

ارزیابی غیرمخرب ریزساختار چدن مقاوم به سایش نایهارد ۴ با استفاده از آزمون جریان گردابی

امینه اسدی^۱، مجید عباسی^{۲*}، مریم شامغولی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (پست الکترونیکی: asadi.amine@gmail.com)

۲- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (پست الکترونیکی: abbasim@nit.ac.ir)

۳- کارشناس ارشد، مهندسی برق الکترونیک، مرکز رشد فناوری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، شرکت ایرانیان هیبرید شمال (پست الکترونیکی: maryamshamgholi@gmail.com)

Nondestructive evaluation of microstructure of wear resistance Ni-hard4 cast iron by eddy current technique

A. Asadi¹, M. Abbasi^{2*}, M. Shamgholi³

1. MSc, Department of Materials Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, E-Mail: asadi.amine@gmail.com

2. Assistant professor, Department of Materials Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, E-Mail: abbasim@nit.ac.ir

3. MSc of Electronics Engineering, Iranian Hybrid Company, Incubator Centre of Technology, Babol Noshiravani University of Technology, E-Mail: maryamshamgholi@gmail.com

چکیده

در این پژوهش از روش غیرمخرب جریان گردابی برای ارزیابی ریزساختار و سختی چدن آلیاژی مقاوم به سایش نایهارد ۴ استفاده شد. به این منظور نمونه‌ها برای دست‌یابی به ریزساختارها و سختی مختلف تحت عملیات حرارتی ناپایداری در دماهای ۷۵۰، ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰°C و زمان‌های ۱ الی ۵ ساعت قرار گرفتند. سپس عملیات تمپر به مدت ۳ ساعت در دمای ۳۰۰°C روی تمام نمونه‌ها انجام شد. ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری مجهز به نرم‌افزار آنالیز تصویر و میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. سختی نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی به روش سختی‌سنجی ویکرز اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌ها از طریق آزمون غیرمخرب جریان گردابی در فرکانس‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور دست‌یابی به یک شرایط بهینه بازرسی، ارتباط میان توابع خروجی جریان گردابی (نظیر شاخص‌های مقاومت القایی و مقاومت الکتریکی) و پارامترهای ریزساختاری و سختی در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. مشاهده شد که بین میزان آستنیت باقیمانده و سختی با خروجی آزمون جریان گردابی رابطه مناسبی برقرار است و فرکانس‌های ۱۵۰kHz و ۱۷۰kHz به ترتیب برای بررسی میزان آستنیت باقیمانده و سختی مناسب است. نتایج نشان داد با استفاده از این روش می‌توان سریع و دقیق نمونه‌های مختلف چدن نایهارد ۴ را از نظر میزان آستنیت باقیمانده و سختی شناسایی و تفکیک کرد.

واژه‌های کلیدی: جریان گردابی، چدن نایهارد، ارزیابی غیرمخرب، ریزساختار، سختی.

Abstract

In this paper, the nondestructive eddy current test method was used for evaluation of microstructure and hardness of Ni-Hard4 wear resistant alloyed cast iron. For the purpose, the destabilizing heat treatment at 750, 800, 850 and 900°C for 1 to 5h were done and then tempering heat treatment were applied on Ni-Hard4 cast iron blocks at 300°C for 3 hours. Microstructure characteristics were evaluated by optical microscopy (OM) equipped with the image analysis software and scanning electron microscopy (SEM). Hardness measurements were done by Vickers method. Then eddy current technique was applied at several frequencies. To achieve an optimum situation for evaluation, relation between eddy current outputs (such as inductive reactance and electrical resistance indexes) and microstructural parameters and hardness values were analyzed. Results show that a good relation exists between eddy current outputs and retained austenite amount and hardness and 150 kHz and 170 kHz are optimal frequencies for investigation of retained austenite and hardness, respectively. This shows eddy current technique has a high potential for prediction of metallurgical properties and could be used as an in-line inspection and quality control systems.

Keywords: Eddy current, Ni-Hard cast iron, Nondestructive evaluation, Microstructure, Hardness.

مقدمه

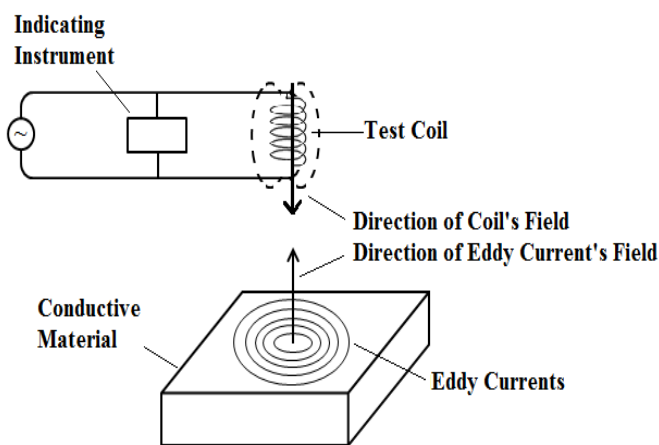
آزمون جریان گردابی بر پایه القای الکترومغناطیسی است. جریان متناوبی که از یک سیمپیچ عبور می‌کند، یک میدان مغناطیسی متغیر در سیمپیچ ایجاد می‌کند. اگر سیمپیچ در نزدیکی رسانای فلزی قرار گیرد، میدان مغناطیسی وارد ماده شده، جریان دایره‌ای (گردابی) مطابق شکل ۱ در آن القا می‌شود. این جریان القایی خود شار مغناطیسی ایجاد می‌کند که جهت آن مخالف با شار مغناطیسی سیمپیچ است [۱]. این شار برگشتی تحت تاثیر پارامترهای الکترومغناطیسی مانند نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت الکتریکی است که این دو خود تحت تاثیر ترکیب شیمیایی و تغییرات ریزساختاری مانند فازهای متالورژیکی، اندازه دانه، تنش‌های داخلی و ... می‌باشند [۲]. حساسیت بالای این روش به ریزساختار و سرعت بالای آن در ارائه پاسخ، باعث توجه روز افزون صنایع به این روش بازرسی برای کنترل کیفی قطعات تولیدی شده است. در این کار تحقیقاتی از روش بازرسی غیرمخرب جریان گردابی برای بررسی ریزساختار و سختی چدن مقاوم به سایش نایهارد استفاده شد.

چدن‌ها مواد منحصر به فرد تریبولوژیکی هستند و در محدوده وسیعی از کاربردها، مخصوصاً در مواردی که مقاومت به سایش مهم است، استفاده می‌شوند. این چدن‌ها زمینه متنوعی را از پرلیت تا مارتنزیت، شامل می‌شوند [۳]. نایهارد یک اسم عمومی برای خانواده‌ای از چدن‌های سفید آلیاژی شامل نیکل و کروم است که سختی و مقاومت به سایش بالایی دارند [۴]. در این چدن‌های سفید مارتنزیتی، نیکل عنصر آلیاژی اولیه است و در محدوده ۵-۳٪ مانع تبدیل آستنیت به پرلیت می‌شود و حین سرمایش در قالب مقادیری فاز مارتنزیت تشکیل می‌شود. چدن نایهارد نوع ۴ حاوی مقادیر بالای کروم، در محدوده ۷-۱۱٪ است. به دلیل مقدار بالای کروم در چدن نایهارد، کاربرد کروم یوتکتیک M_7C_3 به صورت غیرپیوسته تشکیل می‌شود. در نتیجه این چدن‌ها حاوی زمینه عمدتاً آستنیتی به همراه کاربیدهای یوتکتیک و مقادیری مارتنزیت در حالت ریختگی هستند [۵، ۶]. این چدن‌ها معمولاً تحت عملیات

ناپایدارسازی آستنیت در دماهای بالای 750°C ، برای افزایش مقادیر فازهای سخت (مارتنزیت و کاربید) و سپس عملیات تمپر برای تنش‌زدایی و افزایش چقرمگی، قرار می‌گیرند [۷، ۸]. خان و همکاران [۸] از آزمون جریان گردابی برای محاسبه درصد پرلیت فولادهای ساده کربنی استفاده کردند. نتایج نشان داد با افزایش میزان پرلیت خروجی جریان گردابی (امپدانس) افزایش می‌یابد. بررسی ریزساختار چدن داکتیل با آزمون جریان گردابی توسط کنوپل یوک نشان داد تغییرات درصد پرلیت، ترکیب شیمیایی، مورفولوژی گرافیت و دانه‌بندی روی نتایج آزمون تاثیر گذار است [۹]. جواهری و همکاران [۱۰] اثر دمای تمپر بر ریزساختار یک فولاد هایپریوتکتوئیدی کم آلیاژ را با کمک آزمون جریان گردابی مورد بررسی قرار دادند. کاشفی و همکاران [۱۱] توانستند بین سختی، درصد کربن و درصد پرلیت نمونه‌های فولادی و چدنی با خروجی آزمون جریان گردابی رابطه برقرار کنند. مشاهده شد با افزایش درصد پرلیت، درصد کربن و سختی ولتاژ خروجی کم می‌شود. ناطق و همکاران [۱۲] با این روش توانستند عمق لایه سخت‌شده در نمونه‌های چدنی را محاسبه و ارزیابی کنند. نتایج نشان داد با افزایش ضخامت لایه سخت شده امپدانس کاهش می‌یابد. کهربایی و همکاران [۱۳] توانستند با بهره‌گیری از فرکانس و خروجی بهینه آزمون جریان گردابی، پروفیل سختی قطعات سخت‌کاری القایی از جنس فولاد ۱۰۴۵ را رسم کنند. هدف این تحقیق، طراحی یک سامانه بازرسی غیرمخرب برای ارزیابی میزان آستنیت باقی‌مانده و سختی قطعات ریختگی از جنس چدن نایهارد ۴ است که پس از ریخته‌گری، تحت عملیات حرارتی سخت‌کاری و تمپر قرار می‌گیرد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا نمونه‌های ریختگی چدن نایهارد ۴ در ابعاد $1/5 \times 2/5 \times 3/5$ سانتی‌متر مطابق شکل ۲ (الف) تهیه شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در چهار دمای ۷۵۰، ۸۰۰، ۸۵۰ و 900°C مدت ۱، ۲، ۴ و ۵ ساعت تحت عملیات ناپایدارسازی قرار گرفته و سپس در هوای ساکن سرد شدند. در ادامه عملیات تمپر در دمای 300°C به مدت ۳ ساعت



شکل ۱- اساس کار جریان گردابی [۱]

آزمون غیرمخرب جریان گردابی از طریق پراب مستقل، هسته فريتی، با قطر ۳ میلیمتر و محدوده فرکانس ۲۰۰ kHz- ۵۰ روی نمونه‌ها انجام شد. آزمون برای تمام نمونه‌ها در دمای محیط و پرش^۲ صفر و در فرکانس‌های مختلف انجام شد و با کمک آنالیز رگرسیون فرکانس بهینه برای بازرسی نمونه‌ها انتخاب شد. در این کار تحقیقاتی از دستگاه آزمون غیرمخرب جریان گردابی ساخت شرکت ایرانیان هیبرید شمال استفاده شد (شکل ۲ (ب)).

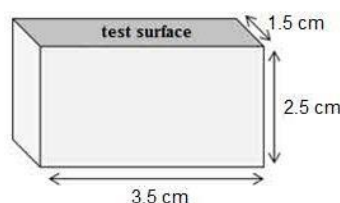
روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. سختی قبل و پس از عملیات حرارتی به روش ویکرز تحت نیروی ۳۰ کیلوگرم، با ۵ مرتبه تکرار، اندازه‌گیری شد. بعد از عملیات حرارتی، نمونه‌ها سنباده و پولیش شده و سپس با محلول ویللا^۱ شامل ۵ میلی‌لیتر HCl و یک گرم اسیدپیکریک در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول، اچ شدند. مطالعات ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری مجهز به نرم‌افزار آنالیز تصویر MIP4 و میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز پراش اشعه ایکس انجام شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده

Fe	Mo	Cr	Ni	P	S	Mn	Si	C
باقیمانده	۰/۲۷	۸/۶۸	۵/۸۸	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۵۸	۱/۸۴	۲/۸۵



(ب)



(الف)

شکل ۲- الف) نقشه ابعادی نمونه‌ها (ب) دستگاه آزمون غیرمخرب جریان گردابی ساخت شرکت ایرانیان هیبرید شمال

نتایج و بحث

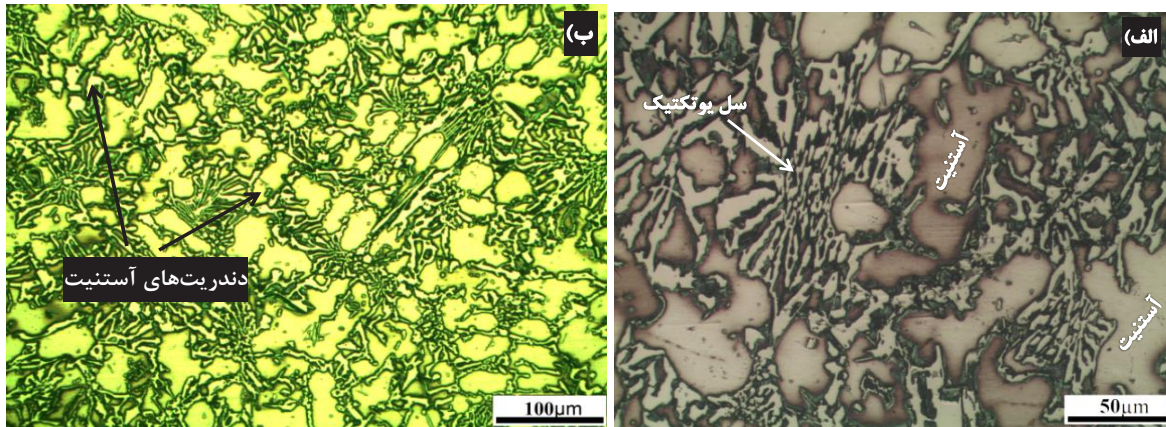
۱- بررسی ریزساختار

جدول ۲ نتایج آنالیز فازی و سختی نمونه‌ها را در حالت ریختگی و پس از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش دما و زمان ناپایداری سازی میزان فاز آستنیت باقی‌مانده کاهش و سختی به تدریج افزایش یابد. مطابق شکل ۳، چدن نایه‌ارده در حالت ریختگی شامل زمینه عمدتاً آستنیتی به همراه کاربیدهای یوتکتیک و مقادیری فاز مارتنزیت است. انجماد این آلیاژ با رشد دندریتی جوانه‌های آستنیت همراه است. با پیشرفت انجماد، مذاب باقی‌مانده با انجام واکنش

یوتکتیک به آستنیت و کاربید M_7C_3 تبدیل می‌شود [۱۵، ۱۴]. پس از پایان انجماد، کاربیدهای ثانویه در زمینه آستنیت رسوب کرده و سبب کاهش کربن در مذاب باقی‌مانده می‌شود. به این ترتیب دمای تشکیل مارتنزیت افزایش یافته، مقداری فاز مارتنزیت تشکیل می‌شود [۱۵-۱۷]. با انجام عملیات ناپایداری سازی به تدریج عناصر کربن و کروم از ساختار زمینه خارج و کاربیدهای ثانویه رسوب می‌کنند. در نتیجه فاز آستنیت ناپایدار شده و در حین سرد شدن تبدیل به مارتنزیت می‌شود.

جدول ۲- نتایج آنالیز فازی و سختی سنجی نمونه‌ها

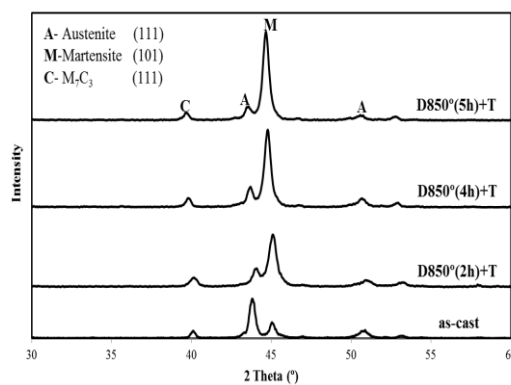
شماره نمونه‌ها	شرایط عملیات حرارتی	سختی ویکرز	آستنیت باقیمانده (%)
۱	ریختگی	۴۶۷	۶۶
۲	D750(1h)+T	۵۲۰	۵۵
۳	D750(2h)+T	۵۴۸	۵۰
۴	D750(4h)+T	۵۷۲	۲۴
۵	D750(5h)+T	۶۱۰	۲۶
۶	D800(1h)+T	۵۳۰	۵۵
۷	D800(2h)+T	۵۵۵	۵۳
۸	D800(4h)+T	۵۸۴	۲۶
۹	D800(5h)+T	۶۲۴	۲۳
۱۰	D850(1h)+T	۵۵۰	۵۲
۱۱	D850(2h)+T	۵۸۰	۴۲
۱۲	D850(4h)+T	۵۹۰	۳۲
۱۳	D850(5h)+T	۶۱۹	۳۰
۱۴	D900(1h)+T	۵۵۲	۵۹
۱۵	D900(2h)+T	۵۸۲	۵۵
۱۶	D900(4h)+T	۵۹۵	۴۸
۱۷	D900(5h)+T	۵۵۸	۵۴



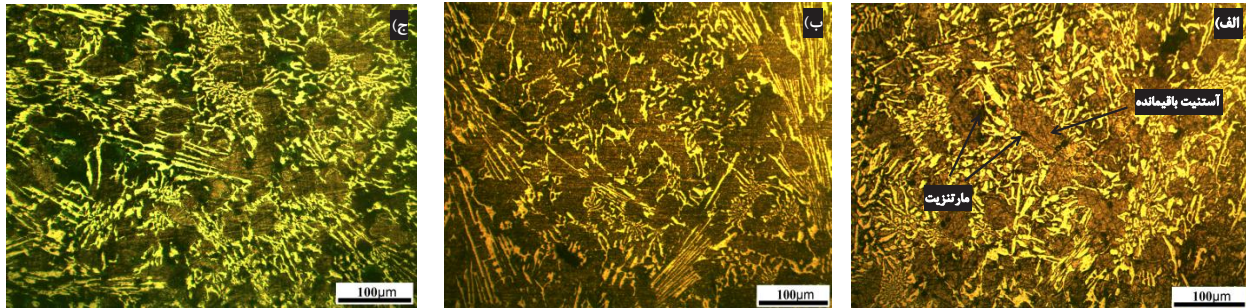
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه ریختگی در دو بزرگ‌نمایی

شکل ۶ تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های ناپایداری شده در دو دمای 750°C و 900°C در مدت ۲ ساعت را نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهد که با انجام عملیات حرارتی، کاربیدهای یوتکتیک بدون تغییر مورفولوژی باقی‌مانده و کاربیدهای ثانویه درون زمینه آستنیتی جوانه زده و رشد می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که در دمای پایین کاربیدهای ثانویه سوزنی شکل است و با افزایش دمای ناپایداری کاربیدها ادغام و کروی می‌شوند. افزایش بیش از حد دمای ناپایداری باعث انحلال کاربیدهای ثانویه می‌شود که نتیجه آن کاهش سختی است. انجام عملیات تمپر می‌تواند سختی را کاهش دهد. این کاهش سختی، برآیند تمپر شدن مارتنزیت، تبدیل آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت و تشکیل کاربیدهای ثانویه حین تمپر است [۱۴-۱۷].

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها را پس از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. با افزایش زمان ناپایداری مقدار کاربیدهای ثانویه افزایش یافته و درصد بیشتری از آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. فاز مارتنزیت به صورت مناطق سیاه رنگ درون فاز قهوه‌ای رنگ آستنیت باقیمانده قابل مشاهده است. اما ساختار نهایی همواره شامل مقادیری آستنیت باقی‌مانده است. شکل ۵ نتایج آنالیز XRD مربوط به نمونه ریختگی و عملیات حرارتی شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در حالت ریختگی ساختار عمدتاً آستنیتی به همراه مقادیری مارتنزیت و کاربیدهای یوتکتیک است. اما پس از عملیات حرارتی، آستنیت تبدیل به مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه شده و مقدار آن کاهش می‌یابد اما مارتنزیت و کاربیدهای یوتکتیک M_7C_3 ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۵- نمودار آنالیز XRD نمونه‌ها در حالت ریختگی و پس از ناپایداری در دمای 850°C در زمان‌های ۲، ۴ و ۵ ساعت



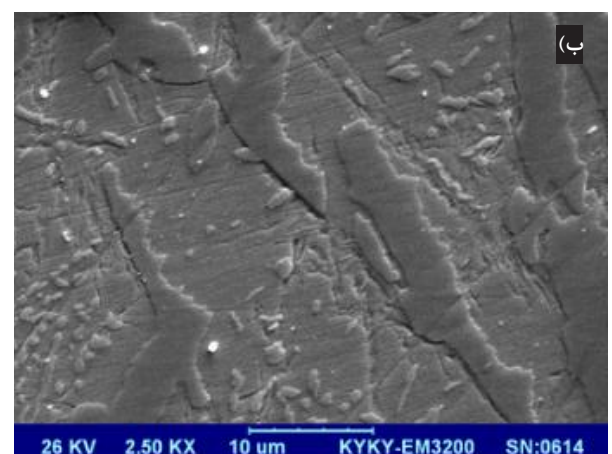
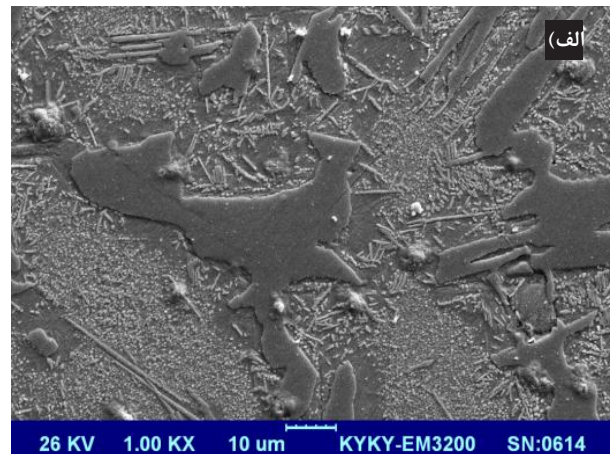
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری پس از عملیات حرارتی با مقادیر مختلف آستنیت باقیمانده:
 الف) ۴۸٪ (نمونه ۱۶) ب) ۳۳٪ (نمونه ۹) ج) ۲۶٪ (نمونه ۵).

۲- بررسی سختی

مطابق جدول ۲ با افزایش دما و زمان ناپایداری، سختی افزایش می‌یابد. این افزایش سختی مربوط به کاهش میزان آستنیت باقی‌مانده و افزایش میزان مارتنزیت و کاربید ثانویه است [۱۶، ۱۷]. سختی مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه بیشتر از آستنیت است (حداکثر سختی مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه به ترتیب ۹۰۰ و ۱۰۰۰ ویکرز است در حالی که سختی آستنیت ۵۰۰ ویکرز است) [۴]. به همین دلیل با کاهش آستنیت، سختی افزایش می‌یابد. اما در دمای 900°C پس از ۵ ساعت ناپایداری، سختی به علت کاهش مارتنزیت و افزایش آستنیت باقی‌مانده کاهش می‌یابد [۱۶]. شکل ۷ تغییرات متوسط وزنی سختی را بر حسب میزان آستنیت باقی‌مانده نشان می‌دهد. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد با افزایش آستنیت باقیمانده سختی کاهش می‌یابد. با استفاده از این نمودار می‌توان میانگین سختی را در محدوده آستنیت باقی‌مانده‌های مختلف تخمین زد.

۳- آزمون جریان گردابی

آزمون جریان گردابی در محدوده فرکانس‌های ۲۰۰-۵۰۰ kHz انجام شد. خروجی دستگاه شامل نمودار صفحه امپدانس و مقادیر عددی شاخص مقاومت القایی (X_L)، شاخص مقاومت الکتریکی (R)، شاخص امپدانس (Z) و زاویه فازی (θ) است. شکل ۸ نمودار صفحه امپدانس نمونه‌ها را در فرکانس



شکل ۶- تصاویر SEM از نمونه‌های ناپایداری شده در دماهای:
 الف) 750°C و ب) 900°C در مدت ۲ ساعت.

جدول ۳ نتایج آنالیز رگرسیون و مقادیر ضریب همبستگی را در فرکانس‌های مختلف و براساس توابع خروجی جریان گردابی نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که برای ارزیابی سختی، فرکانس ۱۷۰kHz و تابع شاخص امپدانس (Z) بالاترین ضریب همبستگی و بهترین شرایط ارزیابی را فراهم می‌کند. همچنین فرکانس ۱۵۰kHz و شاخص زاویه فازی (θ) برای ارزیابی آستنتیت باقیمانده نمونه‌ها مناسب است. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب شرایط مناسب برای ارزیابی میزان آستنتیت باقیمانده و سختی نمونه‌های چدن ناپهارد را بر اساس شاخص‌های جریان گردابی نشان می‌دهد.

شکل ۹ نشان می‌دهد که با کاهش میزان آستنتیت باقیمانده، شاخص زاویه فازی افزایش می‌یابد. بر اساس روابط ۱ الی ۳، می‌توان زاویه فازی را محاسبه کرد [۱].

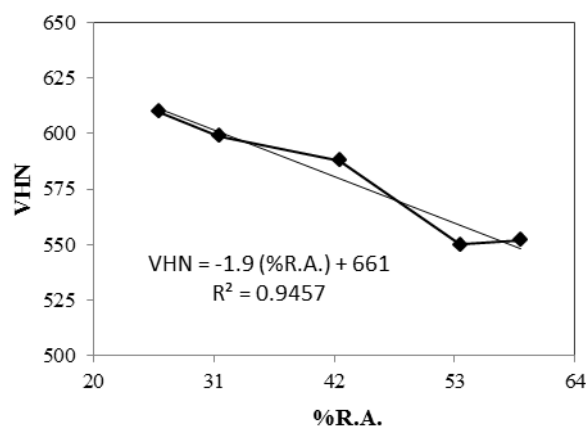
$$\theta = \text{Arctan}(X_L/R) \quad (1)$$

$$L = \mu N^2 A / \ell \quad (2)$$

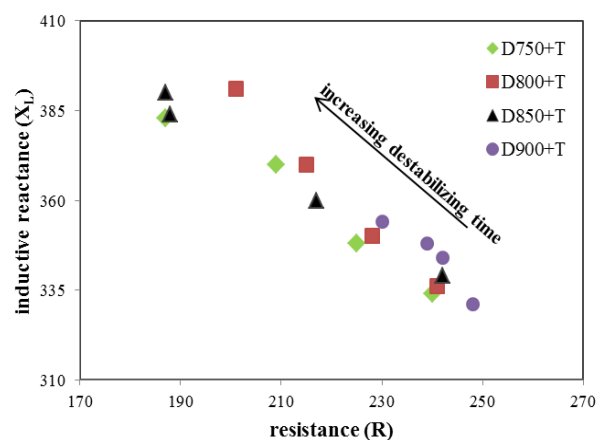
$$X_L = 2\pi f L \quad (3)$$

در این روابط، N تعداد دور سیم‌پیچ، A سطح، ℓ طول سیم‌پیچ و f فرکانس آزمون است. آستنتیت فاز پارامغناطیس و مارتنزیت فرومغناطیس است. نفوذپذیری مغناطیسی (μ) مواد فرومغناطیس بسیار بیشتر از مواد پارامغناطیس است. به همین دلیل با کاهش آستنتیت باقیمانده و افزایش مارتنزیت، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) کاهش می‌یابد [۱۹، ۱۸]. با توجه به

۱۷۰kHz نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زمان ناپایداری شاخص مقاومت القایی افزایش و مقاومت الکتریکی (R) کاهش می‌یابد. در این نمودار، معرف رسانایی است و می‌توان گفت با افزایش زمان ناپایداری، رسانایی کاهش می‌یابد.



شکل ۷- نمودار تغییرات متوسط وزنی سختی بر حسب آستنتیت باقیمانده



شکل ۸- نمودار نقشه امپدانس نمونه‌ها در فرکانس ۱۷۰kHz

جدول ۳- نتایج آنالیز رگرسیون در فرکانس‌های مختلف

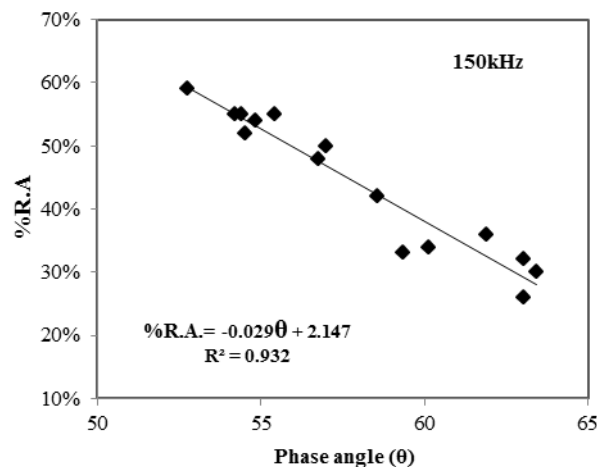
ضریب همبستگی (R^2)								تابع
ارزیابی آستنتیت باقیمانده				ارزیابی سختی				
۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۲۰۰	۱۷۰	۱۵۰	۱۳۰	f (kHz)
۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۴۱	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۴۰	X_L
۰/۵۲	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۸۶	۰/۲۱	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۳۰	θ
۰/۲۹	۰/۷۹	۰/۴۸	۰/۱۳	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۲۷	۰/۳۲	Z

X_L و R است. یکی از عوامل موثر بر سختی، کسر حجمی و سختی فازهای تشکیل‌دهنده است. سختی فاز مارتنزیت بیشتر از آستنیت است. بنابراین با کاهش مقدار آستنیت باقیمانده و افزایش فاز مارتنزیت، سختی افزایش می‌یابد [۴]. مارتنزیت، فاز فرومغناطیس است و با افزایش آن هم X_L و هم سختی به شدت افزایش می‌یابد [۲۲-۲۵]. از طرفی با کاهش آستنیت باقیمانده، R کاهش و X_L افزایش می‌یابد. لذا مطابق رابطه ۴ [۱۰۲] مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش X_L بیشتر از کاهش R است. بنابراین با افزایش سختی، امپدانس افزایش می‌یابد.

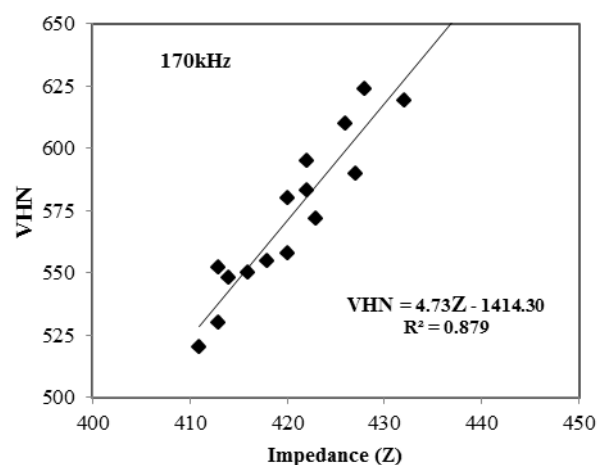
$$Z = (X_L^2 + R^2)^{1/2} \quad (۴)$$

شکل ۱۱، اثر زمان و دمای عملیات حرارتی ناپایداری سازی آستنیت بر شاخص‌های مقاومت القایی (X_L) و مقاومت الکتریکی (R) در فرکانس ۱۷۰ kHz را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱-الف، مشاهده می‌شود با گذشت زمان در دماهای ۷۵۰°C و ۸۵۰°C، مقاومت القایی افزایش می‌یابد اما در دمای ۹۰۰°C پس از گذشت ۴ ساعت، مقاومت القایی افت می‌کند. با انجام عملیات ناپایداری سازی، آستنیت باقیمانده تبدیل به مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه شده و مقدار آن کاهش می‌یابد. در دمای ۹۰۰°C به علت پایداری آستنیت و کاهش استحاله مارتنزیتی، نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت القایی کاهش می‌یابد [۲۵].

در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود که با افزایش زمان در دماهای ۷۵۰°C و ۸۵۰°C، شاخص R (شاخص رسانایی) کاهش می‌یابد، هر چند در دمای ۸۵۰°C تغییرات بسیار کمتر از دمای ۷۵۰°C است. اما پس از گذشت ۴ ساعت ناپایداری سازی در دمای ۹۰۰°C، مقاومت زیاد می‌شود. تشکیل کاربیدهای ثانویه و مارتنزیت، از حرکت آسان الکترون‌ها جلوگیری کرده و رسانایی نمونه‌ها را کاهش می‌دهند [۱۹ و ۲۰]. اما در دمای ۹۰۰°C به علت کاهش میزان مارتنزیت و ادغام و کروی شدن کاربیدهای ثانویه، شاخص رسانایی، افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش شاخص R است.



شکل ۹- نمودار و رابطه کالیبراسیون برای بازرسی غیرمخرب آستنیت باقیمانده بر حسب شاخص زاویه فازی در فرکانس ۱۵۰ kHz.



شکل ۱۰- نمودار و رابطه کالیبراسیون برای بازرسی غیرمخرب سختی بر حسب شاخص امپدانس در فرکانس ۱۷۰ kHz.

روابط ۲ و ۳، با کاهش نفوذپذیری مغناطیسی، مقاومت القایی کاهش می‌یابد. همان طور که گفته شد، R شاخصی از رسانایی فلز مورد آزمون است. کاربیدهای ثانویه و فازهای تیغه‌ای مارتنزیت رسانایی را کاهش می‌دهند [۲۰، ۲۱]. بنابراین با کاهش آستنیت باقیمانده، X_L افزایش و R کاهش می‌یابد، در نتیجه زاویه فازی نیز افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که با افزایش سختی، امپدانس (Z) زیاد می‌شود. مطابق رابطه ۴، امپدانس (Z) تابع

بازرسی برای کنترل کیفیت ریزساختار و سختی قطعات ریختگی و عملیات حرارتی شده چدن نایهارد ۴ باشد. مقادیر بالای ضریب همبستگی ($R^2 > 0.88$) نشان می‌دهد این آزمون یک روش بازرسی غیرمخرب با دقت بالا است.

۲. دو شاخص زاویه فازی (θ) و امپدانس (Z) به علت بررسی تاثیر هم‌زمان R و X_L ، به ترتیب شاخص‌های مناسب جریان گردابی برای ارزیابی میزان آستنیت باقی‌مانده و سختی هستند.

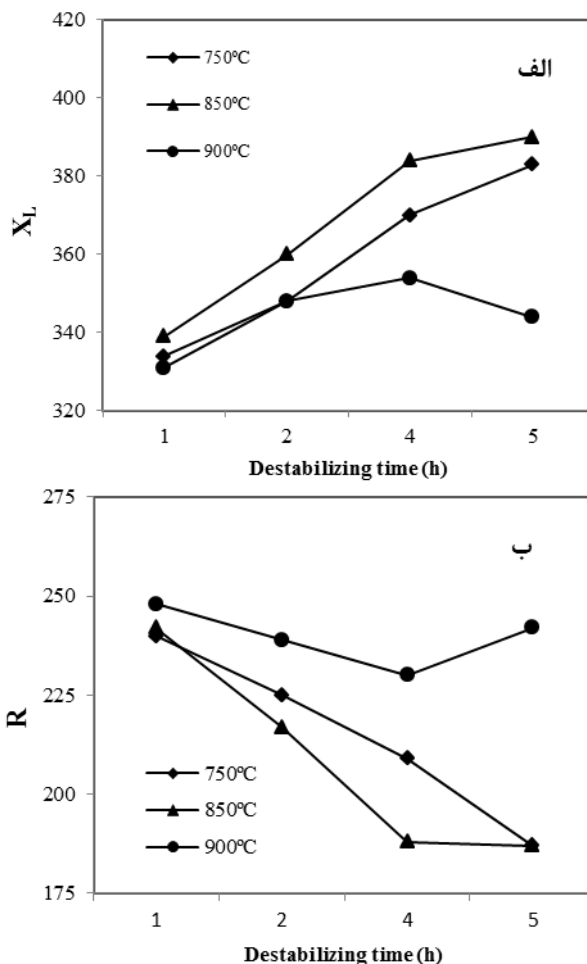
۳. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی (R^2)، فرکانس مناسب برای ارزیابی آستنیت باقیمانده ۱۵۰kHz و برای ارزیابی سختی ۱۷۰kHz بدست آمد.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Vilella
- 2 Lift off

منابع و مراجع

- [1] Eddy Current Testing at Level 2: Training guidelines for non-destructive testing, Vienna, International Atomic Energy Agency, 99-111, 2011.
- [2] C.J. Hellier, Handbook of nondestructive evaluation, The New York. McGraw-Hill, 2003.
- [3] ASM metals handbook, Vol. 15, 1484-1483, 2005.
- [4] L. George, G. Richard, R. Klaus, Abrasion-resistant cast iron handbook, American Foundry Society, 50-60, 2000.
- [5] M. Mohammadnezhad, V. Javaheri, M. Shamanian, M. Naseri, M. Bahrami, Effects of vanadium addition on microstructure, mechanical properties and wear resistance of Ni-Hard4 white cast iron, Materials and Design; Vol.49, 888-893, 2013.
- [6] M. Filipovic, M. Kamberovic, M. Korac, M. Gavrilovski, Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of white cast iron alloys, Metals and Materials International, Vol.19, 473-481, 2013.
- [7] R. Klaus, Ni-hard material data and application, Nickel Development Institute, 17-19, 1996.
- [8] S.H. Khan, F. Ali, A. Nusair-Khan, M.A. Iqbal, Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 200, 316-318, 2008.
- [9] S. Konoplyuk, Estimation of pearlite fraction in ductile cast irons by eddy current method”, NDT&E



شکل ۱۱- اثر زمان و دمای ناپایداری سازی (الف) بر شاخص مقاومت القایی (ب) بر شاخص مقاومت الکتریکی (R) در فرکانس ۱۷۰kHz

نتیجه‌گیری

در بررسی‌های متالورژیکی این تحقیق مشاهده شد که با انجام عملیات حرارتی ناپایداری سازی آستنیت و تمپر، کاربیدهای ثانویه در زمینه رسوب کرده و آستنیت تبدیل به مارتنزیت می‌شود. در نتیجه آستنیت باقیمانده کاهش و سختی نسبت به حالت ریختگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان ناپایداری سازی در دمای ۹۰۰°C به علت پایداری آستنیت و ادغام و کروی شدن کاربیدهای ثانویه سختی کاهش می‌یابد. در ادامه در مرحله ارزیابی‌های غیرمخرب ریزساختار و سختی، این کار تحقیقاتی نشان داد که:

۱. آزمون غیرمخرب جریان گردابی می‌تواند یک روش

- [18] S.S.M. Tavares, S.R. Mello, A.M. Gomes, J.M. Neto, M.R. dasilva, J.M. Pardal, X-ray diffraction and magnetic characterization of the retained austenite in a chromium alloyed high carbon steel, *Journal of Materials Science*, Vol.41: 4732–4736, 2006.
- [19] M. Ahmed, I. Nasim, H. Ayub, F.H. Hashmi, A.Q. Khan, Mechanical stability and magnetic properties of austenite, *Journal of Materials Science*, Vol. 30, 6257-6266, 1995.
- [20] C. Ajust, S.S.M. Tavares, M.R. Silva, R.R.A. Corte, Magnetic properties and retained austenite quantification in SAE 4340 steel, *Revista Matéria*, Vol. 14, No. 3, 993–999, 2009.
- [21] H.R. Bakhsheshi-Rad, A. Monshi, H. Monajatizadeh, M.H. Idris, M. Rafiq A. Kadir, H. Jafari, Effect of multi-step tempering on retained austenite and mechanical properties of low alloy steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol.18, 49-56, 2012.
- [22] M. Sheikh-Amiri and M. Kashefi, Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels, *NDT&E International*, 42, 618-621, 2009.
- [23] م. کاشفی، س. کهربائی، ص. مسلمی مهنی، تعیین غیرمخرب میزان کاربید، سختی و عمق سخت شده در سطح قطعات، علوم و مهندسی سطح، شماره ۱۸، ۲۳-۳۱، ۱۳۹۲.
- [24] م. عباسی، م. جواهری، م. شامقلی، س.م. ریاضی، "کنترل کیفیت غیرمخرب قطعات کربونیترووره شده با آزمون جریان گردابی: مطالعه موردی ارزیابی سختی قطعه پیستونی روی فنر سوپاپ"، سومین کنفرانس بین المللی آزمون های غیر مخرب ایران، ۲ و ۳ اسفندماه ۱۳۹۴، ایران، تهران، هتل المپیک، IRNDT 2016.
- [25] A. F. Mulaba-Bafubandi, F. B. Waanders, C. Jones, Retained austenite phase in (26.5%Cr, 2.6%C) white cast iron studied by means of CEMS and eddy current, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 455–462, 2002.
- International, Vol. 43, 360–364, 2010.
- [10] م. جواهری، م. عباسی، م. ریاضی، ر. عشقیان، "اثر دمای تمپر بر پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی"، هشتمین همایش مشترک و سومین کنفرانس بین المللی مواد مهندسی و متالورژی، آبان ۱۳۹۳.
- [11] M. Kashefi, S. Kahrobaee, M. H. Nateq, On the relationship of magnetic response to microstructure in cast iron and steel parts, *ASM International*, Vol. 21, 520–1525, 2011.
- [12] M.H. Nateq, S. Kahrobaee, M. Kashefi, Use of eddy-current method for determining the thickness of induction-hardened layer in cast iron, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 55, 27-31, 2013.
- [13] س. کهربائی، م. کاشفی، بهره گیری از فرکانس ها و خروجی های بهینه آزمون جریان گردابی در رسم پروفیل سختی قطعات سخت کاری القایی شده در تولیدات انبوه صنعتی، یازدهمین سمینار ملی مهندسی سطح و ششمین همایش بین المللی آب کاری، تهران، مهرماه ۱۳۸۹.
- [14] S. Kassim, M. Al-Rubaie, Heat treatment and two-body abrasion of Ni-Hard 4, *Wear*, Vol. 312, 21-28, 2014.
- [15] Y. Tasgin, M. Kaplan, M. Yaz, Investigation of effects of boron additives and heat treatment on carbides and phase transition of highly alloyed duplex cast iron, *Materials and Design*, Vol. 30, 3174–3179, 2009.
- [16] ع. رزاقی، م. عباسی، س.م. ربیعی، م. فیروزبخت، م.ب. طالبی پور، "اثر عملیات ناپایداری سازی آستنیت بر ریزساختار و مقاومت به سایش چدن نایهارد"، چهارمین کنفرانس بین المللی و نهمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، آبان ۱۳۹۴.
- [17] V. Efremenko, K. Shimizu, Y. Chabak, Effect of destabilizing heat treatment on solid-State phase transformation in high-Chromium cast irons, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44, 5434-4546, 2013.