهای فرعی دیگر (مثل فاز پر از بور $\text{Nd}_{1+x}\text{Fe}_x\text{B}_2$ ، مرز دانه‌های پر از نیودیمیم و فاز $\alpha\text{-Fe}$ ، ...) احاطه می‌شوند. در تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی و نوری دانه‌های فاز اصلی ۱-۱۴-۲ به صورت لکه‌های روشن ظاهر می‌شوند [۵]. تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع عمود بر سطح آزاد نمونه مورد آزمایش (صفحات xz و yz در شکل ۱)، که می‌تواند نماینده توزیع دانه‌ها در حجم نمونه باشد، نشان داد که نمونه عمدتاً از دانه‌های بس‌بلور با ترکیب Nd-Dy-Fe-B و با ابعادی تا پنج میکرون تشکیل شده است که در شکل ۲ به رنگ روشن دیده می‌شوند. ذرات درشت و ریزی که ممکن است در مجاورت سطح آزاد و سطح در تماس با قالب نمونه شکل گرفته باشند، طی برشکاری نمونه‌های قرصی شکل حذف می‌شوند و در نتیجه در تصویر ظاهر نشده‌اند. ولی، بازپخت همدمای نمونه به

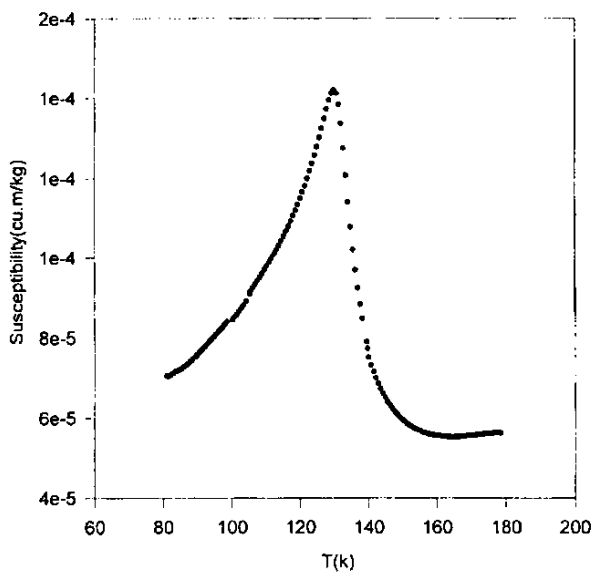
مغناطوالاستیک محلولهای جامد معمولاً از برهمکنشهای ناهمسانگرد چشمپوشی می‌شود [۳ الی ۶]. همسانگرد بودن به این دلیل فرض می‌شود که: اولاً، اندازه برهمکنشهای ناهمسانگرد به مراتب کوچکتر از انواع همسانگرد است؛ ثانیاً، نمونه‌های محلول جامد دارای بافتی همگن هستند؛ به نحوی که، در صورت عدم اعمال یک ناهمسانگردی خارجی قوی هنگام ساخت، احتمال مشاهده آثار ناهمسانگردی در خواص ماکروسکوپی ضعیف است. لذا، مشاهده ناهمسانگردی مغناطوالاستیکی و به ویژه مقایسه آن در راستاهای مختلف روی یک نمونه مغناطیسی، که دارای گذارهای ساختاری و اسپینی است، می‌تواند نقش برهمکنشهای مغناطوالاستیکی در رفتار مغناطیسی آن نمونه را نشان دهد. به این منظور، مغناطوتنگش یک نمونه محلول جامد $\text{Nd}_{14}\text{Dy}_2\text{Fe}_{18}\text{B}_6$ در سه امتداد عمود بر هم را اندازه گرفتیم. علاوه بر این، تغییرات ناگهانی مغناطوتنگش اندازه‌گیری شده ما را بر آن داشت تا امکان گذار فاز مغناطیسی در این ترکیب را نیز بررسی کنیم، لذا پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه نیز اندازه‌گیری شد.

۲. آزمایش

ترکیب $\text{Nd}_{14}\text{Dy}_2\text{Fe}_{18}\text{B}_6$ طی دو مرحله از دوره کامل ساخت آهنرباهای سخت که در مقدمه به آن اشاره شد، در دانشگاه کارنگی ملون آمریکا تهیه شد. این دو مرحله شامل ذوب مخلوط پودری عناصر سازنده درون یک کوره القایی و بازپخت نمونه تیغه‌ای شکل به ضخامت ۸ mm در دمای 1050°C در جو کنترل شده به مدت یک هفته بود. طیف XRD نمونه با استفاده از تابش $\text{Cu-K}\alpha$ و تصویر SEM نمونه نیز در موسسه تحقیقاتی پر طاووس مشهد تهیه شد. سه نمونه قرصی شکل مشابه هر یک به طول ۱/۵ mm و قطر ۶ mm در سه امتداد عمود بر هم X، Y و Z، مطابق شکل ۱، از بدنه نمونه اصلی برش داده شدند. مغناطوتنگش پس از نصب پیمانه کرنشی روی قاعده هر یک از نمونه‌ها، به صورت نشان داده شده در شکل ۱، با دقتی در حدود 4×10^{-6} و در بازه دمایی ۷۷ K الی ۳۰۰ K تحت تاثیر میدانهای مغناطیسی تا ۱/۵ T در امتداد پیمانه $(\lambda_{||})$ و عمود بر آن (λ_{\perp}) اندازه‌گیری شد [۷]. مغناطوتنگش ناهمسانگرد از رابطه $\Delta\lambda = \lambda_{||} - \lambda_{\perp}$ و مغناطوتنگش حجمی از رابطه $\Delta V/V = \lambda_{||} + 2\lambda_{\perp}$ محاسبه شدند [۸]. پذیرفتاری مغناطیسی

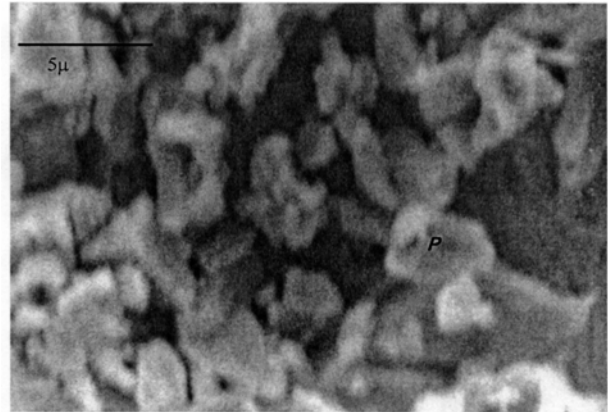


شکل ۳. طیف XRD با تابش $\text{Cu-K}\alpha$. قله‌های مشخص شده مربوط به فاز $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ می‌باشند.



شکل ۴. تغییرات قسمت حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی متناوب با دما تحت تاثیر میدان خارجی متناوب 50 A/m با فرکانس 1000 Hz و میدان مستقیم صفر.

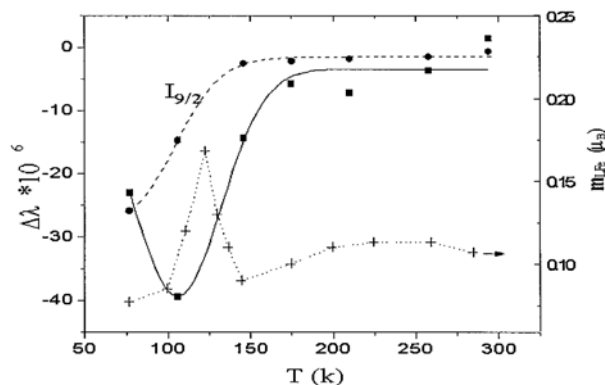
نتیجه افزایش دمای بازجتهگیری اسپینها در نمونه مورد آزمایش ما نسبت به فاز اصلی $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [۱۲] شود، که عکس آن مشاهده شد. ولی، نتایج تجربی نشان داده‌اند که علاوه بر ناهمسانگردی مغناطوبلوری، برهمکنش تبادلی بین دانه‌ها نیز بر دمای بازجتهگیری اثر دارد و با کوچکتر شدن دانه‌ها باعث کاهش آن تا مقدار 117 K می‌شود [۱۰]. بنابراین، پایتتر بودن دمای بازجتهگیری نسبت به دمای گزارش شده در [۱۰]، می‌تواند ناشی از کوچکتر بودن اندازه دانه‌ها در نمونه ما باشد. نتایج اندازه‌گیری مغناطوتنگش ناهمسانگرد برحسب دما در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. دو ویژگی قابل توجه این نتایج



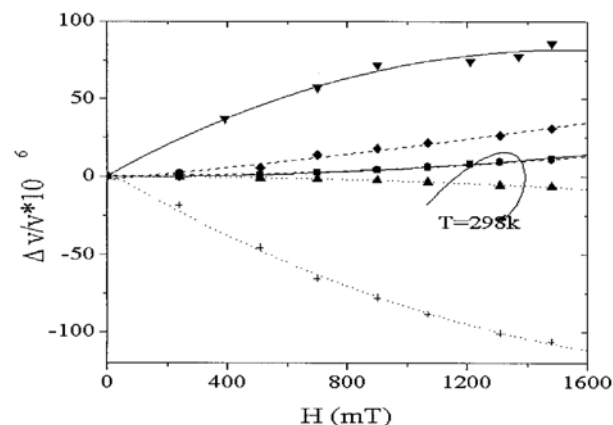
شکل ۲. تصویر ذرات روشن P محتوی فاز سخت $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ می‌باشند.

مدت طولانی باعث رشد دانه‌های درون حجم نمونه تا ابعاد تقریباً پنج میکرون شده است. افزون بر این، طیف XRD، شکل ۳، وجود فاز $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ در ساختار تتراگونال [۹] را به وضوح تایید می‌کند. از آنجا که قله مربوط به فاز $\alpha\text{-Fe}$ در این طیف دیده نمی‌شود، بازپخت همدمای نمونه به خوبی توانسته است باعث ترکیب این فاز با فازهای فرعی دیگر و گسترش فاز اصلی $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ شود [۵].

نمودار پذیرفتاری مغناطیسی متناوب بر حسب دما، شکل ۴، وجود یک گذار فاز در دمایی در حدود 130 K را نشان می‌دهد. این گذار فاز متشکل از بازجتهگیری تدریجی اسپینها توام با وایپچس ساختار بلوری است که برای بلورهای $\text{Nd(Dy)}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ گزارش شده است [۶، ۱۰ و ۱۱]. در دمای بازجتهگیری (T_{SR}) احتمال سمتگیری اسپینها در راستای c و در سطح قاعده یاخته تتراگونال یکسان است، لذا ناهمسانگردی مغناطیسی کمینه و پذیرفتاری مغناطیسی (که پاسخ مغناطش به تغییرات میدان خارجی است) بیشینه می‌شود. دمای بازجتهگیری که در شرایط مشابه برای نمونه ریخته‌گری شده $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ گزارش شده برابر با 135 K است [۱۰]، که بالاتر از دمای مشاهده شده در این تحقیق، $T_{SR}=130 \text{ K}$ ، و در همان فرکانس (1000 Hz) است. عامل اصلی پدیده بازجتهگیری اسپینی در آلیاژهای آهن-خاکی نادر رقابت میدانهای بلوری دو زیر شبکه Fe و RE است. با توجه به این که میدان بلوری اتمهای Dy بیش از Nd است، لذا انتظار داریم جایگذاری جزئی Dy به جای Nd باعث افزایش میدان ناهمسانگردی مغناطوبلوری زیر شبکه RE و در

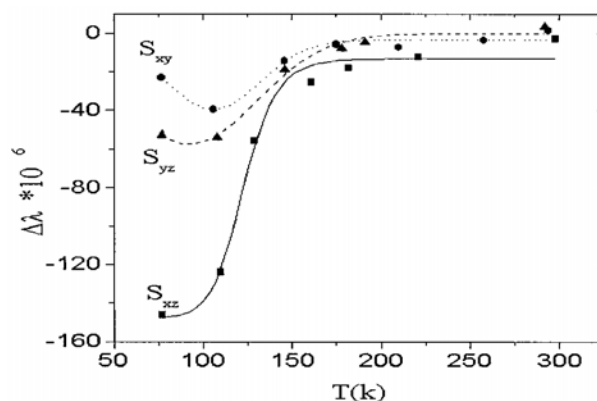


شکل ۶. خط پر: مغناطوتنگش ناهمسانگرد تجربی به صورت تابعی از دما در میدان خارجی ۱/۵ T برای نمونه S_{xy} . خط چین: مغناطوتنگش پیش بینی شده براساس مدل تک ذره‌ای کالن. نقطه چین: تغییرات دمایی بخش مداری گشتاور اتمهای Fe از مرجع [۱۶].



شکل ۷. تغییرات مغناطوتنگش حجمی با میدان خارجی در دمای اتاق (نمودارهای درون کمان) و دمای N_p . نمونه S_{xz} : خط ممتد؛ نمونه S_{xy} : نقطه چین؛ نمونه S_{yz} : خط چین.

مغناطوتنگش اشیاعی دانه‌ها متناسب است [۱۳]، ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش و امتداد آسان موجود در فاز دمای پایین حاکی از سمتگیری ترجیحی بلورکها در حجم نمونه است (امتداد c یاخته‌های یکه در بلورکها تقریباً موازی با محور zها در شکل ۱). از دیدگاه میکروسکوپی، ناهمسانگردی اخیر بیانگر اهمیت سهم تبادل ناهمسانگرد (ناشی از پارامترهای بالاتر از مرتبه دوم میدان الکتریکی بلوری اتمهای RE) در انرژی مغناطولاستیکی نمونه است [۵]. با کاهش دما، این برهمکنش ناهمسانگرد موجب تغییر جهتگیری اسپینها از راستای تقریباً موازی با محور z به سمت امتداد آسان ED نزدیک به صفحه قاعده نمونه در شکل ۱ می‌شود. این چرخش



شکل ۸. مغناطوتنگش ناهمسانگرد به صورت تابعی از دما تحت تاثیر میدان خارجی ۱/۵ T برای سه نمونه معرفی شده در شکل ۱.

عبارتند از: الف) مقادیر به دست آمده برای سه نمونه مختلف، که در سه راستا از بدنه نمونه اصلی جدا شده‌اند، به طور چشمگیری متفاوتند، که این را ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش نامیده‌ایم. ب) در دمایی کمی پایینتر از دمای گذار یک کمینه وجود دارد که برای نمونه S_{xy} در شکل ۶ به طور آشکار نشان داده شده است. در ادامه به توصیف این دو ویژگی می‌پردازیم.

ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش در دماهای بالاتر از ۱۲۵K به سرعت از بین می‌رود و اندازه مغناطوتنگش در میدان اعمال شده (۱/۵ T) با نزدیک شدن به دمای اتاق تقریباً صفر می‌شود. ناهمسانگردی مشابهی در مغناطوتنگش حجمی مشاهده شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این که مغناطوتنگش در نزدیکترین امتداد به راستای آسان مغناطیسی باید کمترین مقدار را داشته باشد (چون اعمال میدان، چرخش تعداد کمتری از اسپینها را به دنبال دارد)، لذا می‌توان از ناهمسانگردی فاز دمای پایین یک امتداد آسان ماکروسکوپی برای مغناطش ماده پیشنهاد کرد. این امتداد به طور تقریبی توسط خط مورب ED در شکل ۱ نشان داده شده است. منحنیهای تجربی مغناطوتنگش ناهمسانگرد برحسب میدان، در شکل ۸، نیز این امتداد آسان را تایید می‌کنند. زیرا دیده می‌شود که میدان اشیاعی مغناطوتنگش، H_s ، در سه امتداد مختلف متفاوت است، به نحوی که $H_s(S_{xy}) \approx 0.9T$ ، $H_s(S_{yz}) \approx 1.3T$ و برای S_{xz} بیش از این دو است. در مقایسه با یک نمونه بس بلور همسانگرد که مغناطوتنگش آن با

دست می آید،

$$m(T) = I_{r/\tau(p)} = \cot gh p - \frac{1}{p} \quad (2)$$

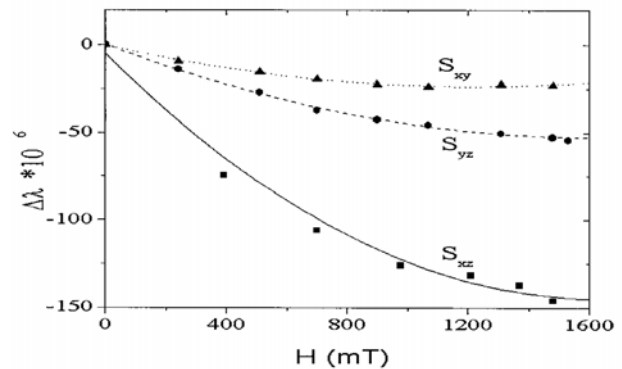
منحنی محاسبه شده بر این اساس برای نمونه S_{xy} به صورت خط چین در شکل ۶ رسم شده است. در این شکل، انحراف مقادیر تجربی از پیش بینی مدل تک ذره ای کالن در ناحیه گذار فاز مشهود است. برای دو نمونه دیگر که امتداد پیمانه روی آنها از راستای آسان ED دورتر است نیز انحرافهایی از نظریه مشاهده شد. این انحراف از نظریه می تواند مربوط به رفتار بحرانی گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای Fe کمی پیش از دمای گذار باشد که در مرجع [۱۷] به آن پرداخته شده است، و ما در محاسبات نظری بالا آن را منظور نکرده ایم. برای مقایسه، گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای Fe برحسب دما که در این مرجع گزارش شده است را نیز به صورت نقطه چین در شکل ۶ رسم کرده ایم. مقایسه تابعیت دمایی مغناطوتنگش اندازه گیری شده با منحنی گشتاور مغناطیسی مداری (خط پر و نقطه چین در این شکل) نشان می دهد، کمینه مشاهده شده در مغناطوتنگش را می توان به صورت رفتار بحرانی مغناطوتنگش، ناشی از رفتار بحرانی گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای آهن، تفسیر کرد. البته باید توجه داشت که نقطه کمینه در منحنی مغناطوتنگش خود نمایانگر افزایش بحرانی اندازه آن است.

از نظر فیزیکی، افزایش گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای آهن می تواند موجب تقویت ناهمسانگردی زیرشبکه Fe، K_1^{Fe} ، شود [۱۸]. این افزایش ناهمسانگردی به تقویت اندازه مغناطوتنگش می انجامد، و با توجه به ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش باعث واپیچش ساختار بلوری می شود. علاوه بر این، چون راستای ناهمسانگردی زیر شبکه Fe (امتداد c تراگونال) با راستای ناهمسانگردی زیر شبکه RE (دور از امتداد c تراگونال) متفاوت است، این واپیچش ساختار بلوری با بازجهتگیری اسپینها نیز همراه است.

۴. جمع بندی

الف) نمونه در دمایی در حدود ۱۳۰ K تغییر فاز می دهد. این گذار فاز متشکل از بازجهتگیری تدریجی اسپینها توام با واپیچش ساختار بلوری است.

ب) در فاز دمای پایین، مغناطوتنگش نمونه در راستاهای



شکل ۸. مغناطوتنگش ناهمسانگرد به صورت تابعی از میدان مغناطیسی در دمای N_2 برای سه نمونه معرفی شده در شکل ۱.

اسپینها، با پدیده بازجهتگیری مشاهده شده در نمودار پذیرفتاری همخوان است.

با مراجعه به شکل ۷ ملاحظه می شود که مغناطوتنگش حجمی در فاز دمای بالا کوچک، اما در فاز دمای پایین نسبتاً بزرگ و در راستاهای مختلف متفاوت است. انتظار می رود افزایش مغناطوتنگش حجمی ناشی از تقویت سهم برهمکنشهای همسانگرد در انرژی مغناطوالاستیکی باشد [۵ و ۱۴]. لذا، علامت مثبت و منفی مغناطوتنگش حجمی در دمای N_2 نشان می دهد که با کاهش دما و چرخش مغناطوالاستیکی اسپینها به سمت صفحه xy در شکل ۱، جفت شدگی همسانگرد اسپینها نیز افزایش می یابد.

ویژگی دوم قابل مشاهده در نمودارهای شکل ۵، حضور کمینه ها در دمایی کمی پیش از دمای گذار فاز است. چون با افزایش دما میدان بلوری زیر شبکه RE افزایش می یابد، در نتیجه می توان انتظار داشت که تابعیت عمومی مغناطوتنگش از دما توسط زیر شبکه RE کنترل شود. بر این اساس از مدل تک ذره ای کالن [۱۵] استفاده کرده و به کمک مقادیر مغناطش کاهش یافته زیر شبکه RE که در مرجع [۱۶] گزارش شده است، رفتار عادی منحنیها را تخمین می زنیم. این عمل با رسم تابع زیر برای هر سه نمونه انجام شد.

$$\Delta\lambda = \lambda_o \times I_{r/\tau(p)} \quad (1)$$

در این معادله I تابع بسط هیپربولیک کاهش یافته بوده و p از رابطه زیر برحسب مغناطش کاهش یافته زیر شبکه RE، m، به

می‌شود. این بیشینه مربوط به رفتار بحرانی گشتاور مغناطیسی مداری اتمهای Fe در آن ناحیه دمایی است.

قدردانی

از آقایان دکتر هادی سلامتی و پرویز کاملی در دانشگاه صنعتی اصفهان به خاطر کمک در اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی و آقایان دکتر یوسفی و نوید غفوریان در مؤسسه تحقیقاتی پرتو و طووس مشهد برای تهیه تصاویر SEM و طیف XRD کمال سپاسگزاری را داریم.

مختلف کاملاً متفاوت است، که بیانگر سمتگیری ترجیحی بلورکها در حجم نمونه است. از این رو، می‌توان گفت که تنشهای حرارتی در حین انجماد نمونه ریخته‌گری شده، باعث نظم تقریبی بلورکها می‌شود.

پ) از نقطه نظر میکروسکوپی، ناهمسانگردی جهتی مغناطوتنگش نشان می‌دهد که در محاسبات نظری، نمی‌توان از پارامترهای مرتبه دوم و بالاتر میدان بلوری اتمهای RE صرف نظر کرد.

ت) اندازه مغناطوتنگش در دمایی کمتر از دمای گذار بیشینه

مراجع

10. X C Kou, et al, *J. Appl. Phys.*, **81**, 4428 (1997).
11. F Liorzou, et al, *J. Magn. Magn. Mater.*, **182**, 49 (1998).
12. N Tajabor, et al, to be published in *Phys. Rev. B*.
13. D Craik, Magnetism "Principles and Applications", John Wiley & Sons (1997).
14. F Pourarian, et al, *Proceeding of MSM99 Conf.*, Tehran-Iran, World Scientific, 975 (999) [2000].
15. E Callen, H B Callen, *Phys. Rev.*, **139A**, 455 (1965).
16. H Onoedera, et al, *J. Magn. Magn. Mater.*, **68**, 6(15) (1985).
17. L M Garcia, et al, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 429 (2000).
18. O Hjortstam, et al, *Phys. Rev. B*, **55**, 15026 (1997).
1. D W Scott, et al, *J. Appl. Phys.*, **79**, 4830 (1996).
2. P Wolfers, et al, *Proceeding of MSM99 conf.* Tehran-Iran, World Scientific, 991 (2000).
3. H Beck, H J Guntherodt, *Glassy Metals II*, Springer-verlag (1983).
4. R C O'Handley, *Phys Rev B*, **18**, 930 (1978).
5. J Jensen, A R Makintosh, *Rare Earth Magnetism*, Oxford Univ. Press (1991).
6. J F Herbst, T W Caphart, F E Pinkerton, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 3041 (1997).
7. F Pourarian, N Tajabor, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **61**, 537 (1980).
8. F Pourarian, *Phys Letters*, **72A**, 175 (1979).
9. O Isnard, et al, *J. Appl. Phys.*, **78**, 1892 (1995).