

تعیین غیرمخرب عمق لایه سخت شده و پروفیل سختی با استفاده از تحلیل پاسخ قطعات به القاء جریان

سعید کهربائی و مهرداد کاشفی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله : ۸۹/۲/۱۸ - پذیرش مقاله : ۹۰/۲/۳)

چکیده

آزمون جریان گردابی یک آزمون غیرمخرب بوده که به سرعت اجرا شده و پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده‌ی مورد نظر حساس است. در نتیجه به دلیل تفاوت خواص مغناطیسی لایه سخت شده با دیگر قسمت‌های قطعه سخت‌کاری القائی شده، می‌توان از این روش غیرمخرب در تعیین عمق لایه سخت شده در قطعات فولادی بهره گرفت. در این پژوهش نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از جنس فولاد CK45، تحت عملیات سخت‌کاری القائی قرار گرفته و پس از رسم پروفیل سختی با استفاده از روش سختی سنجی، عمق‌های سخت شده موثر و کل تعیین شده‌اند. سپس به کمک بررسی پاسخ‌های قطعات به اعمال جریان گردابی شامل ولتاژهای اولیه و ثانویه، اختلاف فاز و امپدانس نرماله شده، ارتباط عمق سخت شده با این پاسخ‌ها تعیین شده و در نهایت پروفیل‌های سختی به صورت غیرمخرب رسم شده‌اند. رگرسیون حاصل از این ارتباطها، نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه سخت شده قطعات است.

واژه‌های کلیدی: عمق لایه سخت شده، پروفیل سختی، آزمون غیرمخرب، جریان گردابی.

Nondestructive determination of case depth and hardness profile by the investigation of the parts response to the induction current

S. Kahrobaee and M. Kashefi

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering,
Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

The eddy current test is a non-destructive technique which can be performed rapidly. Since the eddy current response is sensitive to the chemical composition and microstructure of the materials, it can be used to determine case depth of induction hardened parts due to the difference in magnetic properties of the hardened layer and the core of the specimen. In the present study, identical rods of CK45 carbon steel were case hardened using induction hardening method. Plotting of hardness profile was done, and the effective and total case depths were also determined. In order to investigate the applicability of the eddy current technique, the relation between effective and total case depths and eddy current outputs (primary and secondary voltages, normalized impedance and phase angle) have been studied. Good correlations between these findings indicate an acceptable level of accuracy of this method in comparison with destructive methods.

Keywords: Case Depth, Hardness Profile, Nondestructive Technique, Eddy Current Test.

E-mail of corresponding author: saeed_kahrobaee@yahoo.com

مقدمه

عملیات حرارتی القائی تکنولوژی متداول عملیات حرارتی را با یکی از جدیدترین روش‌ها، یعنی حرارت دهی سطحی به کمک القاء جریان تلفیق می‌کند که 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 با کمک میکروسکوپ نوری است. عیب بزرگ این روش مشکل بودن تعیین محدوده دقیق حد فاصل دو ناحیه مارتنزیتی و فریت-پرلیتی است. روش دوم شامل رسم پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه است. روش‌های فوق روش‌هایی وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش‌ها امکان‌پذیر نیست.

باتوجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب در فرآیندهای بازرسی 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 [۲۱].

با عبور جریان متناوب به دو سر سیم‌پیچ، یک میدان الکترومغناطیسی اولیه، ایجاد می‌شود. وقتی که سیم‌پیچ اولیه نزدیک یک ماده رسانا قرار گیرد، در اثر تغییر شار در ماده رسانا (بر طبق قانون القا) در آن جریان‌هایی تحت عنوان جریان گردابی القاء می‌شود. جریان‌های گردابی حاصله میدان

مغناطیسی ثانویه در خلاف جهت میدان مغناطیسی اولیه (بر طبق قانون لنز) ایجاد می‌کنند. برآیند این میدان‌های مغناطیسی، خروجی جریان گردابی تحت عنوان ولتاژ اولیه را به وجود می‌آورد. از طرفی وجود سیم پیچ ثانویه به عنوان حس‌گر، تغییرات در میدان‌های مغناطیسی را حس کرده و بر اساس آن خروجی ولتاژ ثانویه بدست می‌آید. تغییرات در این خروجی‌ها به شدت جریان‌های گردابی که خود تابعی از رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها و همچنین فرکانس آزمایش می‌باشد، بستگی دارد [۳].

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 با ریزساختار مارتنزیتی به کمک آنالیز هارمونیک [۷] و همچنین براساس پیک‌های اضافی ظاهر شده در پروفیل سیگنال بارک هاوزن (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 کربن‌دهی شده [۱۴] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تمامی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان‌دهنده توانایی روش جریان گردابی در شناسایی تغییرات ریزساختاری است. از طرفی اندازه‌گیری‌های مغناطیسی مانند تلفات مغناطیسی و اثرات سیگنال بارک هاوزن [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 است. این تغییرات در خواص، پتانسیل لازم را برای تعیین عمق لایه سخت شده با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی فراهم آورده است. همچنین ارتباط بین میکروسختی و تغییرات امپدانس توسط محققین

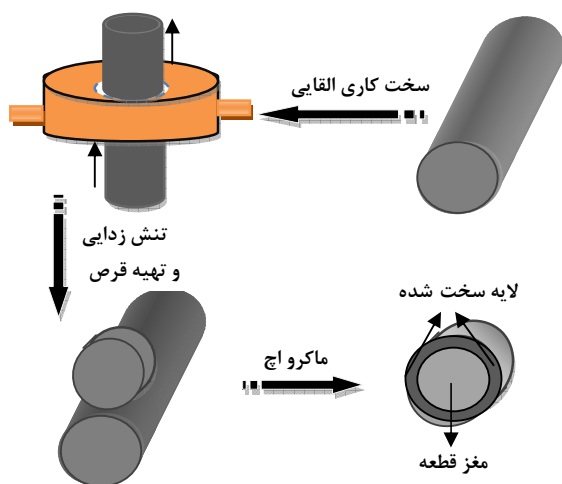
¹ Konoplyuk

² Uchimoto, Check

³ Magnetic Barkhausen Noise

بعد از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها پولیش شده و سپس با محلول نایتال ۲٪ اچ شدند. نمای توصیفی مراحل عملیات صورت گرفته روی نمونه‌ها قبل از شروع آزمون‌های جریان گردابی در شکل ۱ نشان داده شده است.

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. در نهایت بر روی نمونه‌های استوانه‌ای، آزمون جریان گردابی اعمال شد. تمامی آزمون‌های 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 ۲ نشان داده شده است، انجام شد. به منظور تعیین فرکانس بهینه، این آزمون در محدوده فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز انجام و تمامی نمونه‌ها در کویلی با ضریب پرشوندگی ۰/۹۸ و دمای ثابت 27°C آزمایش شدند.



شکل ۱. نمای توصیفی عملیات صورت گرفته روی نمونه‌ها قبل از شروع آزمون‌های جریان گردابی.

در ادامه پارامترهای ولتاژ ورودی و خروجی و آمپر ورودی کویل اندازه‌گیری شده و امپدانس و اختلاف فاز ایجاد شده محاسبه شد. در نهایت ارتباط تمامی خروجی‌ها با عمق لایه سخت شده بدست آمده از روش مخرب، بررسی گردید.

بررسی شده است [۱۹] و بر اساس آن در پژوهش حاضر با برقرار نمودن ارتباط بین سختی در عمق‌های مختلف از سطح نمونه و خروجی‌های حاصل از روش جریان گردابی، توانایی این روش غیر مخرب در تعیین و رسم پروفیل سخت شده قطعات، بررسی شده است.

یکی از مهمترین مزیت‌ها در سیستم غیرمخرب بکار رفته در پژوهش حاضر، امکان کالیبراسیون سریع سیستم و ثبت خروجی‌های متفاوت و در نتیجه محاسبه عمق‌های سخت شده کل و مؤثر و همچنین رسم پروفیل سختی در زمانی بسیار کوتاه (حدود چند ثانیه) است. در نتیجه از چنین سیستمی می‌توان جهت بازرسی تمامی قطعات در خطوط تولید (به صورت on-line) بهره برد.

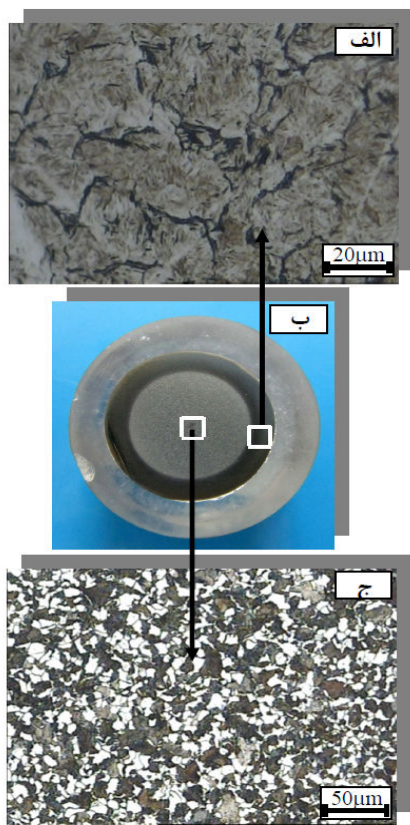
مواد و روش آزمایش‌ها

در این تحقیق از فولاد CK45 استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. تعداد ۹ نمونه استوانه‌ای شکل به قطر $31/5$ میلی‌متر و طول 150 میلی‌متر تهیه گردید. سپس نمونه‌ها تحت عملیات سخت‌کاری القایی قرار گرفتند. فرکانس و توان دستگاه سخت‌کاری القایی برای تمامی نمونه‌ها به ترتیب 30kHz و 50kW تنظیم شد. با تغییر سرعت عبور نمونه‌ها از داخل کویل القاء 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.

از آنجا که پاسخ جریان گردابی تحت تأثیر دو پارامتر مهم ریزساختار و تنش باقیمانده است [۲]، به منظور از بین بردن تنش‌های باقیمانده ناشی از عملیات سخت‌کاری سطحی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در کوره در دمای 200°C قرار داده شدند.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده (CK45)

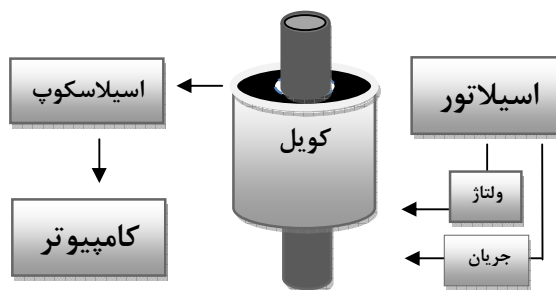
C	Si	Mn	P	S	Cr
۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰	۰/۱۵



شکل ۳. الف) ریزساختار لایه سخت شده (مارتنزیت)، ب) سطح ماکرواج شده، ج) ریزساختار قسمت مرکزی نمونه (فریت-پرلیت).

است. از طرفی بنابر استاندارد ISO 3754، عمق سخت شده‌ی 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 ۴ پروفیل سختی قطعه با بیشترین عمق لایه 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 (ECD) و کل (TCD) با استفاده از پروفیل‌های رسم شده مطابق با استانداردهای تعریف شده، در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۵، عمق لایه سخت شده کل و مؤثر برحسب سرعت عبور نمونه‌ها از داخل سیم پیچ القاء جریان را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی.

نتایج و بحث

۱. نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی در عمق به روش

مخرب

در شکل ۳، تصاویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی از ریزساختار نمونه‌ای که با سرعت ۶/۵mm/s سخت کاری القایی شده، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 ۶۴۰-۶۲۵ ویکرز (بعد از تنش‌گیری) و فاز فریت-پرلیت در قسمت مرکزی نمونه ۲۳۵-۲۳۰ ویکرز است.

بر طبق استاندارد ISO 3754، عمق لایه سخت شده مؤثر (ECD)^۱ بعد از عملیات سخت‌کاری القایی، فاصله بین سطح قطعه سخت شده و لایه‌ای که سختی آن تحت بار ۹/۸ (۱ kgf) معادل با حد سختی^۲ تعریف شده در این استاندارد باشد، تعریف می‌شود.

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

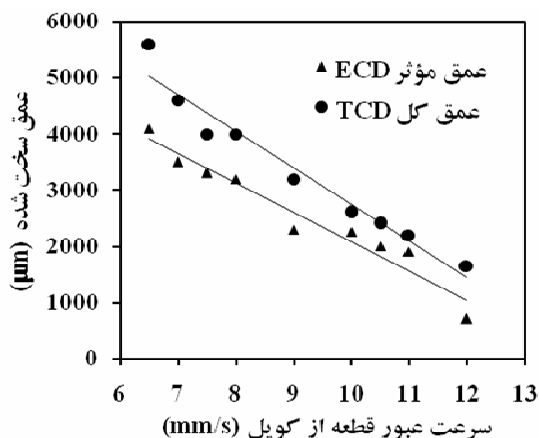
(HV) حداقل سختی در سطح قطعه $\times 0/8 = (HV)$ حد سختی با توجه به حداقل سختی سطح که در حدود ۶۲۵ ویکرز می‌باشد، عمق سخت شده مؤثر معادل با فاصله از سطح تا جایی که سختی ۵۰۰ ویکرز حاصل شود، در نظر گرفته شده

^۱ Effective Case Depth

^۲ Hardness Limit

^۳ Total Case Depth

تلفات هیستریزیس^۲ با افزایش عمق لایه سخت شده خواهد شد. این امر دلیل اصلی اختلاف در پاسخ قطعات با عمق‌های سخت شده متفاوت به القاء جریان گردابی است.

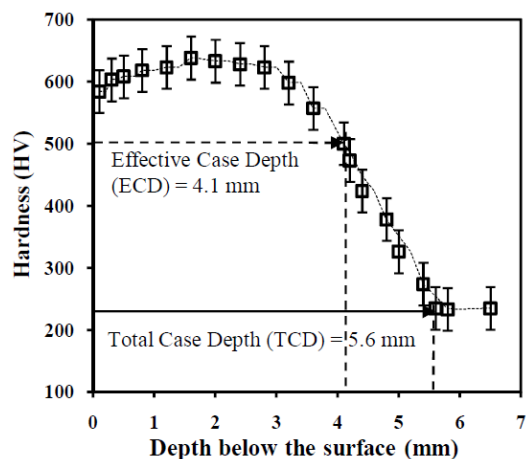


شکل ۵. عمق لایه سخت شده کل و مؤثر برحسب سرعت عبور نمونه‌ها از داخل سیم پیچ القاء جریان.

قدم اول در بررسی پاسخ نمونه‌ها به القاء جریان، تعیین فرکانس بهینه است. 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 برای تعیین عمق لایه سخت شده، انتخاب گردید. ولتاژهای اولیه و ثانویه، از جمله پارامترهایی از جریان گردابی هستند که می‌توان آنها را مستقیماً با اندازه‌گیری ورودی و خروجی کوئل بدست آورد. شکل ۶ ارتباط بین عمق لایه سخت شده کل و مؤثر با ولتاژهای اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی



شکل ۴. پروفیل سختی برای نمونه‌های با بیشترین و کمترین عمق لایه سخت شده.

۲. تحلیل پاسخ‌های حاصل از القاء جریان گردابی در قطعات

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

این دو مشخصه ریزساختاری یعنی دو قلوبی‌ها و تراکم زیاد نایجایی‌ها 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 نایجایی‌ها می‌شود [۱۵ و ۱۷].

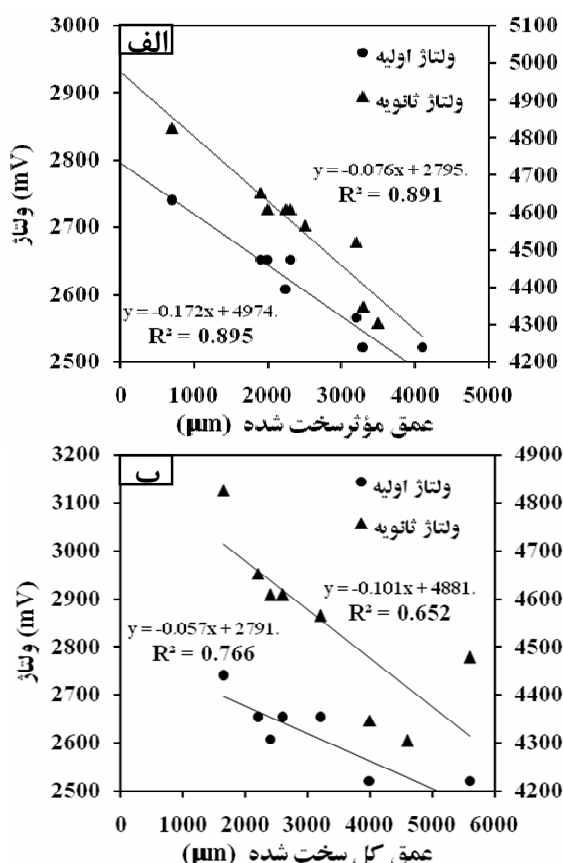
این امر باعث می‌شود که دمغناطیس کردن حوزه‌ها مشکل تر شده [۲۱] و تنها با افزایش بیشتر میدان بتوان بر قفل شدگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی فائق آمد. بنابراین با افزایش عمق لایه سخت شده، میدان مغناطیسی بزرگتری برای غلبه بر قفل شدگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی مورد نیاز است که این خود باعث افزایش میدان وادارندگی (H_c)^۱ و بالطبع افزایش

^۲ Hysteresis Loss

^۱ Coercivity

جدول ۲. اندازه عمق های مؤثر و کل با استفاده از رسم پروفیل سختی.

سرعت عبور قطعه از کویل 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



شکل ۶. ارتباط بین ولتاژهای اولیه و ثانویه ناشی از القای جریان‌های گردابی و الف) عمق لایه سخت شده مؤثر ب) عمق لایه سخت شده کل، در فرکانس ۲۵ هرتز.

خروجی است. این در حالی است که در روش‌های غیر مخرب دیگر بکار رفته در تعیین عمق لایه سخت شده (روش هیستریزیس مغناطیسی و اثر بارک هاوزن [۱۷، ۱۵]) نه تنها امکان بازرسی تمامی قطعات و کالیبراسیون سریع سیستم، فراهم نمی‌باشد بلکه دقت بالای بدست آمده در روش جریان گردابی را دارا نمی‌باشند.

پاسخ جریان گردابی به دلیل اختلاف نفوذپذیری نسبی (μ_r) و رسانایی مغناطیسی (σ) بین ریزساختار و فازهای گوناگون،

(R^2) بدست آمده برای هرکدام از ولتاژهای اولیه و ثانویه، نشان دهنده ارتباطی مناسب با عمق لایه سخت شده است. 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 داده های 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 (ϕ)، با کمک نرم افزار، MATLAB تعیین گردید.

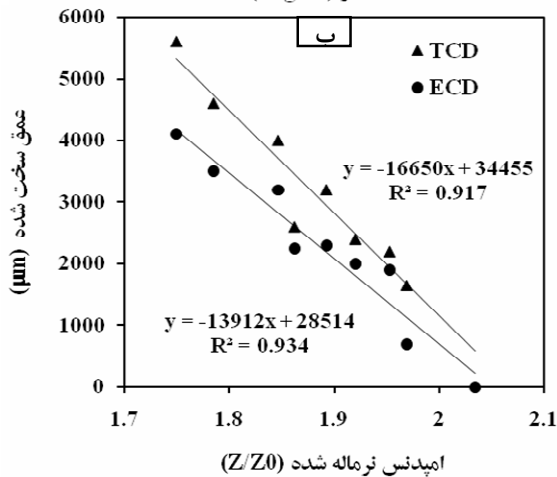
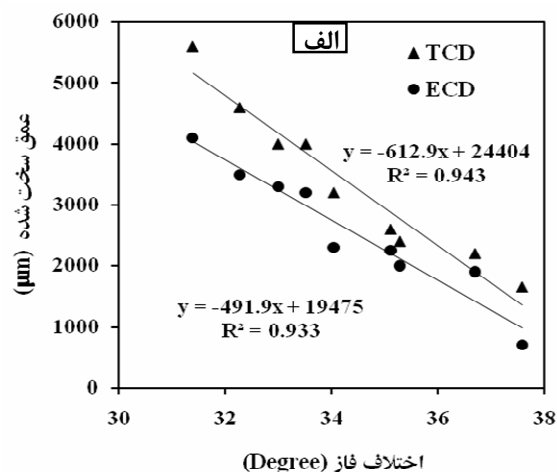
$$\Phi = 360(\Delta t/T) \quad (2)$$

شکل ۷ الف)، این ارتباط را در فرکانس ۲۵ هرتز نشان می دهد. ضرایب همبستگی (۰/۹۳ و ۰/۹۴) برای این خروجی، نشان دهنده اطمینان قابل قبول در اندازه گیری عمق لایه سخت شده مؤثر و کل با استفاده از روش جریان القایی می باشد. جهت برقراری ارتباط لایه سخت شده با پارامتر دیگری از جریان گردابی، با استفاده از معادلات ۲ و ۳، از ولتاژ (V) و جریان (I) کویل برای محاسبه امپدانس (Z) استفاده شد.

$$Z = V/I \quad (3)$$

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 [۲۰، ۴]. ارتباط بین امپدانس نرماله شده و عمق لایه سخت شده، در شکل ۷ ب) نشان داده شده است. همان طور 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

(جهت محاسبه Φ) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که با افزایش عمق لایه سخت شده در نمونه ها، مقدار Φ کاهش می یابد که دلیل آن کاهش نفوذپذیری مغناطیسی با افزایش عمق این لایه است.



شکل ۷. ارتباط بین عمق لایه سخت شده کل و مؤثر (الف) اختلاف فاز ولتاژ و جریان (ب) امپدانس نرماله شده، در فرکانس ۲۵ هرتز.

۳. ارتباط سختی خروجی های جریان گردابی

سختی به طور مستقیم تحت تأثیر ریزساختار اولیه ماده یا عملیات حرارتی صورت گرفته بر روی آن است و از آنجا که پاسخ جریان گردابی متأثر از ریزساختار می باشد پس می توان ارتباطی غیر مستقیم بین پاسخ های حاصل از جریان گردابی و سختی برقرار نمود. شکل ۹ چگونگی این ارتباط را نشان می دهد.

متفاوت است. بنابر آنچه بحث شد، مشخص شد که تلفات هیستریزیس مغناطیسی در فاز فریت-پرلیت کمتر از فاز مارتزیتی می باشد. پس با افزایش عمق لایه سخت شده یا به عبارتی افزایش درصد فاز مارتزیتی، کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) را شاهد هستیم [۱۵، ۱۷]. از طرفی رابطه ۴ بیان می کند که با کاهش نفوذپذیری مغناطیسی (μ)، مقدار ضریب خودالقایی (L) کاهش می یابد.

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

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

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

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

بنابراین کاهش در امپدانس دلیلی بر کاهش ولتاژ اولیه و ثانویه (V) و امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان گردابی در نمونه های با عمق سخت شده بیشتر است که در شکل های ۶ و ۷ چنین ارتباطی مشاهده می گردد.

برای فهم بیشتر اثر عمق سخت شده در فولادها بر روی پاسخ حاصل از جریان گردابی بخصوص اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان (Φ)، صفحه امپدانس (مقاومت القایی X_L) نرماله شده بر حسب مقاومت ظاهری (R) نرماله شده برای همه نمونه ها رسم شده است. برای محاسبه X_L و مقاومت ظاهری (R) نرماله شده، ابتدا مقاومت و راکتانس سیم پیچ (قسمت های حقیقی و موهومی Z) برای هر نمونه با استفاده از رابطه ۷، محاسبه شد.

$$Z = R + iX_L \quad (R = Z \cos(\Phi), X_L = Z \sin(\Phi)) \quad (7)$$

در نهایت از معادلات ۸ و ۹ جهت محاسبه X و R نرماله شده، استفاده گردید. [۱، ۴ و ۲۰].

$$\text{Normalized } R = (R - R_0) / X_0 \quad (8)$$

$$\text{Normalized } X_L = X / X_0 \quad (9)$$

نتایج محاسبات در شکل ۸ آمده است. همچنین در این شکل اثر عمق لایه سخت شده بر روی موقعیت نقاط امپدانس

در نهایت امکان اندازه گیری سختی در هر فاصله معین از سطح (رسم پروفیل سختی) توسط روش غیر مخرب جریان گردابی بررسی شد.

نتایج حاصل از این ارتباطها و رگرسیونهای بدست آمده در عمقهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. بنابر آنچه مشاهده می شود، بهترین ارتباط از عمق ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میکرومتر، با خروجی اختلاف فاز (Φ) و از عمق ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰ میکرومتر با خروجی امپدانس نرماله شده (Z/Z_0)، حاصل شده است.

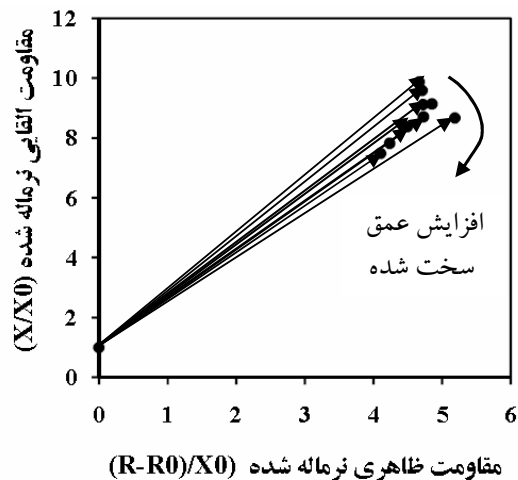
در شکل ۱۰، ارتباط میان اختلاف فاز (بین ولتاژ و جریان) در عمقهای ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ میکرومتر و همچنین امپدانس نرماله شده در عمقهای ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ میکرومتر از سطح بر حسب سختی، نشان داده شده است.

به عنوان مثال در فاصله معین $3500 \mu m$ از سطح، برای نمونه ای که عمق سخت شده ی کل آن $3200 \mu m$ از سطح می باشد، ریزساختار موجود، نزدیک به قسمت مرکز قطعه و تقریباً فریت-پرلیتی می باشد، لذا حداقل سختی را دارا می باشد.

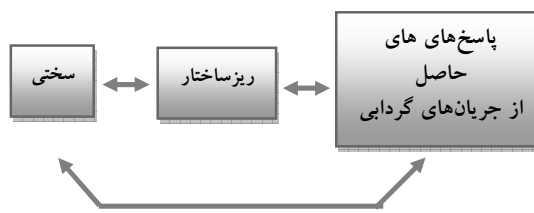
از طرفی نمونه ای که عمق سخت شده آن $4000 \mu m$ است، ریزساختار آن در عمق $3500 \mu m$ ، مارتنزیتی می باشد پس سختی بالاتری را نیز دارد و این به معنی تلفات مغناطیسی بالاتر یا عبارتی نفوذپذیری مغناطیسی پایین تر این نمونه است. بنابراین به طور کلی در هر فاصله معین از سطح، برای نمونه هایی که عمقهای سخت شده آن رو به افزایش باشد، ریزساختار از فریت-پرلیت به سمت ریزساختار مارتنزیت با نفوذپذیری مغناطیسی پایین تر تغییر می کند و بنابر معادلات ۴، ۵ و ۶ امپدانس نرماله شده و اختلاف فاز نیز سیر نزولی خواهند داشت. تغییرات سختی و خروجی ها که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مؤید این مطلب می باشد.

۴. رسم پروفیل سختی با روش جریان های گردابی

قدم نهایی پس از برقراری ارتباط میان سختی و خروجی های جریان گردابی، تعیین سختی در عمقهای متفاوت برای نمونه ها و رسم پروفیل های سختی می باشد. مقادیر تعیین شده توسط خروجی های جریان گردابی و مقادیر واقعی بدست



شکل ۸. صفحه امپدانس و اثر عمق لایه سخت شده روی صفحه امپدانس.



شکل ۹. نمودار شماتیک تأثیر سختی و ریزساختار بر پاسخ های حاصل از جریان های گردابی.

در این مرحله از پژوهش ارتباط میان پاسخ های جریان گردابی و سختی های بدست آمده برای نمونه ها با ۸ عمق متفاوت و در فرکانس های مختلف بررسی شده اند.

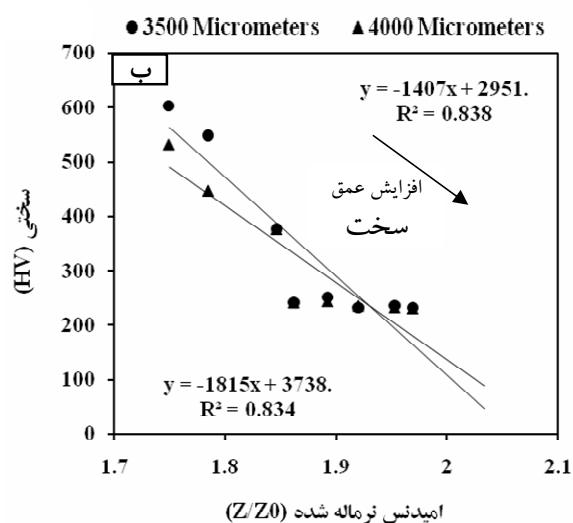
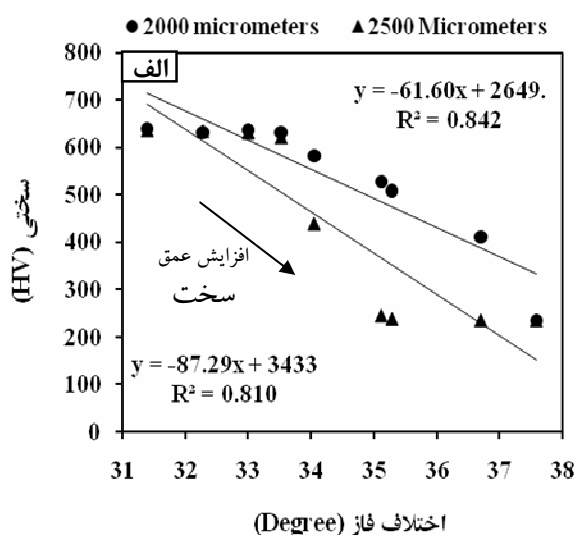
به این صورت که ارتباط بین ولتاژ اولیه (V_x)، ولتاژ ثانویه (V_y)، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان (Φ) و امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) به عنوان خروجی های حاصل از جریان گردابی در فواصل مشخص از سطح بر حسب سختی های بدست آمده در این عمق ها برای نمونه های مختلف در محدوده فرکانس های ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفت. در هر فاصله مشخص از سطح، یک رابطه خطی میان هریک از خروجی ها و سختی نمونه های مختلف در آن فاصله بدست آمد. با توجه به اینکه بهترین ارتباط ها (بالاترین رگرسیون ها) در فرکانس ۲۵ هرتز حاصل شد، لذا در این قسمت نیز این فرکانس به عنوان فرکانس بهینه انتخاب گردید.

جدول ۳. نتایج آنالیز رگرسیون خروجی‌های جریان گردابی بر حسب سختی در فواصل مختلف از سطح برای نمونه‌های با عمق‌های سخت شده متفاوت

Φ	Z/Z0	Vy	Vx	فاصله از سطح (μm)	Φ	Z/Z0	Vy	Vx	فاصله از سطح (μm)
۰/۷۸	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۷۷	۳۰۰۰	۰/۷۰	۰/۶۷	۰/۵۷	۰/۵۸	۱۰۰۰
۰/۷۸	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۷۷	۳۵۰۰	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۶۸	۱۵۰۰
۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۷۵	۴۰۰۰	۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۷۴	۲۰۰۰
۰/۵۹	۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۳۹	۴۵۰۰	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۷۲	۲۵۰۰

ضریب همبستگی (R^2)

ضریب همبستگی (R^2)



شکل ۱۰. الف) ارتباط میان اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان در عمق‌های ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ میکرومتر و ب) امپدانس نرماله شده در عمق‌های ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ میکرومتر از سطح بر حسب سختی.

آمده از میکروسختی سنجی نمونه‌ها برای نمونه ۵ ($ECD = 2300\mu\text{m}$ و $TCD = 3200\mu\text{m}$) در جدول ۴ نشان داده شده است. خطای کم در مقایسه با مقادیر حاصل از سختی سنجی حاکی از دقت مناسب این روش غیرمخرب در رسم پروفیل سختی می‌باشد.

همان طور که در جدول ۴ نشان داده است، در فواصل بسیار نزدیک به سطح (تا $1000\mu\text{m}$) به دلیل اینکه ریزساختار تمامی نمونه‌ها تماما مارتنزیتی می‌باشد، لذا پاسخ‌های ناشی از القای جریان در آن یکسان می‌باشد و نمی‌توان رابطه‌ای خطی بین سختی و خروجی‌های مذکور برقرار نمود. از آنجا که مقادیر سختی در این فواصل از سطح تقریبا برای تمامی نمونه‌ها ثابت و در محدوده ۶۴۰-۶۲۵ ویکرز می‌باشد، این مقادیر در هر دو روش یکسان در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ پروفیل رسم شده برای این نمونه را با دو روش مخرب (سختی سنجی) و غیرمخرب (جریان گردابی) مقایسه می‌کند.

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 می‌باشد. به این منظور از ارتباط بین عمق‌های سخت شده و خروجی‌های جریان‌های گردابی برای تعیین عمق لایه سخت شده بهره گرفته شد و رگرسیون حاصل از این ارتباطها ۰/۹۴ بدست آمد.

جدول ۴. مقادیر تعیین شده توسط خروجی‌های جریان گردابی و مقادیر واقعی حاصل از میکروسختی‌سنجی و میزان خطای حاصله.

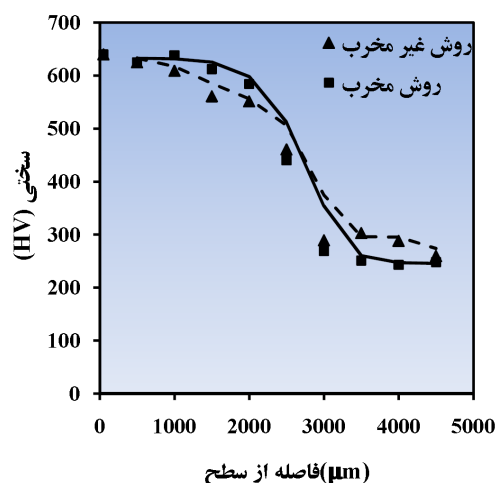
درصد خطا (%)	سختی (روش مخرب)(HV)	سختی (روش غیرمخرب)(HV)	خروجی جریان گردابی	فاصله از سطح (μm)
-	۶۴۰	۶۴۰	-	۵۰
-	۶۲۵	۶۲۵	-	۵۰۰
۴/۵	۶۳۸	۶۰۹	۳۴/۰۵۴	۱۰۰۰
۸/۳	۶۱۲	۵۶۱	۳۴/۰۵۴	۱۵۰۰
۵/۶	۵۸۴	۵۵۱	۳۴/۰۵۴	۲۰۰۰
-۴/۶	۴۴۰	۴۶۰	۳۴/۰۵۴	۲۵۰۰
-۷/۵	۲۶۹	۲۸۹	۳۴/۰۵۴	۳۰۰۰
-۲۰/۶	۲۵۱	۳۰۳	۱/۸۹۲	۳۵۰۰
-۱۸/۵۴	۲۴۳	۲۸۸	۱/۸۹۲	۴۰۰۰
-۴/۶	۲۴۸	۲۵۹	۱/۸۹۲	۴۵۰۰

تشکر و قدردانی

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

منابع

1. D. E. Bray and R. K. Stanley, *Nondestructive evaluation: a tool design, manufacturing and service*, CRC Press, Boca Raton FL, (1997), p. 415.
2. D. J. Hagemair, *Fundamentals of eddy current Testing*, ASNT, (1990).
3. D. E. Hughes, *The cause of evident magnetism in iron, steel, and other magnetic metals*, Journal of The Franklin Institute, 116(1883)128-150.
4. S. Konoplyuk, T. Abe, T. Uchimoto, T. Takagi and M. Kurosawa, *Characterization of ductile cast iron by eddy current method*, NDT&E International, 38(2005)623-626.
5. 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, 258(2003)493-496.
6. J. Cech, *Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods*, NDT International, 23(1990)93-102.



شکل ۱۱. پروفیل‌های سختی با استفاده از دو روش مخرب و غیر مخرب.

همچنین ارتباط بین سختی نمونه‌ها در عمق‌های متفاوت با خروجی‌های حاصل از جریان‌گردابی برای تمامی نمونه‌ها، بررسی شده و بر اساس آن با برقراری ارتباط بین سختی و اختلاف فاز تا عمق $3000\ \mu\text{m}$ و امپدانس نرماله شده از عمق $3500\ \mu\text{m}$ تا $5000\ \mu\text{m}$ در هر فاصله مشخص از سطح، پروفیل سختی برای تمامی نمونه‌ها تعیین و رسم شده و با مقادیر حاصل از سختی‌سنجی مقایسه گردید. درصد خطای کم ایجاد شده مؤید توانایی این روش در رسم پروفیل سختی به روش غیر مخرب است.

7. D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman and D. Chicot, *Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing*, NDT&E International, 39(2006)652-660.
8. V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar and B. Raj, *Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 171(1997)179-189.
9. M. Blaow, J. T. Evans and B.A. Shaw, *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. Capo-Sanchez, *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 and S. N. M. Willcock, *Magnetic and metallurgical properties of high-tensile steels*, Journal of Materials Science, 23(1988)4534-4540.
13. S. H. Khan, F. Ali, A. Nusair Khan and M. A. Iqbal, *Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method*, Journal of Materials Processing Technology, 200(2008)316-318.
14. M. SheikhAmiri and M. Kashefi, *Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels*, NDT&E International, 42(2009)618-621.
15. C. Zhang, N. Bowler and C. Lo, *Magnetic characterization of surface-hardened steel*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321(2009)3878-3887.
16. B. Zhu, M. Johnson and D. Jiles, *Evaluation of wear-induced material loss in case-hardened steel using magnetic barkhausen emission measurement*, IEEE Transaction on Magnetics, 36(2000)3602-3604.
17. C. C. H. Lo, E. R. Kinser, Y. Melikhov and 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, 820(2006)1253-1260.
18. M. Johnson, C. Lo, S. Hentscher and E. Kinser, *Analysis of conductivity and permeability profiles in hardened steel*, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX), IOS press, (2005)135-142.
19. M. Zergoug, S. Lebaili, H. Boudjellal and A. Benchaala, *Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing*, NDT&E International 37(2004)65-72.
20. J. Shull Peter, *Nondestructive evaluation theory, techniques and applications*, New York: Marcel Dekker, Inc, (2002), P.279.
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, 17(2008)586-593.