

## اهمیت بررسی خواص مغناطیسی در فولاد و بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر آن با نگاه ویژه به تولید فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA)

محسن علی زاده<sup>۱</sup>، پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

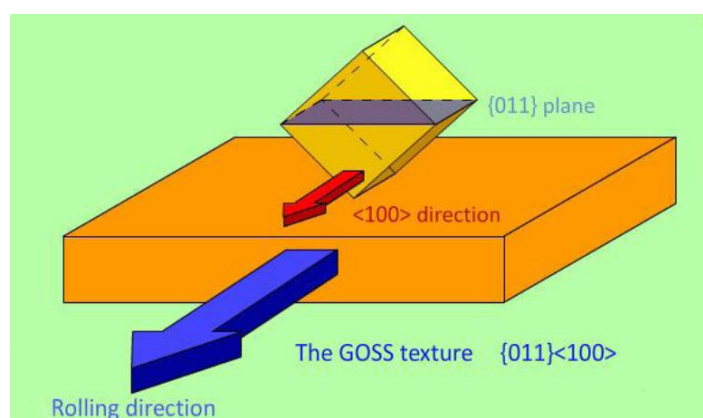
هدف از این مقاله، معرفی کلی از جایگاه فولاد در کاربردهای مغناطیسی در صنایع مختلف است. فولادها با توجه به گسترده بودن آنها در سه دسته مواد فرو مغناطیس نرم، سخت و پادمغناطیس تقسیم بندی می شوند که به معرفی هر یک از آنها پرداخته شده است. علاوه بر این سعی شده عوامل مؤثر بر خواص مغناطیسی فولادها به صورت اجمالی شرح داده شود. به منظور بررسی دقیق تر و آشنایی با تجهیزات ارزیابی خواص مغناطیس به طور نمونه خواص مغناطیسی فولاد HSLA-100 ساخت داخل بررسی شده است. برای نشان داده تغییرات مغناطیسی در فولاد از عملیات حرارتی پیرسازی بهره گرفته شد. به این منظور، فرایند آستنیت در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه و سرمایش سریع در آب سرد انجام شد. سپس فرایند پیرسازی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه صورت گرفت. ریز ساختار توسط میکرو سگپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بررسی شد. برای بررسی خواص مغناطیسی از دستگاه مغناطومتر ارتعاشی (VSM) و دستگاه اندازه گیری ظرفیت القای مغناطیسی (LCR) استفاده شد. مشاهده شد که فرایند پیرسازی در مقایسه با حالت سرمایش سریع، موجب کاهش کسر حجمی ریز ساختار لایه ای و افزایش فاصله میانگین بین لایه ها شد. با انجام فرایند پیرسازی، نیروی وادارندگی مغناطیسی نسبت به شرایط سریع سرد شده از ۴/۵ به ۳/۰ اوستند و نفوذپذیری اولیه نسبی مغناطیسی از حدود ۷۶ به ۶۶ کاهش یافت.

**کلمات کلیدی:** فولاد، مغناطیس، وادارندگی، خواص مکانیکی، فولادهای HSLA، ریز ساختار، مغناطیس نرم.

<sup>۱</sup> eng.alizadeh70@gmail.com

فولادها به دلیل اینکه عنصر پایه آن از آهن (که یک ماده فرومغناطیس است)، تشکیل شده دارای خاصیت مغناطیسی می باشد [۱]. علاوه بر این با توجه به قیمت پایین و استحکام بالا نسبت به سایر مواد مغناطیسی از آن‌ها در برخی از کاربردهای مغناطیسی استفاده می شود. فولادها بر اساس ترکیب شیمیایی و ساختار فاز اصلی جز مواد فرومغناطیس نرم، سخت و پادمغناطیس قرار می گیرند [۲]. کربن عامل اصلی در فولاد است که فولاد را در مواد فرومغناطیس نرم و یا سخت قرار می دهد. عمدتاً فولادهای با کربن بالا دارای خواص مغناطیسی سخت هستند که در آهنرباهای دائم کاربرد دارند. فولادهای با حضور کربن اندک نیز جزء مواد فرومغناطیس نرم محسوب می شوند. در کاربردهایی که نیازی به خواص مغناطیسی عالی نیست، گاهی اوقات فولادهای کم کربن مثل ۱۰۰۸، ۱۰۱۰، ۱۲ L۱۴ و غیره به کار می رود. فروش اینگونه فولادها بر اساس مشخصات مغناطیسی قرار ندارد و ممکن است بسته به روش ذوب و وضعیت فیزیکی محصول، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در کیفیت آن‌ها وجود داشته باشد. اگر قطعات ساخته شده از این فولادها بر طبق روش‌های توصیه شده برای فولادهای کم کربن مغناطیسی نرم با کیفیت بالا آنیل شوند، ویژگی مغناطیسی نرم آن‌ها بهبود می یابد. البته دارای درجه بهبود تضمین شده نیست و قطعه ممکن است با گذشت زمان در معرض پیری قابل ملاحظه‌ای قرار گیرد. این فولادها به علت قیمت پایین، در دسترس بودن و قابلیت ماشین کاری به عنوان قطعات قطب در الکترومگنت‌ها مورد استفاده قرار می گیرند. اما فولادهایی نیز وجود دارند که با توجه به طراحی ترکیب شیمیایی آن عمدتاً در کاربردهای مغناطیسی خاص استفاده می شوند. این فولادها تحت عنوان فولادهای مغناطیسی یا سیلیسمی در بازار شناخته می شود. همان طور که از اسم این دسته فولادها مشخص است عنصر قابل توجه در آن‌ها سیلیسم است. حضور سیلیسم باعث افزایش مقاومت الکتریکی، کاهش انرژی آنیزوتروپی مگنتو کریستالی و تنگش مغناطیسی می شود. لذا در فولادهای سیلیسمی نفوذ مغناطیسی بالا و اتلاف هیستریزس پایین حاصل می گردد. البته با افزودن سیلیسم به آهن، دمای کوری و اشباع مغناطیسی کاهش می یابد. این آلیاژها بر اساس خواص مغناطیسی معین به خصوص اتلاف هسته فروخته می شوند. مقدار سیلیسم در عین حال که باعث افزایش خاصیت مغناطیسی می شود به دلیل وجود مراحل نورد سرد می تواند موجب تردی ورق و یا پارگی آن حین تغییر شکل گردد. بنابراین انتخاب میزان سیلیسم در فولاد اهمیت زیادی پیدا می کند. امروزه مهم ترین پارامترهای مورد تحقیق در رابطه با فولادهای مغناطیسی عمدتاً تغییر ترکیب شیمیایی، امکان ایجاد بافت مناسب در ورق و کنترل داشتن بر اندازه حوزهای مغناطیسی را در بر می گیرند. هر یک از این موارد به ترتیب موضوعات تحقیقاتی وسیعی را تشکیل می دهند که اساساً رقابت در بهبود کیفیت محصول تولیدشده بستگی کامل به آن‌ها دارد. یکی از کاربردهای ویژه فولادهای سیلیسمی استفاده در ساخت ترانسفورمورها است. در این قطعات از ورق‌هایی به صورت لایه لایه در هسته آن استفاده شده که از فولاد سیلیسم دار حدود ۳٪ سیلیس با کربن خیلی پایین به شکل ورق نورد تولید می گردد. خواص نهایی در واقع خواص مغناطیسی، سهولت در مغناطیس شدن در یک

جهت کریستالی خاص، تلفات هیستریزیس کم و تلفات جریان گردابی کم می‌باشند. دو مورد اول متأثر از ترکیب شیمیایی و بافت و خلوص فولاد می‌باشد و مورد آخر در واقع بیش تر تابع اندازه دانه‌ها، ضخامت ورق و تنش‌های داخلی است. گونه‌ای خاصی از دسته این فولادها، فولادهای سیلیسمی دارای بافت ترجیحی است. بیش‌ترین خاصیت مغناطیسی شدن در این گونه فولادها در جهت کریستالی  $\langle 100 \rangle$  دیده شده است [۲]. بنابراین سعی زیادی بر آن است که دانه‌های که جهت  $\langle 100 \rangle$  آنها موازی با جهت نورد ورق باشد تولید شود. در عمل بافتی که ضمن پروسه‌های پیچیده تولید این ورق‌ها (شامل نورد گرم، نورد سرد و آنیل‌های نهایی و میانی) ایجاد می‌شود، دارای جهت کریستالی مرجح  $\langle 100 \rangle \{011\}$  (یا بافت GOSS) می‌باشد (شکل ۱). در جدول ۱ برخی از فولادهای سیلیکونی با ذکر خواص مغناطیسی آن مشخص شده است [۲].



شکل ۱- طرح‌واره بافت گوس ایجادشده در فولادهای مغناطیسی سیلیسمی [۲].

جدول ۱- معرفی برخی از فولادهای سیلیکونی با ذکر خواص مغناطیسی آنها [۲]

Category	ASTM no.	Thickness, 0.001 inch	Thickness, mm	Maximum B, kG	Loss, W/lb	Loss, W/kg
Lamination steel	47D175	18.5	0.47	15	1.75	3.85
	79D610	31	0.79	15	6.10	13.4
Grain-oriented (GO) electrical steel	18G041	0.007	0.18	15	0.41	0.90
	35G066	0.0138	0.35	15	0.66	1.46
GO high-permeability electrical steel	23P060	0.009	0.23	17	0.60	1.32
	27P066	0.106	0.27	17	0.66	1.46
GO high-permeability laser-scribed electrical steel	23Q054	0.009	0.23	17	0.54	1.19
	27Q057	0.106	0.27	17	0.58	1.28

در دسته جامع و کامل انواع فولادها، فولادهایی زنگ‌نزن آستنیتی نیز حضور دارند که جزء مواد پادمغناطیس قرار می‌گیرند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل فاز آستنیت پایدار موجود کاملاً پارامغناطیس هستند. فاز

آستنیت فولاد در بالای دمای  $A_{C1}$  ایجاد می شود که تقریباً دمای بحرانی  $A_{C1}$  به دمای کوری نزدیک است. قابلیت نفوذ مغناطیسی در فولادهای آستنیتی با فرایند کار سرد افزایش می یابد. زیرا مقداری مارتزیت ایجاد می گردد که یک ساختمان فرومغناطیس است. برای بعضی انواع مانند ۳۰۴ و ۳۰۲ AISI افزایش در قابلیت نفوذ مغناطیسی می تواند قابل ملاحظه باشد. در نتیجه این فولادها در فرایند کار سرد شدید می توانند تا حدودی فرومغناطیسی باشند.

با پیشرفت تکنولوژی فولادهایی وارد بازار شدند که با توجه به ترکیب شیمیایی آنها خاصیت مغناطیسی بسیار نرمی در آنها ایجاد شده است که تحت عنوان فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا<sup>۱</sup> (HSLA) هستند. البته طراحی این فولادها به جهت کاربرد آنها از خواص مغناطیسی بسیار نرم آنها نبوده است [۳]. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) دسته از فولادها هستند که از فولادهای کم کربن توسعه پیدا کرده اند [۴]. یکی از شاخص ترین نوع از این دسته، فولاد HSLA-100 است [۵]. در ترکیب شیمیایی این فولاد، کربن کم تر از ۰/۰۶ درصد وزنی وجود دارد. حضور کربن بسیار کم، موجب افزایش مقاومت به خوردگی یکنواخت، شکل پذیری و جوش پذیری شده است. با وجود درصد کربن بسیار پایین، این فولاد دارای استحکام تسلیم بالایی است. یکی از دلایل اصلی استحکام تسلیم بالا در این فولاد، اندازه کوچک دانه های آستنیت است (حدود ۱۰ میکرومتر). حضور عناصر میکروآلیاژ کاربیدساز و فرایند حرارتی مکانیکی موجب کاهش اندازه دانه ها نسبت به فولاد ساده کم کربن شده است. علاوه بر این، به واسطه حضور عناصری هم چون مس، عملیات حرارتی پیرسازی<sup>۲</sup> به افزایش استحکام تسلیم کمک می کند. سرمایش سریع فولاد پس از آستنیت شدن، باعث ایجاد یک محلول فوق اشباع از مس می شود. زمانی که فولاد تحت فرایند پیرسازی قرار می گیرد، مس از حالت فوق اشباع خود خارج و در زمینه رسوب می نماید [۶]. نوع فصل مشترک و اندازه رسوبات مس به شدت به دما و زمان پیرسازی بستگی دارند. علاوه بر این، اندازه و نوع فصل مشترک رسوبات مس، بر خواص مکانیکی و مغناطیسی مؤثر است. فولادهای حاوی مس، مانند فولاد HSLA-100 به دلیل مقاومت به خوردگی اتمسفری بالا، کاربرد وسیعی در صنایع دریایی از جمله ساخت بدنه زیردریایی دارند. جهت ساخت بدنه زیردریایی باید از فولادهایی استفاده شود که علاوه بر مقاومت به خوردگی بالا، تنش ناشی از فشار آب در عمق دریا را تحمل کند. ابتدا در آمریکا جهت ساخت زیردریایی از فولاد استحکام بالای HY<sup>۳</sup> استفاده شد. مشکل اساسی فولادهای HY در عملیات جوشکاری بود. در جوشکاری فولادهای HY، به منظور جلوگیری از ایجاد ترک ناشی از حضور کربن معادل بالا، نیاز به پیش گرم بود. پیش گرم هزینه ناشی از ساخت بدنه کشتی و زیردریایی ها را افزایش می داد [۷]. برای کاهش هزینه ناشی از ساخت بدنه زیردریایی باید کربن موجود در ترکیب شیمیایی کم می شد. به این منظور با کاهش کربن در فولادهای HSLA-80 و HSLA-100، جوش پذیری افزایش و هزینه ناشی از ساخت بدنه زیردریایی کاهش یافت. در سال ۱۹۸۴

۱- high strength low alloy

۲- aging

۳- high yield

فولاد HSLA-80 وارد بازار شد و پس از آن در سال ۱۹۹۰ فولاد HSLA-100 تولید انبوه شد. علاوه بر این، فولاد HSLA-100 با توجه به خاصیت مغناطیسی نرم (نیروی وادارندگی پایین) و نفوذپذیری مغناطیسی<sup>۱</sup> و مغناطش اشباع بالا جایگزین مناسبی برای فولادهای سیلیسیم دار است و می توان از آن ها در ساخت ترانسفورماتورها بهره برد [۸].

مواد فرومغناطیس نرم دارای نیروی وادارندگی مغناطیسی<sup>۲</sup> (Hc) پایینی نسبت به مواد سخت مغناطیسی هستند (شکل ۲). به عبارتی منحنی هیستریزس مغناطیسی فولادهای HSLA لاغر است. عوامل مختلفی بر نیروی وادارندگی اثر گذار هستند که مهم ترین آن ها نواقص شبکه و ناهمسانگردی هستند. یک ماده فرومغناطیس دارای حوزه های مغناطیسی است. بین هر حوزه مرز ظخیمی (حدود ۲۰ الی ۵۰ نانومتر) وجود دارد که به آن دیواره حوزه<sup>۳</sup> (DW) می گویند. زمانی که به یک ماده فرومغناطیس میدان مغناطیسی اعمال شود، حوزه ها با بردار مغناطش هم جهت با میدان شروع به رشد و حرکت می کنند. نواقص شبکه مانند نابجایی، مرزدانه، فاز ثانویه (رسوب) و حفره مانع از حرکت دیواره حوزه های مغناطیسی می شوند. عواملی که حرکت دیواره حوزه های مغناطیسی با مشکل رو به رو می سازد، موجب افزایش نیروی وادارندگی می شوند. علاوه بر این، عامل دیگری که باعث افزایش نیروی وادارندگی می شود، ناهمسانگردی شبکه است. فولادهای HSLA به دلیل ساختار فریتی با شبکه بلوری BCC اثر ناهمسانگردی بر نیروی وادارندگی جزئی دارند. به عبارتی بردار مغناطش در جهت آسان مغناطیسی به راحتی در جهت میدان قرار می گیرد. این ویژگی ناشی از اختلاف کم تعداد اتم ها در جهت های مختلف شبکه BCC است. علاوه بر این، عناصر مانند آلومینیم یا سیلیسیم در فولاد هستند که نه تنها بر نیروی وادارندگی بلکه بر جریان های گردابی<sup>۴</sup> یا توان تلف شده<sup>۵</sup> اثر گذار هستند. در ترانسفورماتورها که انرژی الکتریکی الکتریکی را به مکانیکی تبدیل می نماید، جریان های گردابی مانع از کارکرد مناسب آن ها می شوند. عناصری که مقاومت الکتریکی فولاد را افزایش می دهند (مانند آلومینیم، سیلیسیم و منگنز) باعث کاهش ایجاد جریان های گردابی می شوند. در قسمت زیر مروری مختصر بر اثر انواع عناصر آلیاژی بر خواص مغناطیسی فولادها ذکر شده است [۹].

---

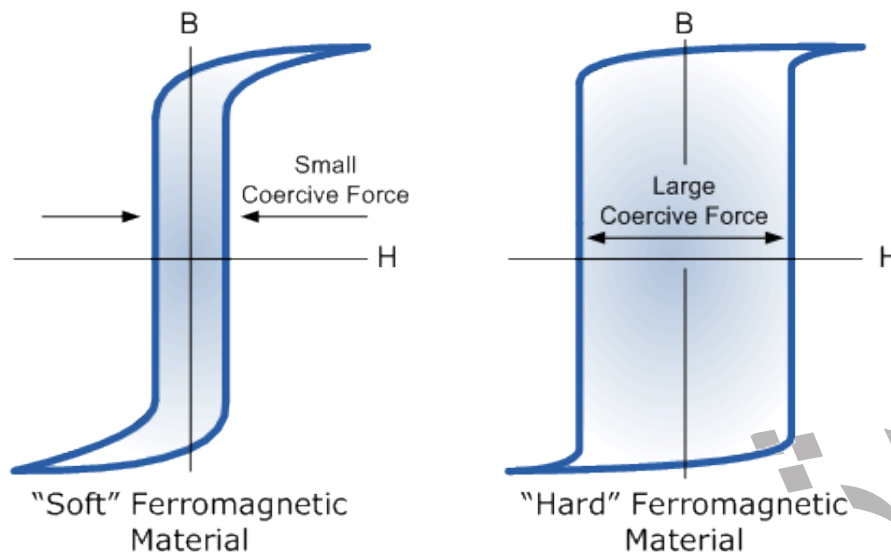
۱- permeability

۲- coercivity

۳- domain wall

۴- eddy current

۵- core loss



شکل ۲- منحنی پسماند مغناطیسی برای مواد با خاصیت مغناطیسی نرم و سخت.

#### ▪ کربن

کربن به میزان ۰/۰۲ درصد وزنی تا زیر دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد در آهن حل می شود [۱۰]. غلظت های بیش تر کربن به صورت فاز دوم سمنتیت در فولاد تشکیل می شوند. سمنتیت ها مانعی بر سر حرکت دیواره های حوزه های مغناطیسی محسوب می شوند. به عبارت دیگر سمنتیت انرژی دیواره حوزه های مغناطیسی را کاهش می دهد [۱۰].

#### ▪ گوگرد و منگنز

برای جلوگیری از تشکیل FeS در فولاد منگنز به فولاد افزوده می شود. اما گوگرد و منگنز هر یک به طور متفاوت بر خواص مغناطیسی و الکتریکی فولاد مؤثر هستند. با کاهش گوگرد در فولاد میزان تلف شده (جریان گردابی) کم می شود. با کم شدن گوگرد در فولاد میزان MnS کاهش می یابد. MnS مانع حرکت حوزه های مغناطیسی می شود. علاوه بر این با کاهش MnS دانه های زمینه فولاد رشد می کنند و مرزدانه کاهش می یابد. مرزدانه نیز خود یک مانع بر سر حرکت دیواره حوزه مغناطیسی محسوب می شود [۱۱]. افزایش منگنز موجب کاهش جریان گردابی از طریق افزایش مقاومت الکتریکی و به همین دلیل باعث کاهش تلف شده می شود. عناصر آلیاژی مانند آلومینیم و سیلیسیم که موجب افزایش مقاومت الکتریکی می شوند شبیه منگنز عمل می کنند.

#### ▪ تیتانیم

با افزایش میزان تیتانیم رسوبات کربونترییدی و آهن- تیتانیم- فسفر تشکیل می شود. رسوبات مانع از حرکت

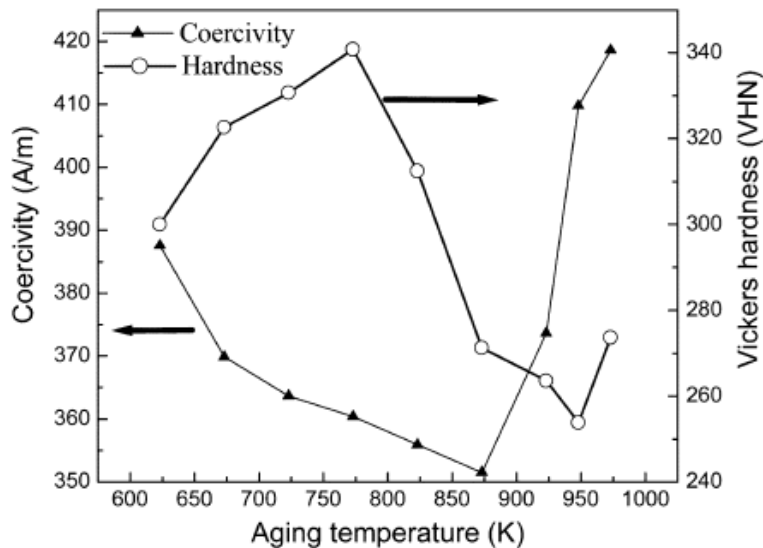
دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی می‌شود. همچنین حضور رسوبات در مرزخانه‌های فritی باعث خواهد شد که در تبلور مجدد دانه‌ها به صورت هم‌محور رشد نکنند و علاوه بر این اندازه دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود. کاهش اندازه دانه‌ها، افزایش مرزخانه‌ها در ساختار میکروسکوپی را به همراه دارد. با افزایش مرزخانه‌ها موانع بر سر حرکت دیواره‌ها زیاد و القای مغناطیسی کم می‌شود [۱۲]. عناصر آلیاژی کاربید/ نیتريدزا دیگر مانند وانادیم، نیوبیم و تنگستن این گونه عمل می‌کنند.

#### ▪ آلومینیم

در ورق‌های فولادهای کم‌کربن، توان تلف‌شده با افزایش میزان آلومینیم کاهش می‌یابد [۱۳]. کاهش توان تلف‌شده با افزایش آلومینیم در فولاد در اثر افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش جریان گردابی است. تغییرات میزان آلومینیم در ترکیب شیمیایی فولاد باعث تغییر اندازه دانه، بافت، میزان رسوبات AIN و مقاومت الکتریکی می‌شود.

#### ▪ مس

فولادهای HSLA-80 و HSLA-100 دو نوع از شاخص‌ترین فولادهای کم‌آلیاژ استحکام بالا هستند. این فولادها دارای عنصر مس بیش از ۱ درصد وزنی در ترکیب شیمیایی خود هستند. این فولادها، پس از عملیات ترمومکانیکی، آستنیت و سریع سرد می‌شوند. با انتخاب دمای پیرسازی پایین ناشی از رسوبات نانواندازه و کوهزنتی مس، می‌توان در کنار افزایش استحکام و سختی، نیروی وادارندگی را کنترل نمود. شکل ۳ تغییرات سختی و نیروی وادارندگی فولاد HSLA-100 را بعد هر دمای پیرسازی نشان می‌دهد [۱۴]. افزایش سختی و کاهش نیروی وادارندگی در دماهای پایین پیرسازی به ترتیب ناشی از ایجاد رسوبات کوهزنتی مس و کاهش تنش‌های باقی‌مانده در فولاد است. رسوبات مس ایجاد شده در دمای پایین به علت اندازه کوچک مانعی جدی بر دیواره حوزه‌های مغناطیسی محسوب نمی‌شوند. با افزایش دمای پیرسازی سختی و نیروی وادارندگی به ترتیب کم و زیاد می‌شوند. کاهش سختی ناشی از پدیده‌ی فراپیری و افزایش نیروی وادارندگی به علت بزرگ شدن رسوبات مس است [۱۴].



شکل ۳- تغییرات سختی و نیروی وادارندگی با دمای پیرسازی فولاد HSLA-100 [۱۴].

علاوه بر ترکیب شیمیایی، تاریخچه تهیه فولاد به شدت بر خواص مغناطیسی مؤثر است. خواص مغناطیسی همانند خواص مکانیکی فولاد وابسته به ریزساختار است. به عبارتی تغییرات در ریزساختار فولاد بر خواص مغناطیسی محصول اثر می‌گذارد. یکی از خواص ویژه مغناطیسی فولاد نیروی وادارندگی یا همان  $H_c$  است. نیروی وادارندگی وابستگی شدیدی به دیواره‌های حوزه دارد. دیواره حوزه‌های مغناطیسی در اثر اعمال میدان مغناطیسی حرکت می‌کنند و حرکت DW به ریزساختار فولاد وابسته است. مرزخانه‌ها، فاز دوم، چگالی نابجایی‌ها، حفره‌ها و جاهای خالی از جمله موانع موجود بر سر حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی است. حضور موانع موجود در ریزساختار موجب افزایش  $H_c$  شده است. بنابراین عملیات حرارتی، کار مکانیکی و جوش کاری در فولادها موجب تغییرات در ریز ساختار فولاد و بالطبع آن خواص مغناطیسی می‌شود. مثلاً دمای پایین در فرایند نورد سرد موجب می‌شود که چگالی نابجایی‌ها افزایش یابد. حضور جنگلی انبوه از نابجایی‌ها که در یک قفل شده‌اند، حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی را دچار مشکل می‌کند. به عبارتی نورد سرد باعث تغییر خواص مغناطیسی می‌شود که این تغییر خواص مغناطیسی ناشی از چگالی نابجایی‌ها است. بنابراین می‌توان بیان کرد که یکی از کاربردهای آشنایی با خواص مغناطیسی فولادها، بررسی غیرمخرب آن‌ها است. بررسی غیرمخرب مواد به کاهش هزینه‌ها و سرعت تولید کمک فراوانی می‌کند [۱۵].

## ۲- روش تحقیق

به منظور آشنایی با نحوه بررسی خواص مغناطیسی فولاد در این مطالعه به ارزیابی خواص مغناطیسی فولاد HSLA-100 ساخت داخل پرداخته شده است. فولاد HSLA-100 توسط صنعت بومی سازی مواد فلزی در شرکت فولاد اسفراین ریخته‌گری و در شرکت اکسین اهواز نورد و عملیات حرارتی شده است. عملیات حرارتی شامل دو مرحله بوده است؛ مرحله اول آستنیت‌شدن در دمای ۹۰۰ الی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و مرحله دوم،

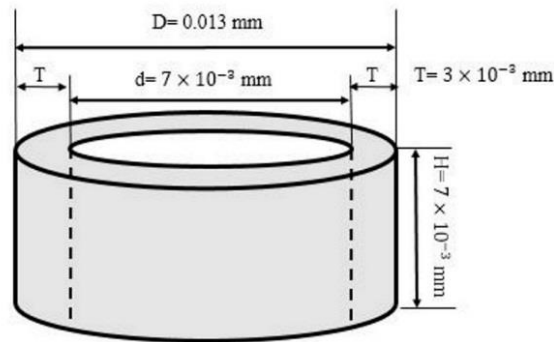


پیرسازی در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه. ترکیب شیمیایی توسط دستگاه نشر جرقه‌ای (کوانتومتری) مدل IERC ساخت شرکت اسپکتروم مکس آلمان، اندازه‌گیری و با استاندارد NAVSEA T9074 مقایسه شد (جدول ۲). همان‌طور که مشخص است اکثر عناصر تشکیل‌دهنده در محدوده استاندارد قرار دارند و فاصله گرفتن میزان عناصری همچون نیکل و گوگرد از محدوده استاندارد قابل اغماض است [۱۶].

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد HSLA-100 در مقایسه با استاندارد NAVSEA T9074

عناصر آلیاژی	C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	Cr	Nb	V	S	P	Fe
فولاد مورد تحقیق	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۸۸	۳/۹۱	۱/۵۵	۰/۶۴	۰/۵۶	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۹۲/۸۹
محدوده استاندارد	۰/۰۴ - ۰/۰۶	۰/۰۴ - Max	۰/۷۵ - ۱/۱۵	۳/۳۵ - ۳/۶۵	۱/۱۵ - ۱/۷۵	۰/۵۵ - ۰/۶۵	۰/۴۵ - ۰/۶۵	۰/۰۲ - ۰/۰۶	۰/۰۳ - Max	۰/۰۰۴ - Max	۰/۰۲ - Max	۹۱/۹۴ - ۹۳/۶۰

به منظور انجام فرایند عملیات حرارتی، فولاد در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه آستنیته و پس از سرمایش سریع در آب با دمای محیط، پیرسازی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه صورت گرفت. ریزساختار توسط میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA LMU ساخت شرکت تسکن جمهوری چک مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی منحنی پسماند مغناطیسی، از دستگاه مغناطومتر ارتعاشی (VSM) مدل ۷۴۰۰ ساخت شرکت کویرمگنت کاشان استفاده شد. آزمون VSM در دمای محیط با حداکثر میدان اعمالی ۱۰۰۰۰ اورستد انجام شد. برای انجام آزمون مغناطومتر ارتعاشی، نمونه‌ای به ابعاد ۴×۴×۰/۲ میلی‌متر مکعب تهیه شد. نمونه به انتهای یک میله غیرمغناطیسی که در بین دو آهنربای الکتریکی است، وصل و انتهای دیگر میله به یک ارتعاش‌کننده مکانیکی بسته شد. میدان مغناطیسی نمونه متحرک، یک پتانسیل (emf) در سیم‌پیچ‌های آشکارساز القاء می‌کند که بزرگی آن متناسب با گشتاور مغناطیسی نمونه است و در نتیجه مغناطش را اندازه‌گیری می‌کند. برای ارزیابی نفوذپذیری اولیه نسبی مغناطیسی از دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت القای مغناطیسی (LCR meter) مدل HM 8118 ساخت شرکت هامگ آلمان استفاده شد. جهت اندازه‌گیری ظرفیت القای مغناطیسی لازم بود نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شود که نمای سه‌بعدی آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمای سه بعدی نمونه اندازه گیری نفوذپذیری مغناطیسی.

ظرفیت القای مغناطیسی حالت اولیه، پس از سرمایش سریع و پیرسازی در بسامد یک کیلوهرتز در دمای محیط اندازه گیری شد. ارتباط نفوذپذیری اولیه نسبی با ظرفیت القای مغناطیسی در رابطه (۱) نشان داده شده است:

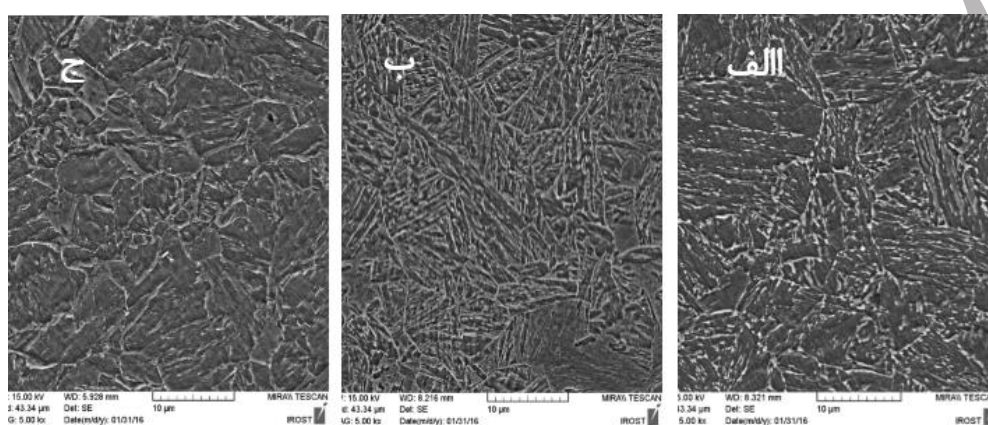
$$\mu_{ir} = \frac{l(L_{eff} - L_w)}{\mu_0 N^2 A} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\mu_{ir}$  نفوذپذیری اولیه نسبی در سامانه SI (بدون واحد)،  $l$  طول میانگین مسیر مغناطیسی هسته که از رابطه  $l = 2\pi \times \frac{d+D}{4}$  برابر با  $0.31$  متر محاسبه شد.  $L_{eff}$  ظرفیت القای مغناطیسی مؤثر هسته فولادی بر حسب میکرو هانری ( $\mu H$ ) که برای هر نمونه سه مرتبه اندازه گیری و میانگین آن بدست آمد.  $L_w$  ظرفیت القای مغناطیسی سیم پیچ با هسته هوا که برابر با  $0.07 \mu H$  اندازه گیری شد.  $\mu_0$  نفوذپذیری فضای آزاد، معادل  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m) است [۱۱].  $N$  تعداد دور سیم پیچ که برابر با  $10$  دور پیچیده شد.  $A$  مساحت مقطع هسته که از رابطه  $A = T \times H$  برابر با  $18 \times 10^{-6}$  متر مربع محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

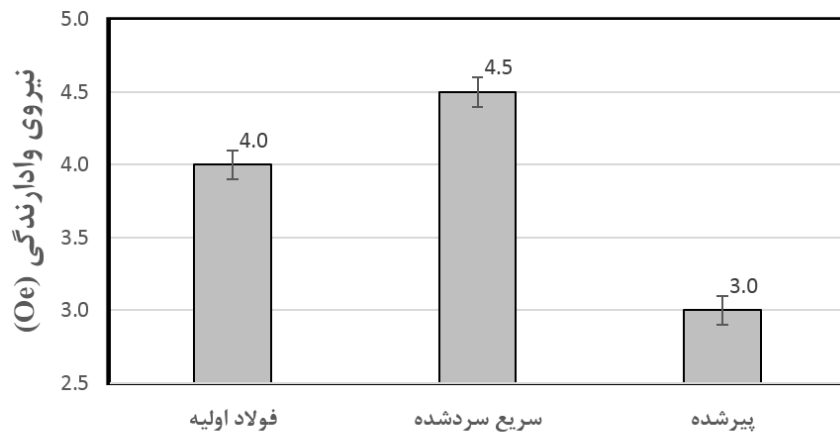
در شکل ۵ تصویر FESEM فولاد HSLA-100 در شرایط اولیه (الف)، سریع سرد شده (ب) و پس از پیرسازی (ج) را نشان می دهد. در ریزساختار حالت اولیه (شکل ۵-الف) که در فرایند تولید، تحت فرایند پیرسازی در دمای  $650$  درجه سانتی گراد قرار گرفته است، ساختار لایه ای مارتنزیتی مشخص است. در حالت سریع سرد شده (شکل ۵-ب) کسر حجمی ریزساختار لایه ای بیش تری نسبت به ریزساختار حالت اولیه مشاهده می شود. تصویر شکل ۵-ج مربوط به شرایط پس از فرایند پیرسازی در دمای  $600$  درجه سانتی گراد است که نشان می دهد ریزساختار لایه ای در مقایسه با حالت سریع سرد شده کاهش یافته است. همان طور که مشخص است، ریزساختار در حالت اولیه، سریع سرد شده در آب و بعد از پیرسازی عمدتاً مارتنزیت لایه ای است. با مقایسه شکل ۵-الف و ج با ب به نظر می رسد که با انجام فرایند پیرسازی، کسر حجمی ریزساختار لایه ای کاهش یافته است. کاهش کسر حجمی ریزساختار لایه ای در اثر پیرسازی، ناشی از بازپخت شدن فاز مارتنزیت است. علاوه بر این، با مقایسه

تصاویر ۵- الف و ج مشاهده می شود که ریزساختار حالت اولیه و پیرشده که هر دو تحت فرایند پیرسازی قرار گرفته اند، متفاوت است. مشخص است که ریزساختار لایه ای در فولاد اولیه ای که در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد پیرشده، بیش تر از حالت پیرسازی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد است. علت این امر در اثر تشکیل فازهای جدید در دماهای بالای پیرسازی است. به دلیل حضور برخی از عناصر آلیاژی، دمای تحول Ac<sub>1</sub> فولاد HSLA-100 نسبت به فولاد ساده کم کربن از ۷۲۸ درجه سانتی گراد به حدود ۶۴۰ درجه سانتی گراد کاهش یافته است. دمای پیرسازی ۶۵۰ درجه سانتی گراد که بیش از دمای تحول Ac<sub>1</sub> است، باعث تشکیل شدن آستنیت جدید که در ادامه در اثر سرد شدن به جزایر مارتنزیت تبدیل می شوند. تشکیل فاز جدید مارتنزیت باعث افزایش کسر حجمی ریزساختار لایه ای می شود [۱۷].



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الف) فولاد اولیه، ب) سریع سرد شده و ج) بعد از پیرسازی.

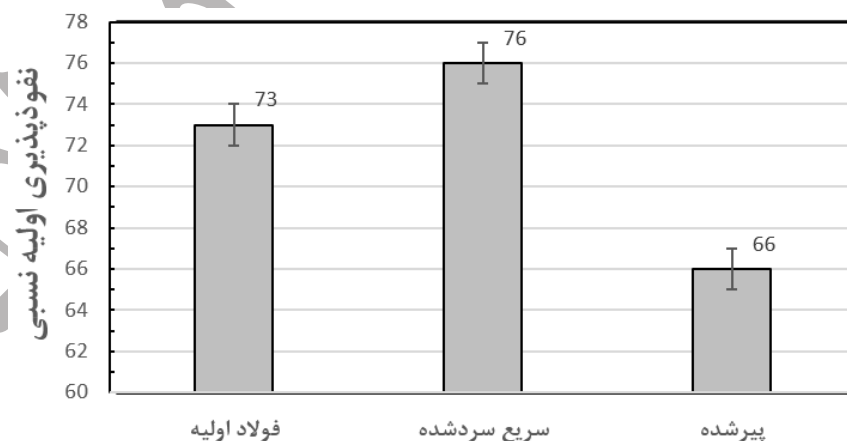
شکل ۶ نیروی وادارندگی مغناطیسی فولاد اولیه، سریع سرد شده و بعد از پیرسازی را نشان می دهد که به ترتیب با ۴/۰، ۴/۵ و ۳/۰ اورستد است. بیش ترین نیروی وادارندگی مربوط به شرایط پس از سرمایش سریع است. این امر ناشی از حضور فاز مارتنزیت با چگالی بالای نابجایی و ریزساختار لایه ای با فواصل اندک بین لایه ها است (شکل ۵). چگالی بالای نابجایی و میدان های تنش حاصل از آنها در مارتنزیت و همچنین حضور ریزساختار لایه ای، مانع از حرکت آسان DW می شود و نیروی وادارندگی را افزایش می دهد. کاهش نیروی وادارندگی در فرایند پیرسازی ناشی از کاهش چگالی نابجایی در مارتنزیت و افزایش میانگین فواصل لایه ها است (شکل ۵). مشاهده می شود که نیروی وادارندگی پس از فرایند پیرسازی، کم تر از فولاد اولیه است. افزایش نیروی وادارندگی در شرایط اولیه که در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد پیر شده، ناشی از خشن شدن رسوبات مس و ایجاد مارتنزیت جدید است. در دمای پیرسازی ۶۰۰ درجه سانتی گراد رسوبات مس وجود دارند ولی اندازه آنها کوچک تر از ضخامت DW است و مانع حرکت DW نمی شوند [۱۸، ۱۹].



#### شرایط فولاد

شکل ۶- نیروی وادارندگی فولاد اولیه، سریع سردشده و بعد از پیرسازی.

شکل ۷ نفوذپذیری اولیه نسبی مغناطیسی را بر اساس نوع عملیات حرارتی نشان می‌دهد. نفوذپذیر اولیه در فولاد اولیه، سریع سردشده در آب و پس از پیرسازی به ترتیب برابر با ۷۳، ۷۶ و ۶۶ بدست آمده است. همان‌طور که مشخص است نفوذپذیری در فولادهای پیرشده کاهش یافته است. کاهش نفوذپذیری در شرایط پیرشده ناشی از راسب شدن مس در زمینه است. رسوبات مس که به عنوان یک فاز ثانویه دیامغناطیس در زمینه توزیع شده‌اند، موجب کاهش نفوذپذیری مغناطیسی شده است. افزایش نفوذپذیری نسبی اولیه در فولاد اولیه که طی مراحل اصلی در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد پیرشده است، ناشی از نیروی وادارندگی بالا، بزرگ شدن رسوبات مس و کاهش تعداد مس در زمینه فولاد اولیه است



#### شرایط فولاد

شکل ۷- نفوذپذیری اولیه نسبی فولاد در شرایط مختلف.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱. عناصر کاربیدزا و نیتريدزا مانند تیتانیم، نیویم و تنگستن به دلیل ایجاد ممانعت بر حرکت دیوارهای

- حوزه‌های مغناطیسی، موجب افزایش نیروی وادارندگی مغناطیسی می‌شوند.
۲. عناصر آلیاژی که باعث افزایش مقاومت الکتریکی فولاد می‌شوند، مانند سیلیسیم، آلومینیم و منگنز موجب کاهش نیروی وادارندگی و توان تلف‌شده می‌شوند.
۳. با توجه به تصاویر الکترونی روبشی، پیرسازی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش کسر حجمی ریزساختار لایه‌ای شد.
۴. نیروی وادارندگی مغناطیسی فولاد اولیه، سریع سردشده و پس از پیرسازی به ترتیب برابر با ۴/۵، ۴/۵ و ۳/۵ اورستد به دست آمد. نفوذپذیری اولیه نسبی مغناطیسی فولاد اولیه، سریع سردشده و پس از پیرسازی به ترتیب برابر با ۷۲، ۷۶ و ۶۶ اندازه‌گیری شد. پیرسازی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش نیروی وادارندگی و نفوذپذیری اولیه نسبی شد.

#### منابع مراجعه

- [1] N.A. Spaldin, *Magnetic materials (fundamental and application)*, Cambridge University Press, New York, 2011.
- [2] B.D. Cullity, C.D. Graham, *Introduction to magnetic materials*, second ed., Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2th Edition, 2009.
- [3] S.K. Das, S. Tarafder, A.K. Panda, S.C.a.A. Mitra, *Magnetic and mechanical properties of Cu-strengthened aged HSLA-100 steel*, *Philosophical Magazine* 87 (2007) 5065-5078.
- [4] M.S. Rashid, *High strenght, low alloy*, *Science* 208 (1980) 862-869.
- [5] P.K. Ray, R.I. Ganguly and A.K. Panda, *Optimization of mechanical properties of an HSLA-100 steel through control of heat treatment variables*, *Materials Science and Engineering A346* (2003) 122-131.
- [6] Q. Liu and S. Zhao, *Cu precipitation on dislocation and interface in quenched-aged steel*, *MRS Communications* 2 (2012) 127-132.
- [7] S. Thompson, *A transmission electron microscopy investigation of reaustenitized-and-cooled HSLA-100 steel*, *Metallography Microstructure Analysis* 1 (2012) 131-141.
- [8] S.P. Narayan, V. Rao, S. Das and O. Mohanty, *Microstructural and magnetic studies on thermomechanically treated HSLA steel*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 88 (1990) 71-78.
- [9] M. Tarafder, I. Chattoraj, M. Nasipuri and A. Mitra, *Magnetic characterization of HSLA steel by power-law decay exponents of Barkhausen emission signal*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321 (2009) 1034-1038.
- [10] S. Habermehl, D.C. Jiles, C.M. Tellert, *Influence of heat treatment and chemical composition on the magnetic properties ferromagnetic steels*, *IEEE Transactions on Magnetics*, 21 (1985) 1909-1911.

- [11] T. Nakayama, N. Honjou, T. Minaga, H. Yashiki, Effects of manganese and sulfur contents and slab reheating temperatures on the magnetic properties of non-oriented semi-processed electrical steel sheet, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 23 (2001) 55-61.
- [12] T. Nakayama, T. Tanaka, Effects of titanium on magnetic properties of semi-processed non-oriented electrical steel sheets, *Journal of Materials Science*, 32 (1997) 1055-1059.
- [13] C.K. Hou, C.T. Hu, S. Lee, The effect of aluminum on the magnetic properties of lamination steels, *IEEE Transactions on Magnetics*, 27 (1991) 4305-4309.
- [14] A.K. Panda, S.K. Das, A. Mitra, D.C. Jiles, C.C.H. Lo, Evaluation of deformation behaviour of HSLA-100 steel using magnetic hysteresis technique, *IEEE Transactions on Magnetics* 42 (2006) 3264-3266.
- [15] S.K. Dhua, A. Ray and D.S. Sarma, Effect of tempering temperatures on the mechanical properties and microstructures of HSLA-100 type copper-bearing steels, *Materials Science and Engineering A* 318 (2001) 197-210.
- [16] T9074-BD-GIB-010\_0300 rev 2, Base materials for critical applications: requirements for low alloy steel plate-forgings, casting, shapes, bars and heads of HY-80/100/130 and HSLA80/100, NAVSEA Standards, Naval Sea System Command, United States, 2012.
- [17] L. Hu, S.J. Zhao and Q. Liu, The effect of size of Cu precipitation on the mechanical properties of microalloyed steel, *Materials Science & Engineering A* 556 (2012) 140-146.
- [18] A.N. Bhagat, S. Ranganathan and O.N. Mohanty, Electrical resistivity studies in low carbon and HSLA-100 steels, *Materials Science and Technology* 19 (2003) 343-346.
- [19] S.K. Das, S. Tarafder, A.K. Panda and S.C.A. Mitra, Magnetic and mechanical properties of Cu-strengthened aged HSLA-100 steel, *Philosophical Magazine* 87 (2007) 5065-5078.

**"جهت مطالعه مقالات جدید در زمینه صنعت آهن و فولاد و آشنایی با فناوری های نوین صنعت فولاد، به سایت پژوهشکده فولاد مراجعه نمایید."**

031-33913921  
031-33912588

SteelResearchCenter  
SRC.iut.ac.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان  
SRC@of.iut.ac.ir