7 Th INTERNATIONAL CONFERENCE on MATERIALS ENGINEERING and METALLURGY
TEHRAN - IRAN
OCTOBER 9-10 , 2018
iMat 2018
هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی
تهران – ایران ۱۸ و ۱۷ مهرماه ۱۳۹۷
و دوازدهمین کنفرانس مشترک
انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران

بررسی وابستگی مشخصه‌های حلقه هیسترزیس مغناطیسی به اندازه دانه به منظور مشخصه‌یابی غیرمخرب ریزساختار قطعات فولادی

امیرحسین معمارزاده[۱]، مهرداد کاشفی تربتی[۲]، سعید کهربایی[۳]، ایمان احدی اخلاقی[۴]

چکیده

اندازه دانه فریتی یکی از عوامل بسیار مهم و موثر بر خواص مکانیکی قطعات فولادی است. به طوری که یکی از راه‌های جداسازی قطعات معیوب و نامطلوب از لحاظ خواص مکانیکی مانند استحکام و چقرمگی بررسی اندازه دانه می باشد. روش‌های سنتی جهت تعیین اندازه دانه، شامل روش‌های مخرب متالوگرافی و پردازش تصاویر میکروسکوپی می‌باشد که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند. با توجه به اثر چگالی مرزهای دانه در شدت قفل کنندگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی در فرایند مغناطیسی کردن مواد، تغییر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی ماده اثر گذار می‌باشد. بنابراین در تعیین این مشخصه متالوژیکی می‌توان از روش‌های غیرمخرب پایه مغناطیسی مانند جریان گردابی، بارک هاوزن و هیسترزیس مغناطیسی بهره برد. در تحقیق حاضر، از هریک از ۵ نوع فولاد st37، CK15، CK20، CK35 و CK45، تعدادی نمونه تحت عملیات حرارتی متفاوت قرار داده شده تا اندازه دانه متفاوتی در آن‌ها ایجاد شود. در ادامه پس از اندازه‌گیری مشخصه‌های مربوط به حلقه هیسترزیس و برقراری ارتباط بین آن‌ها و نمونه‌ها با اندازه دانه متفاوت، پتانسیل روش غیرمخرب هیسترزیس مغناطیسی در تعیین اندازه دانه بررسی شد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهند که با استفاده از روش غیرمخرب پیشنهادی امکان تعیین اندازه دانه فریتی در فولادهای ساده کربنی وجود دارد.

کلمات کلیدی: آزمون غیرمخرب، اندازه دانه، فولاد ساده کربنی، عملیات حرارتی.

۱- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، amirhossein_memarzadeh@yahoo.com.

۲- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، m-kashefi@ferdowsi.um.ac.ir.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران، Kahrobaee@sadjad.ac.ir.

۴- استادیار، دانشکده برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران، i_a_akhlaghi@sadjad.ac.ir.

مقدمه

یکی از مهمترین عوامل موثر بر خواص فولادها، اندازه دانه می‌باشد. تغییر در اندازه دانه تحت تاثیر عواملی همچون عملیات حرارتی، کار مکانیکی و... به طور مستقیم خواصی همچون استحکام و چقرمگی فولاد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور مثال ریز کردن دانه تنها روشی است که می‌تواند همزمان استحکام و چقرمگی فولاد را افزایش دهد [۱]. متالوگرافی و مشاهدات میکروسکوپی جهت تعیین اندازه دانه، روش‌هایی مخرب، وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند که به طورمتداول به این منظور به کار می‌روند. بنابراین بهره‌گیری از روش‌هایی که به طور غیرمخرب، سریع و قابل اطمینان، قادر به شناسایی تغییرات ریز ساختاری باشند و بدین ترتیب فرآیندهای بازرسی و کنترل کیفیت قطعات را تسهیل نمایند، ضرورت می‌یابد [۲].

مطالعات نشان می‌دهد، روش‌های غیرمخرب پایه مغناطیسی شامل روش حلقه هیسترزیس مغناطیسی[۱]، جریان گردابی[۲] و بارک هاوزن[۳] حساسیت بسیار خوبی به ترکیب شیمیایی، ریزساختار و تنش‌های پسماند دارند. به همین دلیل، در موارد متعددی به منظور تعیین خواص ریزساختاری و مکانیکی به کار گرفته شده‌اند. به عنوان مثال، در چدن داکتیل [۳] و خاکستری [۵،۴] ارتباط خوبی بین سختی و خروجی آزمون جریان گردابی حاصل شد. در فولادها، تعیین عمق لایه کربن زدایی شده [۶]، تعیین درصد پرلیت فولاد [۷] و نیز درصد کربن سطح در فولادهای کربن‌دهی شده [۸] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی، انجام شده است. همچنین محاسبه کسر حجمی فاز آستنیت باقیمانده در فولاد ابزار D2 [۲]، کسر حجمی فاز مارتنزیتی [۹] در فولاد دوفازی، با روش بارک هاوزن، گزارش شده است. با استفاده از روش غیر مخرب هیسترزیس مغناطیسی نیز، تغییرات رسانایی و نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب عمق سخت شده برای فولادهای سخت‌کاری القائی شده اندازه‌گیری شده است [۱۰]. همچنین، اثر تغییرات ریزساختاری در فولادهای سخت‌کاری القایی شده AISI4140 بر شکل منحنی هیسترزیس [۱۱]، تغییر در مشخصه‌های حلقه هیسترزیس مربوط به نمونه‌های با عمق‌های سخت شده متفاوت از جنس فولاد CK45 که تحت عملیات سخت‌کاری القائی قرار گرفته بودند [۱۲]، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تغییرات ریزساختاری در حین بازپخت فولادهای ابزار [۲و۱۳]، شناسایی تغییرات ریزساختاری ناشی از فرایندهای بازیابی و تبلور مجدد [۱۴]، اثر اندازه دانه یا به عبارت دیگر تاثیر چگالی مرزدانه در پلی‌کریستال آهن خالص بر شکل منحنی هیسترزیس [۱۵]، با این روش گزارش شده است. تمامی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان دهنده توانایی روش‌های غیرمخرب الکترومغناطیسی در مشخصه‌یابی مواد می‌باشد. لذا در این پژوهش، به بررسی وابستگی مشخصه‌های حلقه هیسترزیس مغناطیسی به اندازه دانه قطعات فولادی خواهیم پرداخت.

---

[1] Magnetic hysteresis loop
[2] Eddy Current
[3] Barkhausen

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولادهای ST37، CK15، CK20، CK35 و CK45 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ (حاصل از آزمون کوانتومتری) استفاده شد. نمونه سازی توسط دستگاه وایرکات انجام شد و تمامی نمونه‌ها به ابعاد mm ۲/۵×۲۵×۱۰۰ تهیه شدند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی اندازه گیری شده فولادهای مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

عنصر	C	Si	S	P	Mn	Fe
ST37	0.06	0.223	0.004	0.004	0.197	باقیمانده
CK15	0.15	0.2	0.005	0.005	0.45	باقیمانده
CK20	0.24	0.252	0.045	0.045	0.55	باقیمانده
CK35	0.30	0.40	0.035	0.035	0.60	باقیمانده
CK45	0.45	0.2	0.003	0.003	0.5	باقیمانده

پس از نمونه‌سازی به منظور ایجاد ریزساختارهایی با اندازه دانه مختلف، عملیات حرارتی نرماله به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای $۹۲۵^{o}C$، $۹۷۵^{o}C$، $۱۰۲۵^{o}C$ و $۱۰۷۵^{o}C$ بر روی هر ۵ فولاد مورد مطالعه در آزمایشگاه عملیات حرارتی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. به منظور متالوگرافی، عملیات آماده سازی سطح انجام و سپس تمامی نمونه‌ها توسط محلول نایتال ۲٪ مورد حکاکی[1] قرار گرفتند و تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری موجود در آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، تهیه شد. برای محاسبه اندازه دانه فریتی و درصد فاز پرلیت، تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از نمونه‌ها توسط نرم افزار پردازش تصویر MIP مورد پردازش قرار گرفتند. به همین منظور، تعداد ۳ تصویر متالوگرافی از هر نمونه، پردازش و در نهایت نتیجه میانگین گزارش شد. سختی‌سنجی پس از عملیات نرماله توسط دستگاه سختی سنجی موجود در آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، در مقیاس راکول A و با سه مرتبه تکرار برای تمامی نمونه‌ها انجام شد و در نهایت میانگین سختی هر نمونه گزارش شد.

[1] Etch

آزمون غیرمخرب هیسترزیس مغناطیسی در آزمایشگاه تحقیقاتی بررسی‌های غیرمخرب پیشرفته مواد در دانشگاه صنعتی سجاد انجام شد. طرح شماتیک سیستم اندازه‌گیری به کار رفته در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سیستم اندازه‌گیری از یک یوک مغناطیسی شامل ورقه‌هایی با ضخامت ۰/۳ میلیمتر از جنس فولاد سیلیکونی با نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بالا استفاده شد. بر روی هرکدام از پل‌های یوک مغناطیسی (با سطح مقطع mm^2 ۱۰×۱۰)، یک سیم‌پیچ با تعداد ۱۵۰۰ دور سیم مسی به قطر ۰/۴۵ میلیمتر به عنوان سیم پیچ تحریک قرار داده شد تا با عبور جریان از آن‌ها، شار مغناطیسی در یوک و نهایتاً در نمونه مورد بررسی ایجاد شود. به منظور ایجاد شار مورد نیاز، امواج مثلثی شکل با فرکانس ۰/۱ هرتز توسط کارت دیجیتال به آنالوگ مدل PCI-1720U-AE تولید و پس از تقویت به دامنه ولتاژ ۱۰V/-۱۰V+ و ۱ آمپر رسیده و به دو سر سیم پیچ‌های تحریک اعمال شده و به شدت میدان مغناطیسی[1] (H) تبدیل می‌شود. همچنین بر روی هر پل یوک، یک سیم‌پیچ دیگر شامل ۱۰۰۰ دور سیم مسی به قطر ۰/۱ میلیمتر به عنوان سیم‌پیچ حس‌گر مورد استفاده قرار گرفت تا تغییرات شار ایجاد شده ناشی از فرایند مغناطیسی شدن نمونه‌های با ریزساختارهای متفاوت را ثبت کند. در نهایت مجموعه یوک و سیم‌پیچ‌های تحریک و حس‌گر بر روی نمونه‌های مختلف قرار گرفت تا پس از عبور شار تولیدی از قطعه، ولتاژ القایی احساس شده از سیم‌پیچ حس‌گر ($V(t)$) به کارت آنالوگ به دیجیتال (PCI-1714UL-BE) وارد شده و پس از پردازش با استفاده از روابط (۱) و (۲)، به چگالی شار مغناطیسی[2] (B) تبدیل شد.

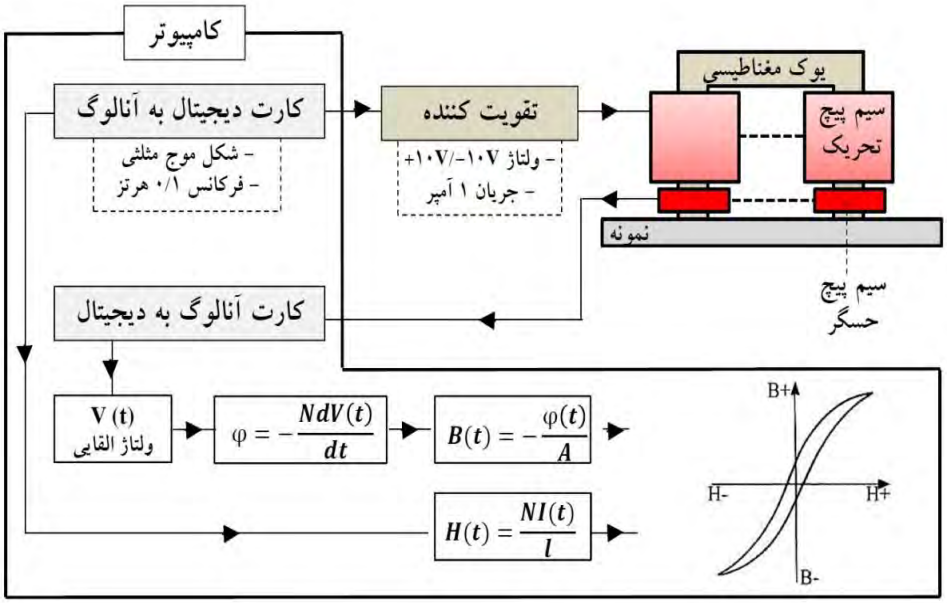
$$V(t) = -N\frac{d\varphi}{dt} \qquad (۱)$$

$$B = \frac{\varphi}{A} \qquad (۲)$$

که در این روابط φ، شار مغناطیسی تولید شده و A، سطح مقطعی از نمونه است که شار از آن عبور داده شده است. نهایتاً پس از بدست آمدن شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی، امکان رسم حلقه هیسترزیس فراهم می‌شود. پس از رسم حلقه‌های هیسترزیس، جهت تحلیل تغییرات در خواص مغناطیسی ناشی از عملیات حرارتی متفاوت، مشخصه‌های بیشینه چگالی شار مغناطیسی[3] (Bmax)، تلفات مغناطیسی[4] (Wh) و میدان وادارندگی[5] (Hc) به عنوان سه مشخصه مغناطیسی استخراج شدند. در ادامه به منظور شناسایی ارتباط میان خروجی‌های آزمون غیرمخرب و نتایج آزمون‌های مخرب از نرم‌افزار Exel استفاده شد. ضریب همبستگی ارتباط میان خروجی‌های غیر مخرب و نتایج مخرب (اندازه دانه و سختی) توسط این نرم‌افزار محاسبه و منحنی‌های مربوط رسم شدند.

---

[1] Magnetic Field Strength
[2] Magnetic Flux Density
[3] Maximum Magnetic Flux Density
[4] Hysteresis loss
[5] Coercivity

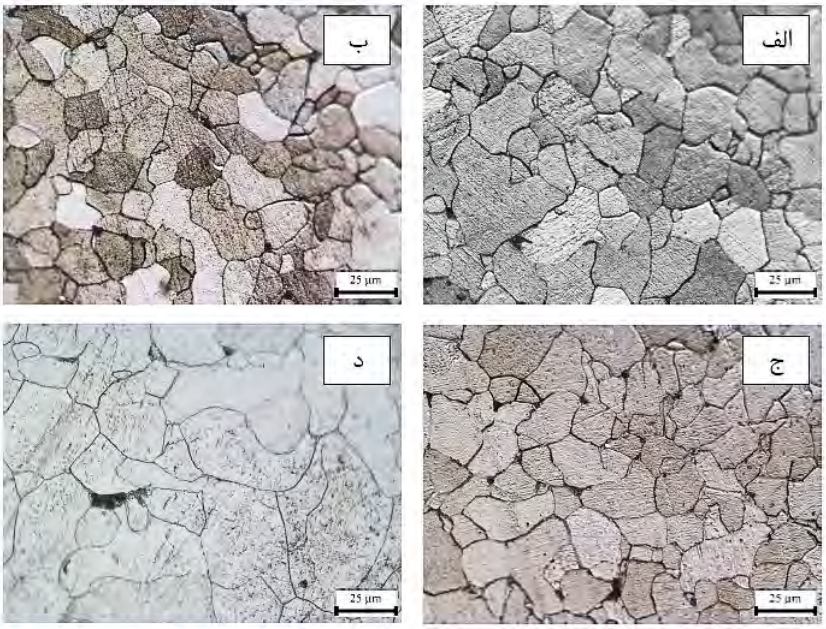


شکل ۱- شکل شماتیک سیستم غیرمخرب طراحی شده جهت رسم حلقه هیسترزیس مغناطیسی.

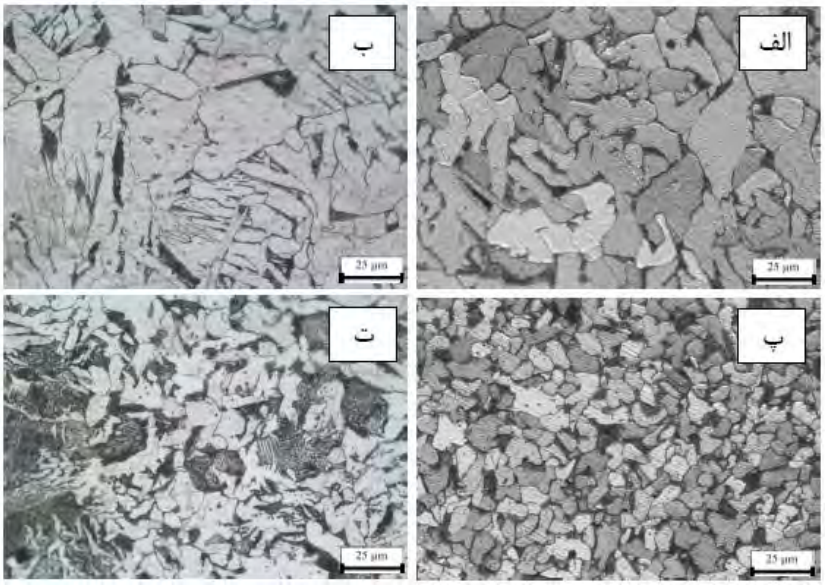
نتایج و بحث

نتایج بررسی‌های مخرب

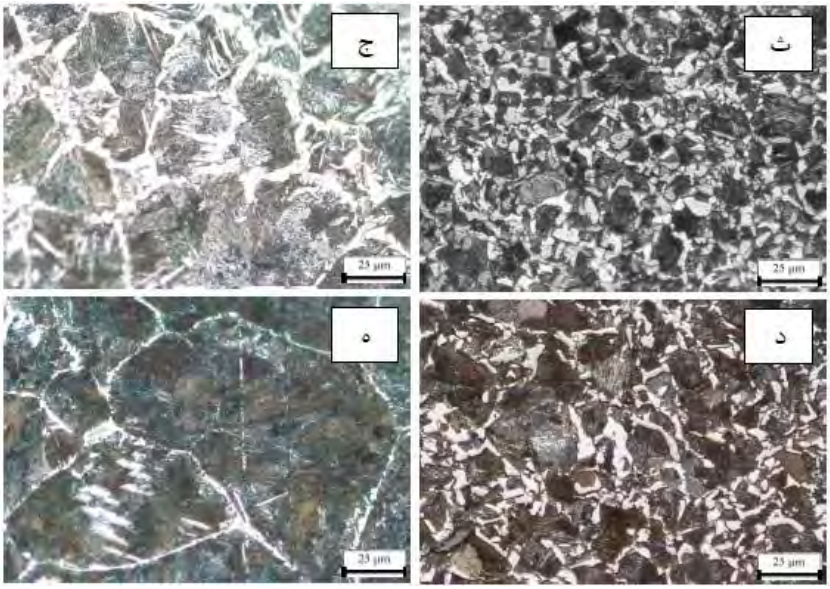
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه فولاد ST37 را پس از نرماله در دماهای مختلف، نشان می‌دهد. ساختار نمونه پس از عملیات نرماله، فریت (مناطق روشن)-پرلیت (مناطق تیره) می‌باشد. با توجه به اینکه فولاد مذکور دارای درصد کربن کمی می‌باشد، میزان پرلیت در ساختار آن بسیار ناچیز است و زمینه فریتی این فولاد به خوبی در تصاویر قابل مشاهده است. همچنین، در اثر افزایش دمای نرماله و رشد دانه‌های آستنیت، ساختار حاصل از نرماله، درشت‌تر خواهد شد. شکل ۲ الف تا ۲ د، درشت شدن ساختار و رشد دانه‌های فریتی در اثر افزایش دمای نرماله را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، ریزساختار تمام نمونه‌ها پس از نرماله فریت-پرلیت می‌باشد. افزایش دمای نرماله، همانطور که در مورد فولاد ST بحث شد، منجر به درشت شدن ساختار و افزایش اندازه دانه‌های فریتی شده است. همچنین، در اثر افزایش درصد کربن فولاد از ۰/۰۶٪ تا ۰/۴۵٪ میزان پرلیت (مناطق تیره) اقزایش یافته است، زیرا طبق دیاگرام تعادلی آهن-کربن، افزایش درصد کربن فولاد، منجر به افزایش میزان پرلیت در ساختار خواهد شد. جدول ۲، نتایج حاصل از محاسبه درصد حجمی فاز پرلیت تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول قابل مشاهده است، در یک دمای نرماله ثابت، در اثر افزایش درصد کربن فولاد (از ۰/۰۶٪ تا ۰/۴۵٪) درصد حجمی فاز پرلیت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.



شکل ۲- ریزساختار فولاد ST37 پس از نرماله در دمای الف) ۹۲۵°C، ب) ۹۷۵°C، ج) ۱۰۲۵°C و د) ۱۰۷۵°C.



شکل ۳- ریزساختار فولاد های مورد مطالعه پس از نرماله در کمترین و بیشترین دما، الف) فولاد CK15 نرماله در ۹۲۵°C، ب) فولاد CK15 نرماله در ۱۰۷۵°C، پ) فولاد CK20 نرماله در ۹۲۵°C، ت) فولاد CK20 نرماله در ۱۰۷۵°C.



ادامه شکل ۳- ریزساختار فولاد های مورد مطالعه پس از نرماله در کمترین و بیشترین دما، ث) فولاد CK35 نرماله در ۹۲۵°C، ج) فولاد CK35 نرماله در ۱۰۷۵°C، د) فولاد CK45 نرماله در ۹۲۵°C و ه) فولاد CK45 نرماله در ۱۰۷۵°C.

جدول ۲- درصدحجمی فاز پرلیت، محاسبه شده توسط نرم افزار MIP

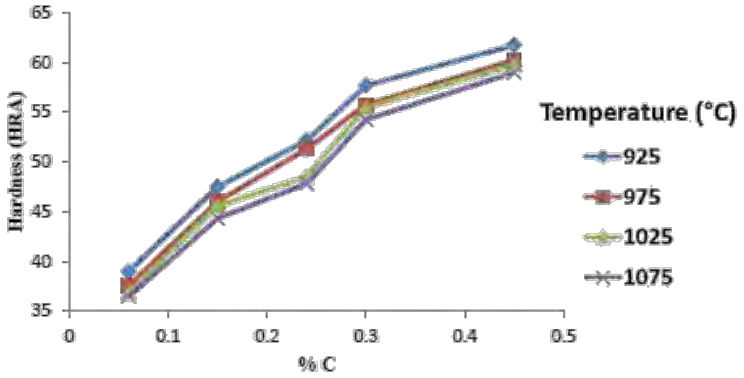
میانگین درصد حجمی فاز پرلیت (٪)		دمای نرماله (°C)			
		۹۲۵ °C	۹۷۵ °C	۱۰۲۵ °C	۱۰۷۵ °C
فولاد	ST14	۳/۹۵	۳/۴۳	۳/۱۸	۲/۹۴
	CK15	۱۳/۴۰	۱۲/۷۷	۱۲/۴۹	۱۲/۳۷
	CK20	۲۷/۵۰	۲۷/۳۶	۲۷/۳۱	۲۷/۰۱
	CK35	۶۲/۹۳	۶۲/۶۶	۶۱/۷۱	۶۱/۲۶
	CK45	۹۱/۴۹	۹۰/۴	۹۰/۳۴	۹۰/۲۷

نتایج حاصل از محاسبه میانگین اندازه دانه نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. البته به دلیل درصد ناچیز فاز فریت در فولاد CK45 پس از نرماله در هر ۴ دمای مورد مطالعه، و عدم امکان محاسبه اندازه دانه فریتی، نمونه‌های این فولاد در این بخش مورد مطالعه قرار نگرفتند. همانطور که در جدول قابل مشاهده است، افزایش در دمای نرماله برای یک فولاد ثابت، به دلیل تسریع فرآیند نفوذ و درشت شدن دانه‌های آستنیت، منجر به افزایش اندازه دانه فریتی شده است. این روند برای هر ۴ فولاد مورد بررسی قابل مشاهده است.

جدول ۳- میانگین اندازه دانه نمونه‌ها، محاسبه شده توسط نرم افزار MIP

میانگین اندازه دانه (μm)		دمای نرماله (°C)			
		۹۲۵ °C	۹۷۵ °C	۱۰۲۵ °C	۱۰۷۵ °C
فولاد	ST14	۱۱/۰۲	۱۱/۴۱	۱۱/۶۷	۱۶/۶۴
	CK15	۷/۲۸	۸/۱۹	۸/۳۳	۹/۴۷
	CK20	۳/۵۴	۳/۷۵	۳/۹۰	۴/۰۲
	CK35	۲/۱۹	۲/۳۰	۲/۵۵	۲/۶۴

شکل ۴، نتایج سختی‌سنجی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، افزایش در درصد کربن، در تمامی دماهای نرماله، به دلیل افزایش میزان پرلیت در ساختار منجر به افزایش سختی نمونه خواهد شد. همچنین در اثر افزایش دمای نرماله، به دلیل درشت شدن ساختار و افزایش اندازه دانه فریتی نمونه‌ها و کاهش چگالی مرزهای دانه، کاهش سختی را برای تمامی فولادها خواهیم داشت. این کاهش به دلیل افزایش قابل ملاحظه اندازه دانه نمونه‌ها در اثر افزایش دمای نرماله از ۹۲۵ °C به ۱۰۷۵ °C بطور واضحی در هر ۵ نمونه فولادی مشخص است.

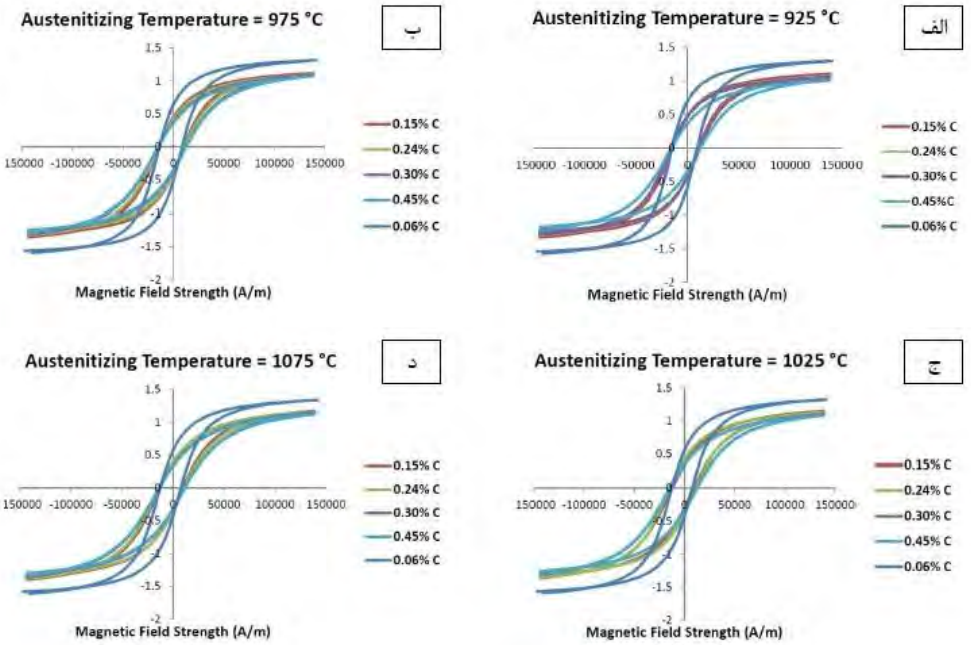


شکل ۴- تغییرات سختی بر حسب درصد کربن در ۴ دمای نرماله مختلف.

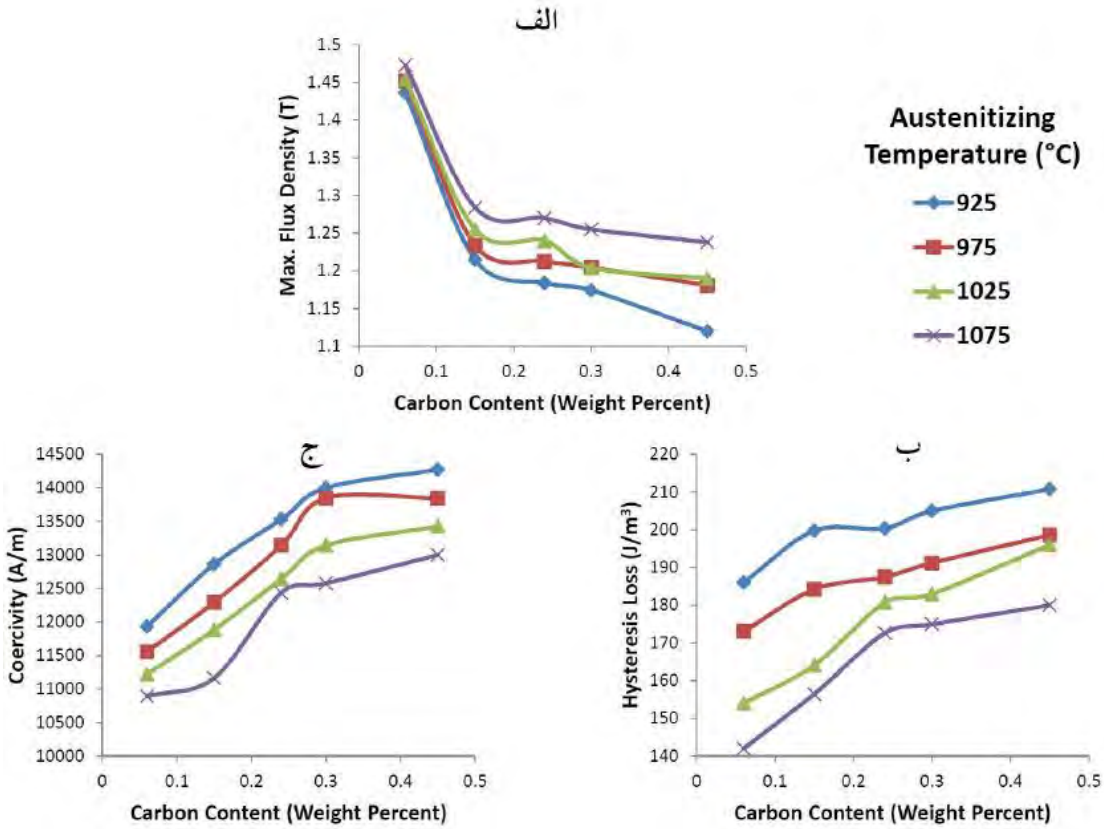
نتایج بررسی‌های غیر مخرب

شکل ۵، منحنی هیسترزیس رسم شده برای تمامی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، در اثر افزایش درصد کربن و دمای نرماله، شکل حلقه هیسترزیس تغییر خواهد کرد.

شکل ۶، تغییرات هر سه مشخصه استخراجی از حلقه هیسترزیس را بر حسب درصد کربن برای دماهای مختلف نرماله نشان می‌دهد. افزایش در درصد کربن فولاد، منجر به کاهش میزان بیشینه چگالی شار مغناطیسی در همه دماهای نرماله شده است (شکل ۴-۱۲ الف). دلیل این امر، افزایش میزان فاز پرلیت در اثر افزایش درصد کربن می‌باشد. چرا که با افزایش میزان پرلیت، مرز بین فازهای کاربید و فریت که به عنوان موانعی در برابر حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی، در فرایند مغناطیسی شدن عمل می‌کنند، افزایش یافته و در نتیجه فرایند مغناطیسی شدن را مشکل‌تر خواهد کرد و منجر به کاهش در میزان Bmax خواهد شد. علاوه بر این، افزایش درصد کربن به این دلیل که منجر به سخت‌تر شدن فرآیند مغناطیسی شدن نمونه خواهد شد، میزان تلفات مغناطیسی را افزایش خواهد داد (شکل ۴-۱۲ ب). همانطور که گفته شد، با افزایش درصد کربن، دیواره حوزه‌های مغناطیسی در روند مغناطیسی شدن برای حرکت با موانع بیشتری روبرو هستند و برای عبور از سد این موانع تلفات مغناطیسی افزایش خواهد یافت. به همین دلیل، یعنی حرکت سخت‌تر دیواره حوزه‌های مغناطیسی به دلیل وجود موانع، برای برگشتن به حالت اولیه (صفر شدن چگالی شار مغناطیسی در نمونه) نیز نیاز به میدان اعمالی بیشتری (میدان وادارندگی) در جهت عکس می‌باشند. لذا افزایش در میزان درصد کربن، بنا به دلایل گفته شده، افزایش در میزان میدان وادارندگی را نیز به دنبال دارد (شکل ۴-۱۲ ج).



شکل ۵- منحنی هیسترزیس رسم شده برای نمونه‌های با درصد کربن مختلف در دمای الف) ۹۲۵°C، ب) ۹۷۵°C، ج) ۱۰۲۵°C و د) ۱۰۷۵°C.

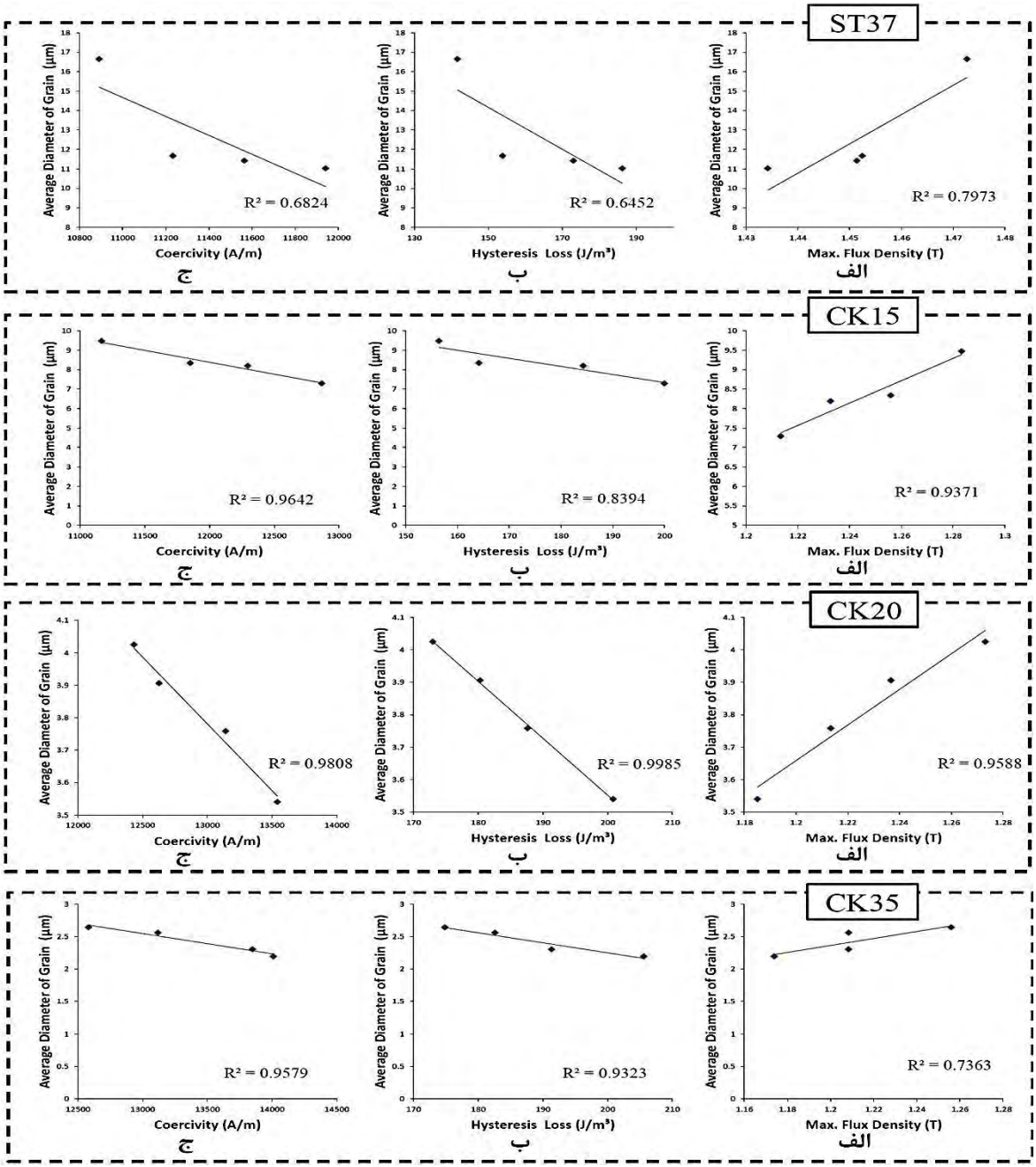


شکل ۶- تغییرات الف) بیشینه چگالی شار مغناطیسی، ب) تلفات مغناطیسی و ج) میدان وادارندگی بر حسب درصد کربن برای دماهای مختلف نرماله.

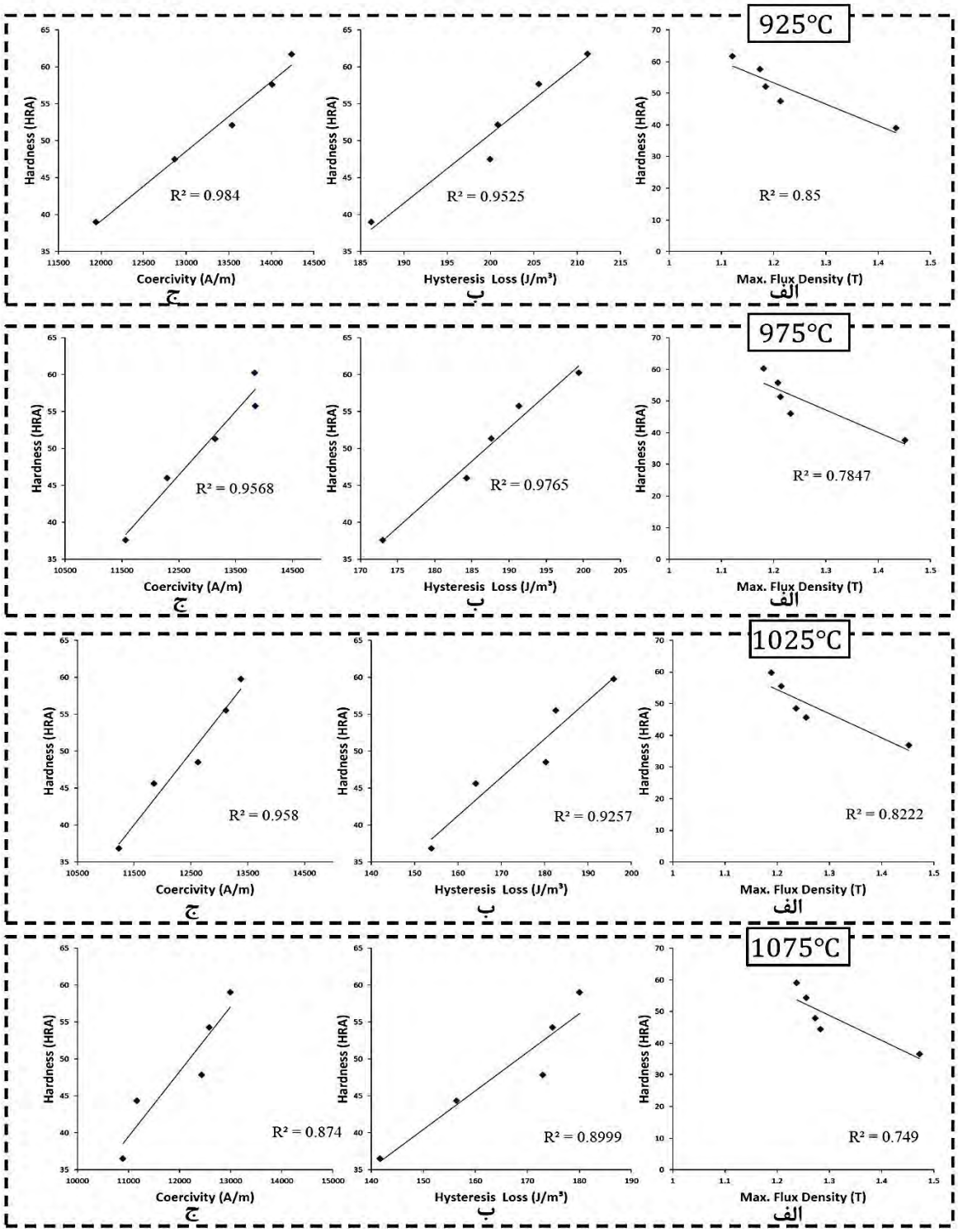
ارتباط نتایج آزمون غیرمخرب و خواص ریزساختاری

شکل ۷ ارتباط میان اندازه دانه محاسبه شده توسط نرم‌افزار MIP و بیشینه چگالی شار مغناطیسی، تلفات مغناطیسی و میدان وادارندگی را برای فولادهای مختلف مورد مطالعه نشان‌می‌دهد. برای هر ۵ فولاد مورد بررسی در این بخش، ارتباط میانگین اندازه دانه و هر سه خروجی آزمون غیرمخرب خطی است. البته ضریب همبستگی میان خروجی‌های مختلف آزمون غیرمخرب با میانگین اندازه دانه متفاوت است. برای فولادهای خانواده CK، از میان سه خروجی آزمون غیرمخرب هیسترزیس مغناطیسی، میدان وادارندگی با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۵ بهترین ارتباط را با میانگین اندازه دانه دارد. این در حالی است که برای فولاد ST37 نیز ارتباط خطی با ضریب همبستگی پایین‌تر نسبت به خانواده فولادهای CK وجود دارد. ارتباط میان سختی و خروجی‌های آزمون غیرمخرب مغناطیسی برای دماهای مختلف نرماله در شکل ۸ قابل مشاهده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، ارتباط خطی مناسبی بین خروجی‌های غیرمخرب و سختی وجود دارد. میدان

وادارندگی با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸۷ و تلفات مغناطیسی با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸۹ در هر ۴ دمای نرماله بهترین ارتباط را با سختی دارند.



شکل ۷- ارتباط میان میانگین اندازه دانه و الف) بیشینه چگالی شار مغناطیسی، ب) تلفات مغناطیسی و ج) میدان بازدارندگی، برای ۴ فولاد مورد مطالعه.



شکل ۸- ارتباط میان سختی و الف) بیشینه چگالی شار مغناطیسی، ب) تلفات مغناطیسی و ج) میدان بازدارندگی، برای ۴ دمای نرماله مورد مطالعه.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی ارتباط میان خروجی‌های آزمون غیر مخرب هیسترزیس مغناطیسی به خواص ریزساختاری و مکانیکی به ویژه اندازه دانه فولادها انجام شد. به همین منظور از سه مشخصه استخراج شده از حلقه هیسترزیس مغناطیسی یعنی بیشینه چگالی شار (Bmax)، تلفات مغناطیسی (Wh) و میدان وادارندگی (Hc) استفاده شد که مهمترین نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- با افزایش دمای نرماله، به دلیل درشت شدن ساختار و کاهش چگالی مرزهای دانه که موانعی بر سر راه مغناطیسی شدن نمونه هستند، میزان Bmax افزایش اما Wh و Hc کاهش یافته‌اند. این روند برای تمام فولادهای مورد بررسی در این پژوهش قابل مشاهده بوده است.

- با افزایش درصد کربن فولاد، ضمن افزایش در میزان پرلیت و سختی نمونه‌ها، روند مغناطیسی شدن نمونه‌ها سخت‌تر و Bmax کمتر خواهد شد. همچنین، تلفات مغناطیسی و میدان وادارندگی نیز افزایش خواهند یافت. در تمامی دماهای نرماله با افزایش درصد کربن فولاد این تغییرات مشاهده شده است.

- میدان وادارندگی ضریب همبستگی بالایی را بین هر سه خروجی آزمون غیر مخرب با اندازه دانه برای تمامی فولادهای مورد مطالعه در این پژوهش دارد. بنابراین، Hc این قابلیت را دارد که برای شناسایی تغییرات اندازه دانه فولادها پس از نرماله به کار گرفته شود.

- میدان وادارندگی و تلفات مغناطیسی ضرایب همبستگی بالایی برای شناسایی تغییرات سختی نمونه‌ها پس از نرماله در دماهای مختلف دارند. لذا برای شناسایی تغییرات سختی فولادها پس از نرماله، می‌توان از این دو مشخصه مغناطیسی استفاده نمود.

- خواص مغناطیسی فولادها به ویژه میدان وادارندگی و تلفات مغناطیسی تحت تاثیر تغییر در دمای نرماله و درصد کربن می‌باشند. لذا روش غیرمخرب هیسترزیس مغناطیسی که در این پژوهش بکار گرفته شده است می‌تواند به عنوان جایگزین روش‌های مخرب در شناسایی تغییرات اندازه دانه و سختی نمونه‌های فولادی پس از عملیات حرارتی نرماله قرار بگیرد.

مراجع

[1] G. E. Totten and M. A. Howes, *Steel heat treatment handbook*. CRC Press, 1997.

[2] S. Kahrobaee and M. Kashefi, "Assessment of retained austenite in AISI D2 tool steel using magnetic hysteresis and Barkhausen noise parameters," *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 24, no. 3, pp. 1192-1198, 2015.

[3] S. Konoplyuk, T. Abe, T. Uchimoto, T. Takagi, and M. Kurosawa, "Characterization of ductile cast iron by eddy current method," *NDT & E International,* vol. 38, no. 8, pp. 623-626, 2005.

[4] T. Uchimoto, T. Takagi, S. Konoplyuk, T. Abe, H. Huang, and M. Kurosawa, "Eddy current evaluation of cast irons for material characterization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 258, pp. 493-496, 2003.

[5] J. Čech, "Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods," *NDT International,* vol. 23, no. 2, pp. 93-102, 1990.

[6] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, and D. Chicot, "Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing," *NDT & E International,* vol. 39, no. 8, pp. 652-660, 2006.

[7] M. Kashefi, S. Kahrobaee, and M. H. Nateq, "On the relationship of magnetic response to microstructure in cast iron and steel parts," *Journal of materials engineering and performance,* vol. 21, no. 7, pp. 1520-1525, 2012.

[8] M. S. Amiri and M. Kashefi, "Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels," *NDT & E International,* vol. 42, no. 7, pp. 618-621, 2009.

[9] S. Ghanei, A. S. Alam, M. Kashefi, and M. Mazinani, "Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 607, pp. 253-260, 2014.

[10] M. Johnson, C. Lo, S. Hentscher, and E. Kinser, "Analysis of conductivity and permeability profiles in hardened steel," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX),* pp. 135-142, 2005.

[11] C. Zhang, N. Bowler, and C. Lo, "Magnetic characterization of surface-hardened steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 321, no. 23, pp. 3878-3887, 2009.

[12] C. Lo, E. Kinser, Y. Melikhov, and D. Jiles, "Magnetic Nondestructive Characterization of Case Depth in Surface Hardened Steel Components," in *AIP Conference Proceedings*, 2006, vol. 820, no. 1, pp. 1253-1260: AIP.

[13] S. Kahrobaee and T.-H. Hejazi, "A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 433, pp. 131-140, 2017.

[14] A. Martínez-de-Guerenu, K. Gurruchaga, and F. Arizti, "Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 316, no. 2, pp. e842-e845, 2007.

[15] J. Degauque, B. Astie, J. Porteseil, and R. Vergne, "Influence of the grain size on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* vol. 26, no. 1, pp. 261-263, 1982.