



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران

۲۷-۲۹ مهرماه ۱۳۸۹

دانشگاه تبریز



بکارگیری آزمون جریان گردابی در خطوط تولید قطعات صنعتی به منظور تعیین عمق لایه سخت شده به روش غیرمخرب

سعید کهربائی^۱، مهرداد کاشفی^۲، علیرضا صاحب علم^۳، نفیسه ظریف میلانیان^۴

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، Saeed_Kahrobaee@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- کارشناس مهندسی مواد، نماینده شرکت پبشتاز قطعه سناپاد

چکیده

قطعات فولادی در صنعت اغلب به منظور بهبود خواص سایشی و خستگی تحت عملیات سخت کاری القایی قرار می‌گیرند. در اثر این عملیات یک لایه سخت شده در سطح قطعه ایجاد می‌شود که بسته به کاربرد قطعه موردنظر، می‌توان با تغییر پارامترهای این روش سخت کاری سطحی، عمق‌های سخت‌شده متفاوتی ایجاد نمود. از نقطه نظر کاربردی و در فرایند کنترل کیفیت قطعات سخت شده، تعیین عمق لایه سخت شده اهمیت ویژه دارد. روش جریان گردابی یک روش غیرمخرب است که با استفاده از آن نسبت به روش‌های مخرب متالوگرافی و میکروسختی‌سنجی که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند، امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات به طور اتوماتیک در خطوط تولید در کاربردهای صنعتی نیز امکان‌پذیر می‌باشد. به علاوه این امر باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید و زمان انجام آزمون به دلیل سرعت بالا و غیرمخرب بودن آن می‌گردد. در این پژوهش جهت بدست آوردن عمق‌های متفاوت از لایه سخت شده، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از جنس فولاد CK45 با سرعت‌های متفاوت عبور قطعه از داخل کویل، تحت عملیات سخت کاری القایی قرار گرفتند. ارتباط خروجی‌های جریان‌های گردابی و عمق‌های سخت شده مؤثر و کل، نشان دهنده دقت بالای این روش غیرمخرب در تعیین عمق لایه سخت شده نسبت به دو روش مخرب دیگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فولاد CK45-سخت کاری القایی- عمق لایه سخت شده - آزمون غیرمخرب جریان گردابی.



بکارگیری آزمون جریان گردابی در خطوط تولید قطعات صنعتی به منظور تعیین عمق لایه سخت شده به روش غیرمخرب

سعید کهربائی^۱، مهرداد کاشفی^۲، علیرضا صاحب علم^۳، نفیسه ظریف میلانیان^۴

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، Saeed_Kahrobaee@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- کارشناس مهندسی مواد، نماینده شرکت پیشتاز قطعه سناباد

چکیده

قطعات فولادی در صنعت اغلب به منظور بهبود خواص سایشی و خستگی تحت عملیات سخت کاری القایی قرار می‌گیرند. در اثر این عملیات یک لایه سخت شده در سطح قطعه ایجاد می‌شود که بسته به کاربرد قطعه مورد نظر، می‌توان با تغییر پارامترهای این روش سخت کاری سطحی، عمق‌های سخت‌شده متفاوتی ایجاد نمود. از نقطه نظر کاربردی و در فرایند کنترل کیفیت قطعات سخت شده، تعیین عمق لایه سخت شده اهمیت ویژه دارد. روش جریان گردابی یک روش غیرمخرب است که با استفاده از آن نسبت به روش‌های مخرب متالوگرافی و میکروسختی‌سنجی که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند، امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات به طور اتوماتیک در خطوط تولید در کاربردهای صنعتی نیز امکان‌پذیر می‌باشد. به علاوه این امر باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید و زمان انجام آزمون به دلیل سرعت بالا و غیرمخرب بودن آن می‌گردد. در این پژوهش جهت بدست آوردن عمق‌های متفاوت از لایه سخت شده، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از جنس فولاد CK45 با سرعت‌های متفاوت عبور قطعه از داخل کویل، تحت عملیات سخت کاری القایی قرار گرفتند. ارتباط خروجی‌های جریان‌های گردابی و عمق‌های سخت شده مؤثر و کل، نشان دهنده دقت بالای این روش غیر مخرب در تعیین عمق لایه سخت شده نسبت به دو روش مخرب دیگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فولاد CK45، سخت کاری القایی، عمق لایه سخت شده، آزمون غیرمخرب جریان گردابی

۱- مقدمه

عملیات حرارتی القایی تکنولوژی متداول عملیات حرارتی را با یکی از جدیدترین روش‌ها، یعنی حرارت دهی سطحی به کمک القا جریان تلفیق می‌کند. در برخی از روش‌های تولید، تنها روش عملی حرارت دادن به یک قطعه صنعتی محسوب می‌شود. از مزایای این روش، عدم آلودگی، سرعت عمل، تکرارپذیری و همچنین قابلیت خودکار شدن تجهیزات آن است. از میان مشخصه‌های کیفی قابل بررسی در قطعات سخت کاری سطحی شده، تعیین عمق سخت شده از اهمیت زیادی برخوردار است.

بر طبق استاندارد ISO 3754، دو روش برای کنترل و اندازه‌گیری این لایه سخت شده وجود دارد. روش اول شامل مشاهدات ریزساختار پس از عملیات اچ کردن با کمک میکروسکوپ نوری می‌باشد. عیب بزرگ این روش مشکل بودن تعیین محدوده دقیق حفاصل دو ناحیه مارتنزیتی و فریت-پرلیتی می‌باشد. روش دوم شامل رسم پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه است. دو روش فوق روش‌هایی مخرب بوده که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند. به علاوه، امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش‌ها امکان‌پذیر نیست.



باتوجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب در فرایندهای کنترل کیفی تولیدات صنعتی، امروزه کاربرد روش‌های غیرمخرب از بازرسی عیوب و ترک‌یابی فراتر رفته و تعیین مشخصه‌های مکانیکی و متالورژیکی مواد را نیز شامل می‌شود. این امر سبب صرفه‌جویی از لحاظ هزینه و زمان، در تولید انبوه قطعات صنعتی شده و امکان کنترل صددرصد قطعات را نیز فراهم آورده است. از این میان آزمون غیرمخرب جریان گردابی مزایای منحصر به فردی دارد. حساسیت این آزمون به ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی را می‌توان جزء مهمترین عواملی دانست که باعث توجه ویژه به این روش شده است [۲۰].

کاناپلایک^۱ ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده [۴] و یوچی موتو و چک^۲، در پژوهش‌هایی جداگانه، همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان داده‌اند [۵ و ۶]. تعیین عمق لایه کربن‌زدایی شده در فولاد باریزساختار مارتنزیتی با کمک آنالیز هارمونیک [۷] و همچنین براساس پیک‌های اضافی ظاهر شده در پروفیل سیگنال بارک هازون (MBN)^۳ [۸، ۹] گزارش شده است. تأثیر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی نیز توسط محققین بررسی و تأیید شده است [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. درصد پرلیت فولاد [۱۳] و نیز درصد کربن سطح در فولادهای کربن دهی شده [۱۴] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی تعیین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به کارگیری روش‌های غیرمخرب جهت تعیین عمق لایه سخت شده در فرایند کنترل کیفیت قطعات، خصوصاً در تولید انبوه، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی مانند تلفات مغناطیسی و اثرات سیگنال بارک هازون (MBN)^۴ [۱۵، ۱۶ و ۱۷] و نیز رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی [۱۸] در قطعات سخت کاری القایی شده، نشان‌دهنده تفاوت خواص مغناطیسی در لایه سطحی سخت شده و مرکز قطعه می‌باشد. این تغییرات در خواص، پتانسیل لازم را برای تعیین عمق لایه سخت شده با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی فراهم آورده است

۲- مواد و روش آزمایش‌ها

در این تحقیق از فولاد ساده کربنی CK45 استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده (CK45)

فولاد	درصد وزنی عناصر آلیاژی				
	%C	%Si	%Mn	%P	%S
CK45	۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰

تعداد ۹ نمونه استوانه‌ای شکل به قطر ۳۱.۵ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر تهیه گردید. سپس نمونه‌ها تحت عملیات سخت کاری القایی قرار گرفتند. فرکانس و توان جریان سخت کاری القایی برای تمامی نمونه‌ها ۳۰ kHz و ۵۰ kW تنظیم شد. با تغییر سرعت عبور نمونه‌ها از داخل کویل القا جریان (مطابق با مندرجات جدول ۲) و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای اثرگذار بر روی عمق لایه سخت شده، عمق‌های سخت شده متفاوتی ایجاد شد. پاسخ جریان گردابی تحت تأثیر ۲ پارامتر مهم ریزساختار و تنش باقیمانده می‌باشد [۲]. به منظور از بین بردن تنش‌های باقیمانده ناشی از عملیات سخت کاری سطحی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در کوره در دمای ۲۰۰°C قرار داده شدند. بعد از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها سمباده زنی و پولیش شده و سپس با محلول نایتال ۲٪ اچ شدند.

^۱ Konoplyuk

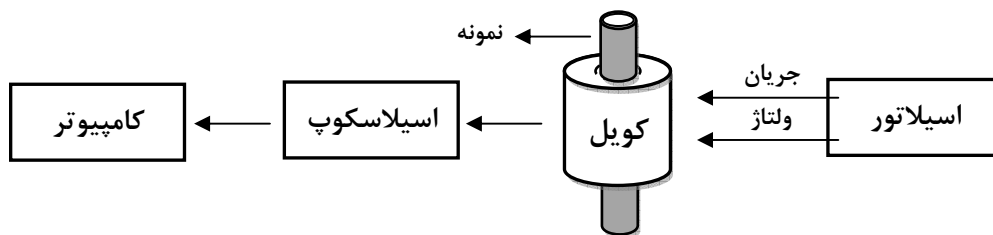
^۲ Uchimoto, Check

^۳ Magnetic Barkhausen Noise

^۴ Magnetic Barkhausen Noise

سپس پروفیل سختی قطعات با استفاده از روش سختی سنجی برحسب ویکرز (مطابق با استاندارد ISO 3754) و با کمک دستگاه Bohler Micro hardness tester رسم شد.

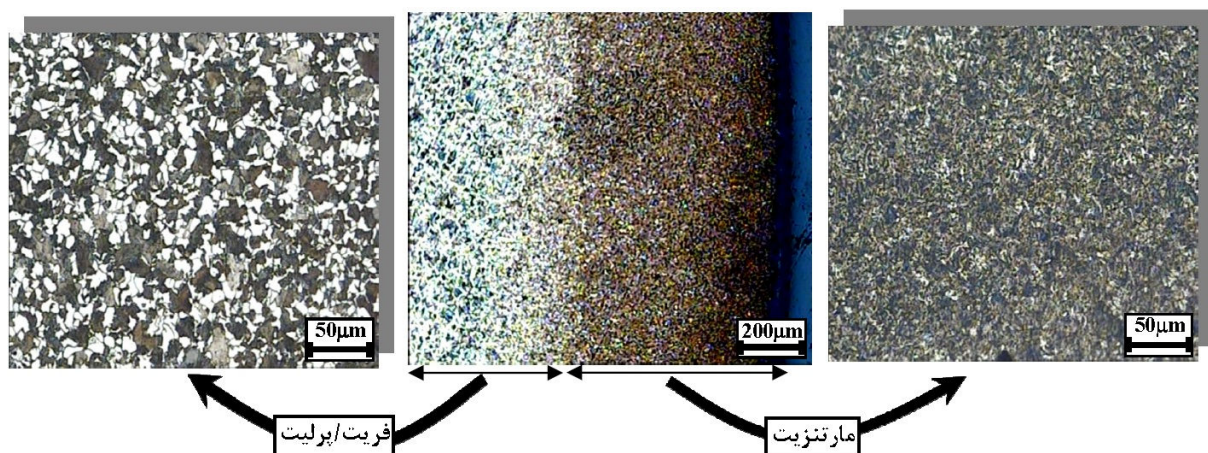
تمامی آزمون های غیرمخرب با دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی که قابلیت تولید فرکانس‌هایی از ۱ هرتز تا ۲ مگاهرتز را دارا بوده و طرح شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، انجام شد. به منظور تعیین فرکانس بهینه، این آزمون در محدوده فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز انجام و تمامی نمونه ها در کویلی با ضریب پرشوندگی ۰/۹۸ و دمای ثابت ۲۷°C آزمایش شدند. در ادامه پارامترهای ولتاژ ورودی و خروجی و آمپر ورودی کویل اندازه گیری گردیده و امیدانس و اختلاف فاز ایجاد شده محاسبه شد. در نهایت ارتباط تمامی خروجی ها با عمق لایه سخت شده بدست آمده از روش غیرمخرب، بررسی گردید.



شکل ۱: تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲، تصاویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی از ریزساختار نمونه‌ای که با سرعت ۶/۵mm/s سخت کاری القایی شده، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، لایه سطحی (قسمت سخت شده) دارای ریزساختار مارتنزیتی بوده که از ریز ساختار فریت-پرلیتی در قسمت داخلی نمونه که متأثر از عملیات حرارتی نبوده، متمایز می‌باشد. در پژوهش حاضر، سختی در دو فاز مارتنزیتی در قسمت سخت شده در محدوده ۶۲۵-۶۴۰ ویکرز و فاز فریت-پرلیت در قسمت مرکزی نمونه ۲۳۵-۲۳۰ ویکرز می‌باشد.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه که تحت عملیات سخت کاری القایی قرار گرفته است



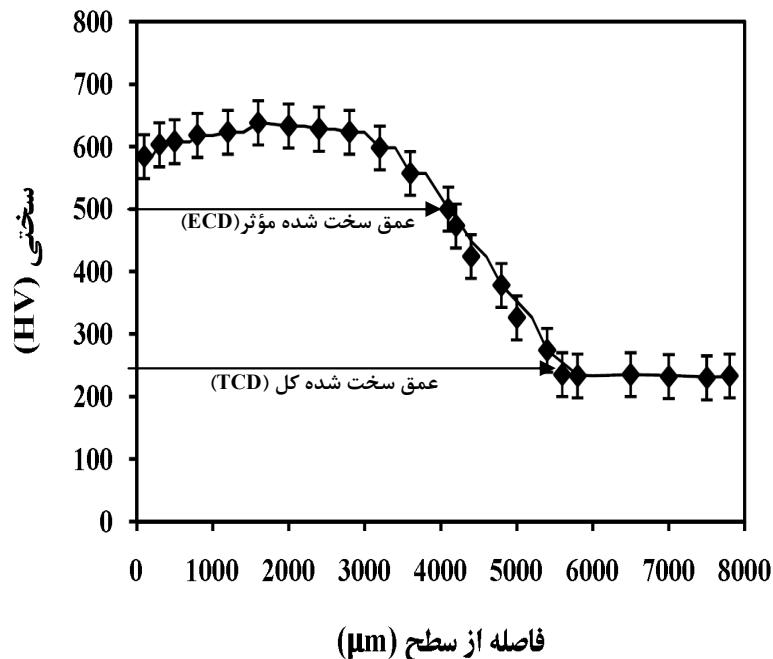
بر طبق استاندارد ISO 3754 ، عمق لایه سخت شده مؤثر (ECD)^۱ بعد عملیات حرارتی سخت کاری القایی، حد فاصله بین سطح قطعه سخت شده و لایه‌ای که سختی آن تحت بار $9/8 \text{ N} (1 \text{ kgf})$ ، معادل با حد سختی^۲ تعریف شده در این استاندارد باشد، تعریف می شود.

حد سختی در این استاندارد تابعی از حداقل سختی سطح قطعات می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(1) \quad (HV) \text{ حداقل سختی در سطح قطعه} \times 0/8 = (HV) \text{ حد سختی}$$

با توجه به حداقل سختی سطح که در حدود ۶۲۵ ویکرز می‌باشد، بنابراین عمق سخت شده مؤثر معادل با فاصله از سطح تا جایی که سختی ۵۰۰ ویکرز حاصل شود، در نظر گرفته شده است. از طرفی بنا بر استاندارد ISO 3754 ، عمق سخت شده کل (TCD)^۳ به صورت فاصله از سطح نمونه سخت شده به سمت مرکز تا جایی که مقادیر سختی تقریباً ثابت و برابر با سختی مرکز نمونه شود، تعریف می‌گردد.

در شکل ۳ پروفیل سختی نمونه با بیشترین عمق سخت شده که با سرعت ۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه از داخل سیم پیچ القاء جریان عبور داده شده، نشان داده شده است. مقادیر عمق سخت شده مؤثر و کل با استفاده از پروفیل رسم شده مطابق با استانداردهای تعریف شده، در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۴، عمق لایه سخت شده کل و مؤثر برحسب سرعت عبور نمونه‌ها از داخل سیم پیچ القاء جریان را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد.

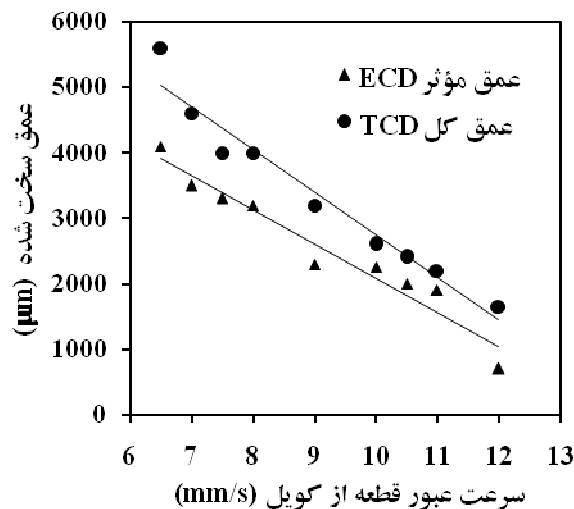


شکل ۳ - پروفیل سختی برای نمونه بیشترین عمق لایه سخت شده

^۱ Effective Case Depth

^۲ Hardness Limit

^۳ Total Case Depth



شکل ۴ - عمق لایه سخت شده کل و مؤثر برحسب سرعت عبور نمونه‌ها از داخل سیم پیچ القاء جریان

همانطور که بیان شد در لایه سطحی قطعات سخت کاری سطحی شده فاز مارتنزیت تشکیل می‌شود. تشکیل مارتنزیت همراه با تشکیل دو قلوپی‌ها در درون تیغچه‌های مارتنزیتی می‌باشد. از طرفی دیگر دانسیته زیادی از نابجایی‌ها در اثر تغییر فرم برشی که ناشی از طبیعت استحاله مارتنزیتی است، به وجود می‌آید.

این دو مشخصه ریزساختاری یعنی دو قلوپی‌ها و تراکم زیاد نابجایی‌ها به همراه اعوجاج ناشی از محبوس شدن اتم‌های بین نشین در ساختار کریستالی مارتنزیت، موجب قفل کردن دیواره حوزه‌های مغناطیسی و تحرک پذیری بسیار کمتر آنها در مقایسه با ریزساختار نرم فریت-پرلیت با دانسیته کم نابجایی‌ها می‌شود [۱۵ و ۱۷]. این امر باعث می‌شود که دیمغناطیس کردن حوزه‌ها مشکل تر شده [۲۱] و تنها با افزایش بیشتر میدان بتوان بر قفل شدگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی فایق آمد. بنابراین با افزایش عمق لایه سخت شده، میدان مغناطیسی بزرگتری جهت غلبه بر قفل شدگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی مورد نیاز می‌باشد که این خود باعث افزایش میدان وادارنده^۱ و بالطبع افزایش تلفات هیستریزیس^۲ با افزایش عمق لایه سخت شده خواهد شد. این تفاوت، دلیل اصلی در اختلاف در پاسخ قطعات (با عمق سخت شده متفاوت) به القاء جریان گردابی می‌باشد.

قدم اول در بررسی پاسخ نمونه‌ها به القاء جریان، تعیین فرکانس بهینه می‌باشد. به این منظور از روش آنالیز رگرسیون نتایج استفاده گردید [۱ و ۲]. به این ترتیب که در هر فرکانس ضریب همبستگی (R^2) بین خروجی‌های حاصل از جریان‌های گردابی و عمق لایه سخت شده را بدست آورده و در فرکانسی که بالاترین مقدار برای این ضریب حاصل شود، این فرکانس به عنوان فرکانس بهینه شناخته می‌شود. بدین منظور آزمون جریان گردابی در ۵ فرکانس ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ هرتز انجام شد و ضریب همبستگی (R^2) در فرکانس ۲۵ هرتز برای خروجی‌های مختلف، بیشترین مقدار را دارا بوده و به عنوان فرکانس بهینه جهت تعیین عمق لایه سخت شده، انتخاب گردید.

جدول ۲- اندازه عمق‌های مؤثر و کل با استفاده از رسم پروفیل سختی

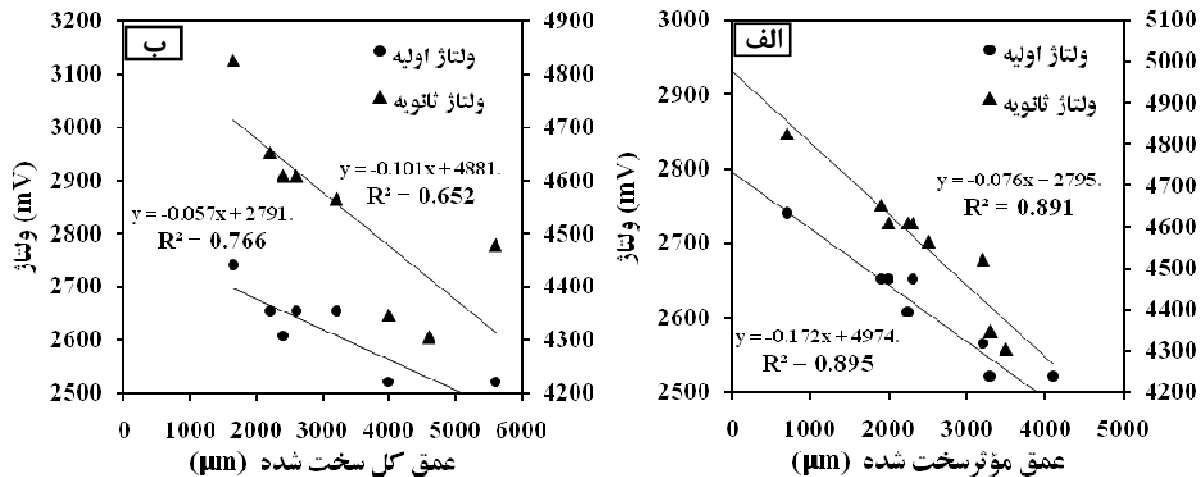
سرعت عبور قطعه از کوئل mm/s	۱۲	۱۱	۱۰/۵	۱۰	۹	۸	۷/۵	۷	۶/۵
ECD(μm)	۷۰۰	۱۹۰۰	۲۰۰۰	۲۲۵۰	۲۳۰۰	۳۲۰۰	۳۳۰۰	۳۵۰۰	۴۱۰۰
TCD(μm)	۱۶۵۰	۲۲۰۰	۲۴۰۰	۲۶۰۰	۳۲۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۴۶۰۰	۵۶۰۰

^۱ Coercivity

^۲ Hysteresis Loss



ولتاژهای اولیه و ثانویه، از جمله پارامترهایی از جریان گردابی هستند که می‌توان آنها را مستقیماً با اندازه‌گیری ورودی و خروجی کویل بدست آورد. شکل ۵ ارتباط بین عمق لایه سخت شده کل و مؤثر با ولتاژهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی (R^2) بدست آمده برای هر کدام از ولتاژهای اولیه و ثانویه، نشان دهنده ارتباطی مناسب با عمق لایه سخت شده می‌باشد.



شکل ۵ - ارتباط بین ولتاژهای اولیه و ثانویه ناشی از القای جریان‌های گردابی و عمق لایه سخت شده مؤثر (ب) عمق لایه سخت شده کل ، در فرکانس ۲۵ هرتز

اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ (Φ) یکی از پارامترهای قابل محاسبه توسط آزمون جریان گردابی است. چنانچه تنها سیم پیچ اولیه در مدار قرار گیرد، با رسم نمودار جریان و ولتاژ می‌توان اختلاف فاز بین این دو را بدست آورد. بدین منظور، پس از ثبت داده‌های مربوط به جریان و ولتاژ در طی آزمون جریان القایی و با محاسبه طول موج (T) و اختلاف زمانی بین دو پیک مجاور جریان و ولتاژ (Δt)، از طریق رابطه ۲ مقدار اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ (Φ)، با کمک نرم افزار، MATLAB تعیین گردید.

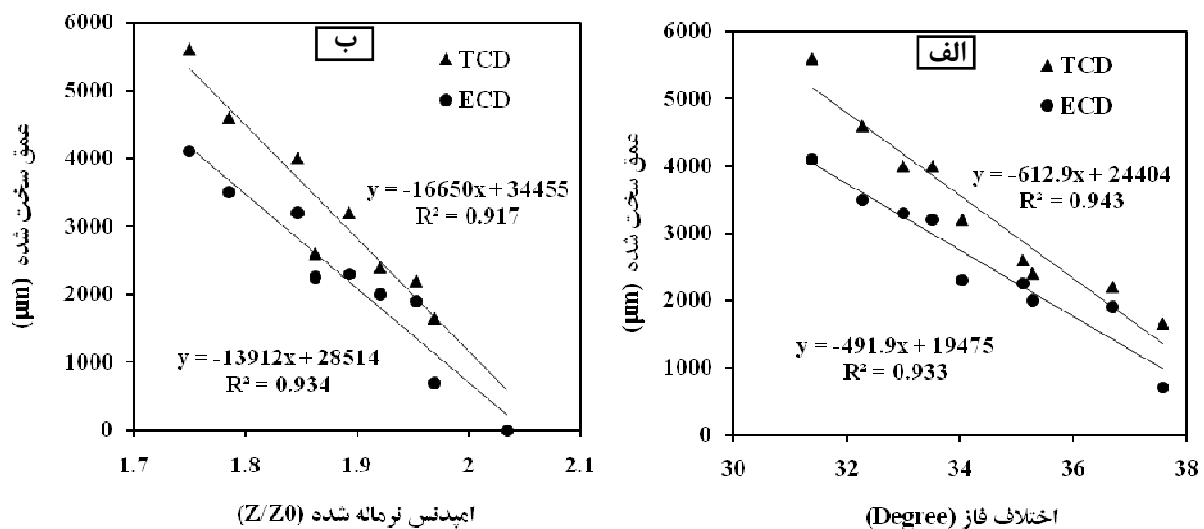
$$\Phi = 360(\Delta t/T) \quad (2)$$

شکل ۶ (الف)، این ارتباط را در فرکانس ۲۵ هرتز نشان می‌دهد. با توجه به ضرایب همبستگی (۰/۹۳ و ۰/۹۴) برای این خروجی‌ها می‌توان اطمینان بسیار قابل قبولی را در پیش‌بینی عمق لایه سخت شده به ترتیب مؤثر و کل، در نظر گرفت. جهت برقراری ارتباط لایه سخت شده با پارامتر دیگری از جریان گردابی، با استفاده از معادلات ۲ و ۳، از مقادیر ولتاژ (V) و جریان (I) کویل برای محاسبه امپدانس (Z) استفاده شد.

$$Z = VI \quad (3)$$

همچنین با تقسیم امپدانس محاسبه شده برای هر نمونه بر امپدانس کویل خالی (Z_0)، پارامتر جدیدی تحت عنوان امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) حاصل می‌شود [۴، ۱۰، ۲۰]. ارتباط بین امپدانس نرماله شده و عمق لایه سخت شده، در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب همبستگی ۰/۹۳ و ۰/۹۱ نشان دهنده ضریب اطمینان بسیار بالا در تعیین عمق لایه سخت شده با استفاده از این خروجی می‌باشد.

پاسخ جریان گردابی به دلیل اختلاف نفوذپذیری نسبی (μ_r) و رسانای مغناطیسی (σ) بین ریزساختار و فازهای گوناگون، متفاوت می‌باشد. بنابر آنچه بحث شد، مشخص شد که تلفات هیستریزیس مغناطیسی در فاز فریت-پرلیت کمتر از فاز مارتنزیتی



شکل ۶ - ارتباط بین عمق لایه سخت شده کل و مؤثر با الف) اختلاف فاز ولتاژ و جریان ب) امپدانس نرماله شده، در فرکانس ۲۵ هرتز

می‌باشد. پس با افزایش عمق لایه سخت شده یا به عبارتی درصد فاز مارتنزیتی، کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) را شاهد هستیم [۱۷، ۱۵].

از طرفی رابطه ۴ بیان می‌کند که با کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ)، مقدار ضریب خودالقایی (L) کاهش می‌یابد.

$$L = \mu N^2 A / l \quad (4)$$

که در آن μ نفوذپذیری مغناطیسی، N تعداد دور سیم پیچ، A سطح مقطع نمونه و l طول سیم پیچ می‌باشد. در نتیجه طبق روابط زیر با کاهش μ ، مقدار مقاومت القایی (X_L) و امپدانس (Z) نیز کاهش می‌یابد.

$$X_L = 2\pi f L \quad (5)$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I \quad (6)$$

بنابراین کاهش در امپدانس دلیلی بر کاهش ولتاژ اولیه و ثانویه (V) و امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان گردابی در نمونه‌های با عمق سخت شده بیشتر می‌باشد که در شکل‌های ۵ و ۶ چنین ارتباطی مشاهده می‌گردد.

۴- نتیجه گیری

روش غیرمخرب جریان گردابی با توجه به تفاوت در خواص مغناطیسی ریزساختارهای مارتنزیتی (قسمت سخت شده) و فریتی- پرلیتی (قسمت مرکزی قطعه)، قادر به تعیین عمق لایه سخت شده با اطمینان قابل قبولی است. رگرسیون بالای حاصل شده از ارتباط بین عمق لایه سخت شده کل و مؤثر و اختلاف فاز ولتاژ و جریان (۰/۹۴ و ۰/۹۳)، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این روش غیرمخرب در تعیین عمق لایه سخت شده می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مدیریت محترم مجموعه سازی توس و شرکت پیشتاز قطعه سناباد به جهت همکاری در انجام آزمایشات و استفاده از دستگاه سخت کاری القایی کمال تشکر و قدردانی را دارند.



مراجع

1. Bray Don E, Stanley Roderic K. Nondestructive evaluation: a tool design, manufacturing and service. Boca Raton, FL: CRC Press; 1997.
2. Donald J.Hagemair, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, 1990.
3. Hughes DE. The cause of evident magnetism in iron, steel, and other magnetic metals. J Franklin Inst 1883;116(2):128-50.
4. Konoplyuk S, Abe T, Uchimoto T, Takagi T, Kurosawa M. Characterization of ductile cast iron by eddy current 623-6.
5. Uchimoto T, Takagi T, Konoplyuk S, Abe T, Huang H, Kurosawa M. Eddy current evaluation of cast irons for material characterization. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2003;258-259:493-6.
6. Cech J. Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods. NDT International 1990;23(2):93-102.
7. Mercier D, Lesage J, Decoopman X, Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. NDT&E International 2006;39:652-60.
8. V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, Baldev Raj. Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1997;171: 179-189.
9. M. Blaow, J.T. Evans, B.A. Shaw, J. Mater. Surface decarburisation of steel detected by magnetic barkhausen emission. Journal of Materials Science. 40 (2005) 5517-5520.
10. J. Degauque, B. Astie, J.L. Porteseil, and R. Vergne, "Influence of the Grain Size on the Magnetic and Magneto mechanical Properties of High-Purity Iron", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 26, 1982, 261-263.
11. J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, and J. Capó-Sánchez, "Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis Loop in Commercial Carbon Steel: Influence of Applied Stress and Grain Size", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 231, 2001, 299-306.
12. B. K. Tanner, J. A. Szpunar, S. N. M. Willcock, L. L. Morgan, P. A. Mundell., "Magnetic and Metallurgical Properties of High-Tensile Steels", Journal of Materials Science, 1988, JMMM 123 (1993) 283.
13. Khan SH, Ali Farhad, Nusair Khan A, Iqbal MA. Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method. Journal of Materials Processing Technology 2008;200:316-8.
14. M. SheikhAmiri and M.Kashefi., "Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels", NDT&E International, 2009, 42 (2009) 618-621.
15. Chongxue Zhang, NicolaBowler, ChesterLo, Magnetic characterization of surface-hardened steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321 (2009) 3878-3887
16. Zhu B, Johnson M and Jiles D, Evaluation of Wear-Induced Material Loss in Case-Hardened Steel Using Magnetic Barkhausen Emission Measurement, IEEE Transaction on Magnetics, 2000, Vol.36 No. 5, P3602-3604.
17. C.C.H. Lo, E.R. Kinser, Y. Melikhov, D.C. Jiles, Magnetic nondestructive characterization of case depth in surface-hardened steel components, in: D.O. Thompson, D.E. Chimenti (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 25B, AIP Conference Proceedings, vol. 820, 2006, pp. 1253-1260.
18. Johnson Marcus, Lo Chester, Hentscher Scott and Kinser Emily, Analysis of conductivity and Permeability Profiles in Hardened Steel, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX), IOS press, 2005.
19. M. Zergoug*, S. Lebailli, H. Boudjellal, A. Benchaala, Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing, NDT&E International 37 (2004) 65-72.
20. Shull Peter J. Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications. New York: Marcel Dekker, Inc; 2002.
21. F. Rumiche, J.E. Indacochea, and M.L. Wang, Assessment of the Effect of Microstructure on the Magnetic Behavior of Structural Carbon Steels Using an Electromagnetic Sensor, Journal of Materials Engineering and Performance, 586(2008)17(4).