

کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی در فولادها

مهرداد کاشفی، سعید کهربائی و علیرضا صاحب علم

دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله : ۸۸/۱۰/۳۰ - پذیرش مقاله : ۸۹/۱/۲۱)

چکیده

کربن زدایی اثرات نامطلوبی بر خواص مکانیکی فولاد از جمله سختی، مقاومت به سایش و خستگی دارد. از آنجا که تقریباً در فرآیند تولید تمامی قطعات تولیدی در صنعت، حداقل یک مرحله عملیات در دمای بالا مانند فورج گرم یا عملیات حرارتی پیش بینی می شود، از نقطه نظر کاربردی تعیین عمق لایه کربن زدایی شده اهمیت ویژه دارد. روش های سنتی جهت تعیین عمق این لایه روش های مخرب شامل متالوگرافی و یا سختی سنجی است که وقت گیر و پرهزینه می باشند. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیرمخرب است که به سرعت اجرا شده و از آنجا که پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده مورد نظر حساس است، لذا به دلیل تفاوت خواص مغناطیسی لایه کربن زدایی شده با دیگر قسمت های قطعه، می توان از این روش غیر مخرب در تعیین عمق لایه کربن زدایی شده در قطعات فولادی بهره گرفت. در این پژوهش به منظور بدست آوردن عمق های متفاوت از لایه کربن زدایی شده، فولاد CK45 در دمای ۹۰۰°C در زمان های متفاوتی قرار داده شده و اندازه این لایه ها با سه روش مشاهدات میکروسکوپی، سختی سنجی و جریان گردابی تعیین گردیده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شده اند. در تحقیق حاضر، پارامترهای پاسخ به جریان القایی شامل ولتاژهای اولیه و ثانویه، اختلاف فاز ولتاژ و جریان، امپدانس نرماله شده و هارمونیک ها، مورد توجه و بررسی قرار گرفته اند. نتایج حاصله نشان دهنده دقت قابل قبول جریان گردابی در مقایسه با دو روش مخرب دیگر می باشد.

واژه های کلیدی: عمق لایه کربن زدایی شده، آزمون غیرمخرب، آزمون جریان گردابی، امپدانس نرماله.

Application of eddy current nondestructive method for determination of decarburizing depth in steels

M. Kashefi, S. Kahrobaee and A. Saheb Alam

Department of Materials Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Decarburization has undesirable effects on mechanical properties of steel parts such as hardness, wear and fatigue resistance. At least, one treatment stage at high temperature such as hot forging or heat treatment is predicted in almost any production process of industrial parts. As a result, determination of depth of the decarburized layer is especially important from practical point of view. Traditional destructive methods of determining depth of this layer, include metallographic or hardness test which are time-consuming and costly. Eddy current test is a non-destructive technique which is performed rapidly. Since its response is sensitive to chemical composition and microstructure of the material under consideration of non-destructive method can be used in determining depth of the decarburized layer in steel parts due to difference in the microstructures and as a result in magnetic properties of the decarburized layer with other parts of specimen. In this study Fe-0.45 wt.% C steel was held in 900°C for different period of time and depth of these layers were determined by using three methods: microscopic observations, hardness test measurements and non-destructive eddy current technique. The results were compared to each other. In present research, the respond of test samples to induction current including primary and secondary voltages, normalized impedance and harmonics are considered and examined. Results show acceptable accuracy in comparison with two other destructive methods.

Keywords: The Depth of the Decarburized Layer, Non-Destructive Test, Eddy Current Test, Normalized Impedance, www.SID.ir

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

مقدمه

لازمه اغلب عملیات حرارتی‌هایی که بر روی فولادها صورت می‌گیرد، قرارگیری آنها در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد تا فاز آستنیتی حاصل شود. در این دماها کربن موجود در سطح فولاد به خارج از سطح نفوذ کرده و با اکسیژن موجود در اتمسفر محیط واکنش داده و به صورت گاز مونوکسیدکربن خارج می‌شود. به این فرآیند کربن زدایی می‌گویند. فقدان کربن در سطح باعث کاهش خواص مکانیکی قطعه فولادی می‌شود [۱]. در تحقیقات صورت گرفته بر روی کربن زدایی فولادها [۲،۳] مشخص شده است که این پدیده به شدت خواصی چون مقاومت به خوردگی [۴] و مقاومت به خستگی [۵] را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

بر طبق استاندارد ISO 3887، دو روش برای کنترل و اندازه‌گیری لایه کربن‌زدایی شده وجود دارد. روش اول شامل مشاهدات ریزساختار پس از عملیات اچ کردن با میکروسکوپ نوری می‌باشد. عیب بزرگ این روش مشکل بودن تفکیک دو ناحیه کربن‌زدایی شده و کربن زدایی نشده می‌باشد. روش دوم شامل رسم پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه بعد از پولیش سطحی می‌باشد. روش‌های بیان شده، همگی روشهایی مخرب هستند که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند و از طرفی امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش‌ها امکان‌پذیر نیست.

امروزه کاربرد روش‌های غیرمخرب تنها به بازرسی عیوب و ترکیابی محدود نمی‌شوند. با توجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب در فرآیندهای کنترلی تولیدات صنعتی، در سال‌های اخیر به تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد و بدست آوردن نتایج آزمون‌های مخرب با کمک روش‌های غیرمخرب توجه بسیاری شده است. این امر سبب صرفه‌جویی از لحاظ هزینه و زمان، در تولید انبوه قطعات صنعتی شده و امکان کنترل صددرصد قطعات را فراهم آورده است. از این میان آزمون غیرمخرب جریان گردابی مزایای منحصر به فردی دارد. حساسیت این آزمون به ترکیب شیمیایی و ریزساختار و خواص مکانیکی را می‌توان جزء مهمترین

عواملی دانست که باعث توجه ویژه به این روش شده است [۷و۶].

کاناپلایک^۱ ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده [۸] و یوچی موتو و چک^۲، در پژوهش‌هایی جداگانه، همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان داده‌اند [۹و۱۰]. تعیین عمق کربن‌زدایی شده در فولاد باریزساختار مارتزیتی با کمک آنالیز هارمونیک [۱۱] و همچنین براساس پیک‌های اضافی ظاهر شده در پروفیل سیگنال بارک هازون (MBN)^۳ [۱۲،۱۳] گزارش شده است. تاثیر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی نیز توسط محققین بررسی و تأیید شده است [۱۴و۱۵و۱۶]. خان^۴ و کاشفی درصد پرلیت فولاد [۱۷و۱۸] و نیز درصد کربن سطح را در فولادهای کربن دهی شده [۱۹] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، ارتباط مناسبی بین عمق لایه کربن‌زدایی شده با خروجی-های اندازه‌گیری شده از آزمون جریان گردابی (ولتاژ اولیه و ولتاژ ثانویه) و پارامترهای محاسبه شده از این خروجی‌ها (امپدانس نرماله شده و اختلاف فاز و هارمونیک ۳ و ۵) برقرار شده است.

مواد و روش آزمایش‌ها

در این بررسی از فولاد ساده کربنی CK45 استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. تعداد ۵ نمونه استوانه‌ای شکل به قطر ۳۱.۵ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر تهیه گردید. نمونه‌ها به مدت زمان های ۱ تا ۴/۵ ساعت، دردمای ۹۰۰°C قرار داده شدند تا عمق‌های کربن زدایی شده متفاوتی ایجاد شود. بعد از انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها، عملیات سمباده زنی و پولیش روی نمونه‌ها صورت گرفت و سپس با محلول نایتال ۲٪ اچ شدند.

¹ Konoplyuk

² Uchimoto, Check

³ Magnetic Barkhausen Noise

⁴ Khan

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده (CK45)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۹

کربن زدایی شده، بررسی و به این طریق نیز امکان پیش بینی عمق لایه کربن زدایی شده حاصل گشت.

نتایج و بحث

نتایج مشاهدات میکروسکوپی و پروفیل های سختی

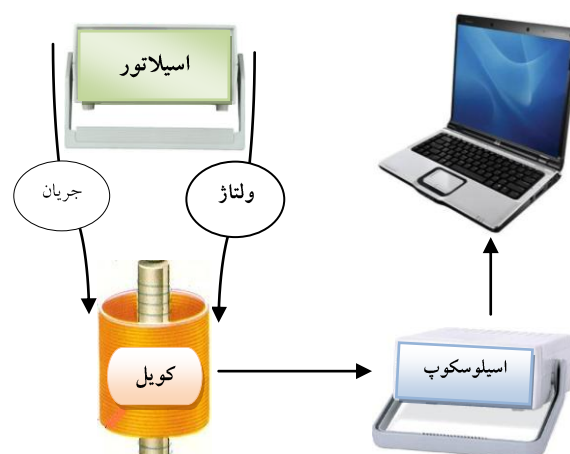
در شکل ۱-۲، تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی از ریزساختار نمونه کربن زدایی شده که به مدت ۳/۵ ساعت در دمای 900°C قرار داده شده، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در نزدیکی سطح، قسمت کربن زدایی شده سفید رنگ است که نشان دهنده نفوذ و خروج کربن از سطح در دمای 900°C و در نتیجه ایجاد ساختار فریتی پس از سرد شدن و گذشتن از دمای استحاله می باشد. در قسمت داخلی به طرف مغز قطعه که نفوذ و خروج کربن به بیرون صورت نگرفته، ساختار فریتی-پرلیتی (شامل ۶۰٪ پرلیت) به رنگ تیره تر مشاهده می شود.

بنابراین عمق کربن زدایی شده ی کل عبارتست از فاصله از سطح روشن نمونه (فاز فریت) به سمت مغز تا جایی که مخلوطی از فریت و پرلیت با درصد کمتر پرلیت نسبت به مغز قطعه قابل مشاهده و تفکیک باشد. همانطور که انتظار می رود، تفکیک ناحیه کربن زدایی کل از مغز نمونه، مشکل و بر اساس تفاوت رنگ می باشد. به همین جهت همان طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می شود، با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر MIP، بر اساس تفاوت رنگ موجود، اندازه عمق های مختلف مطابق با مندرجات جدول ۲ بدست آمد.

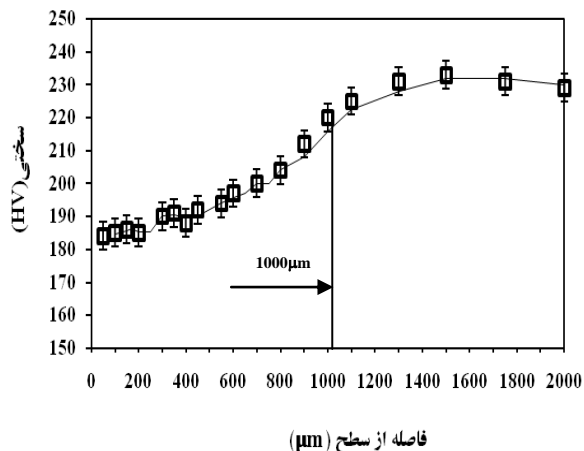
بررسی ارتباط بین میکروسختی و ریزساختار در مواد کاربرد فوق العاده زیادی دارد. در پژوهش حاضر، سختی در دو فاز فریت (۱۸۰ ویکرز) و فریت-پرلیتی در مغز نمونه (۲۳۰ ویکرز) بوده و به این ترتیب لایه کربن زدایی شده با ساختار فریتی از نظر سختی از قسمت مغز نمونه با ساختار فریتی پرلیتی قابل تمیز می باشد.

سپس عمق های ایجاد شده با دو روش متالوگرافی (تغییر رنگ نمونه بعد از اچ کردن به کمک نرم افزار پردازش تصویر MIP) و سختی سنجی پرحسب ویکرز (با استفاده از رسم پروفیل سختی) اندازه گیری شد تا با نتایج حاصل از روش غیر مخرب جریان گردابی مقایسه گردد.

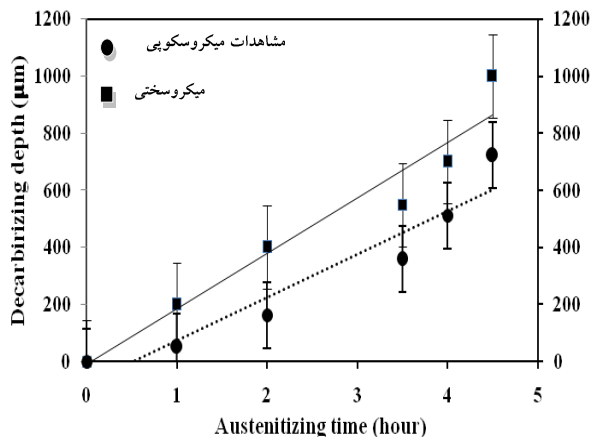
پس از آماده شدن تمام نمونه ها تست ادی کارنت بر روی آنها صورت گرفت. تمامی آزمون های غیرمخرب با دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی که قابلیت تولید فرکانس هایی از ۱هرتز تا ۲مگاهرتز را دارا است و طرح شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، انجام شد. تمامی نمونه ها در کویل با ضریب پرشوندگی ۰/۹۸ و دمای ثابت 27°C آزمایش شدند. این آزمون در محدوده فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز انجام شد و فرکانس بهینه تعیین گردید. در ادامه پارامترهای ولتاژ ورودی و خروجی و آمپر ورودی اندازه گیری گردیده و پس از اندازه گیری این پارامترها، امپدانس و اختلاف فاز ایجاد شده محاسبه شد. در نهایت ارتباط تمامی خروجی ها با عمق لایه کربن زدایی شده، بررسی گردید. همچنین با بکار بردن آنالیز هارمونیک (اعمال تابع فوریه) و بدست آوردن هارمونیک های موج رسیده از دستگاه، ارتباط آنها با عمق لایه



شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی



شکل ۳. پروفیل سختی برای نمونه‌ی ۴/۵ ساعت کربن زدایی شده

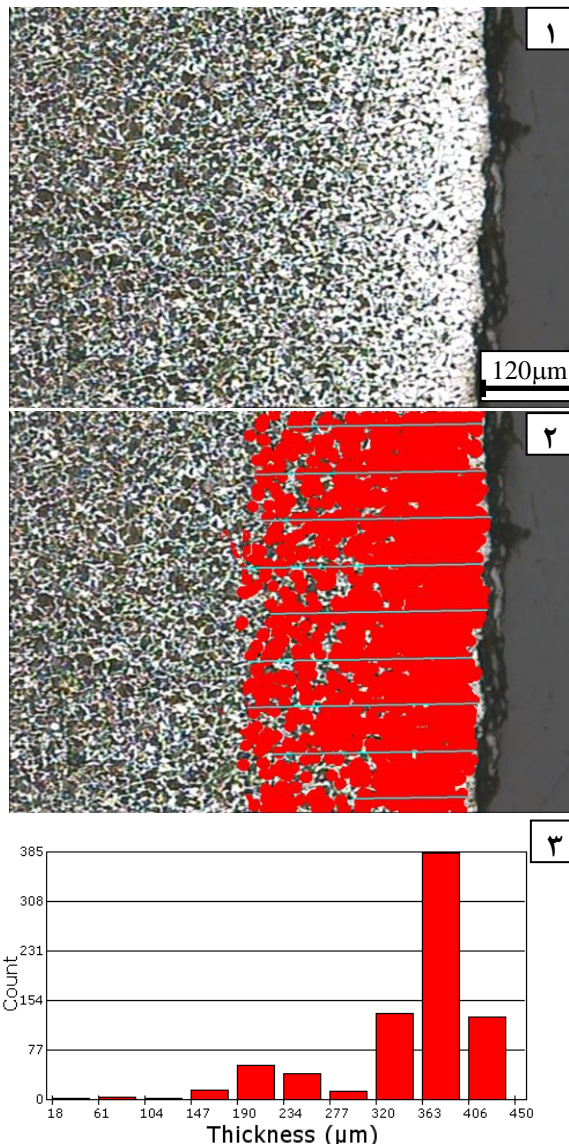


شکل ۴. عمق لایه کربن زدایی شده با دو روش مشاهدات میکروسکوپی و پروفیل سختی برحسب زمان آستنیت‌ه کردن

شکل ۴ عمق لایه کربن زدایی شده را برحسب زمان آستنیت کردن برای دو روش فوق نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود میزان عمق لایه اندازه گیری شده در دو روش مشاهده میکروسکوپی ریزساختار و رسم پروفیل سختی متفاوت می‌باشد. در اینجا به دلیل مشکلاتی که در روش بررسی میکروسکوپی ذکر شد، اندازه‌گیری‌های حاصل از روش میکروسختی به عنوان معیار مقایسه با آزمون غیرمخرب جریان گردابی قرار می‌گیرند.

روش غیر مخرب جریان گردابی

روش‌های بیان شده، همگی روش‌هایی مخرب هستند که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند و از طرفی امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش‌ها امکان‌پذیر نیست.



شکل ۲. نمونه کربن زدایی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳/۵ ساعت (۱ ریزساختار ۲) پردازش اتوماتیک تصویر به کمک کامپیوتر (۳) توزیع فراوانی عمق لایه کربن زدایی شده

در شکل ۳ پروفیل سختی یک نمونه از قطعات با مدت زمان قرار گیری ۴/۵ ساعت در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. عمق اندازه گیری شده با روش سختی سنجی ۱۰۰۰ میکرومتر بدست آمده است. عمق‌های کربن زدایی شده برای سایر نمونه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

تعیین عمق کربن زدایی شده بر اساس تفاوت در ریزسختی نسبت به روش مشاهده میکروسکوپی آسان تر بوده و دقت بالاتری نیز دارد.

جدول ۲. اندازه عمق های کربن زدایی شده با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر

زمان آستنیتته (ساعت)	۱	۲	۳/۵	۴	۴/۵
عمق لایه کربن زدایی شده (μm)	۵۲	۱۶۳	۳۵۹	۵۱۲	۷۲۳

جدول ۳. اندازه عمق های کربن زدایی شده با استفاده از رسم پروفیل سختی

زمان آستنیتته (ساعت)	۱	۲	۳/۵	۴	۴/۵
عمق لایه کربن زدایی شده (μm)	۲۰۰	۴۰۰	۵۵۰	۷۰۰	۱۰۰۰

پیچ اولیه در مدار قرار گیرد، با رسم نمودار جریان و ولتاژ می توان اختلاف فاز بین آن ها را بدست آورد. برای این کار، 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 ۱ مقدار اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ (ϕ)، با کمک نرم افزار، MATLAB تعیین گردید.

$$\Phi = 360(\Delta t/T) \quad (1)$$

شکل ۵، این ارتباط را در فرکانس ۵۰ هرتز نشان می دهد. با توجه به ضریب همبستگی این ارتباط ($R^2 = 0.84$)، برای این خروجی می توان اطمینان قابل قبولی را در پیش بینی عمق کربن زدایی شده، در نظر گرفت.

جهت یافتن ارتباطی بهتر، با استفاده از معادله ۱ و ۲، از ولتاژ (V) و جریان (I) کوئل برای محاسبه امپدانس (Z) برای تمامی نمونه ها استفاده شد.

$$Z = V/I \quad (2)$$

با تقسیم امپدانس محاسبه شده برای هر نمونه بر امپدانس کوئل خالی (Z_0)، پارامتر جدیدی تحت عنوان امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) حاصل می شود [۲۱ و ۲۰]. ارتباط بین امپدانس نرماله شده و عمق کربن زدایی شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ضریب همبستگی ۰/۹۳، نشان دهنده ضریب اطمینان بسیار بالا در پیش بینی عمق کربن زدایی شده با استفاده از این خروجی می باشد.

فرایند کربن زدایی در دماهای بالا (1200°C – 800°C) یک شیب غلظتی از کربن را که از مغز نمونه تا سطح کاهش می یابد، ایجاد می کند. در حین سرد شدن از فاز آستنیت، لایه سطحی با مقادیر کربن کمتر، به فاز فریت تبدیل می شود در

پاسخ جریان گردابی تحت تأثیر ۲ پارامتر مهم ریزساختار و تنش باقیمانده می باشد [۷]. در اثر عملیات نرماله کردن نمونه ها و ایجاد ریزساختار (فریت-پرلیتی)، تنش باقیمانده در تمامی نمونه ها از بین رفته و بنابراین در پاسخ جریان گردابی اثری نداشته و ریزساختار به طور مستقیم تحت تأثیر ترکیب شیمیایی می باشد بنابراین پاسخ جریان گردابی در صورتی که نمونه ها تحت عملیات حرارتی یکسان قرار گرفته باشند، به طور غیرمستقیم تحت تأثیر ترکیب شیمیایی می باشد [۱۹].

با هدف تعیین فرکانس بهینه از روش آنالیز رگرسیون نتایج استفاده گردید [۶ و ۷]. به این ترتیب که در هر فرکانس ضریب همبستگی (R^2) بین خروجی های حاصل از جریان های گردابی و عمق لایه کربن زدایی شده را بدست آورده، در فرکانسی که بالاترین مقدار برای این ضریب حاصل شود، فرکانس بهینه نیز حاصل خواهد شد. بدین منظور آزمون جریان گردابی در ۵ فرکانس ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ هرتز انجام شد و ضریب همبستگی (R^2) در فرکانس ۵۰ هرتز برای خروجی های مختلف، بیشترین مقدار را دارا بوده و به عنوان فرکانس بهینه جهت تعیین عمق کربن زدایی شده، انتخاب گردید. ولتاژهای اولیه و ثانویه، از جمله پارامترهایی از جریان گردابی هستند که می توان آنها را مستقیماً از ورودی و خروجی کوئل اندازه گیری کرد. شکل ۵ ارتباط بین عمق کربن زدایی شده با ولتاژهای اولیه و ثانویه را نشان می دهد. ضریب همبستگی (R^2) بدست آمده برای هر کدام از ولتاژهای اولیه و ثانویه، نشان دهنده ارتباطی نه چندان مناسب با عمق کربن زدایی می باشد.

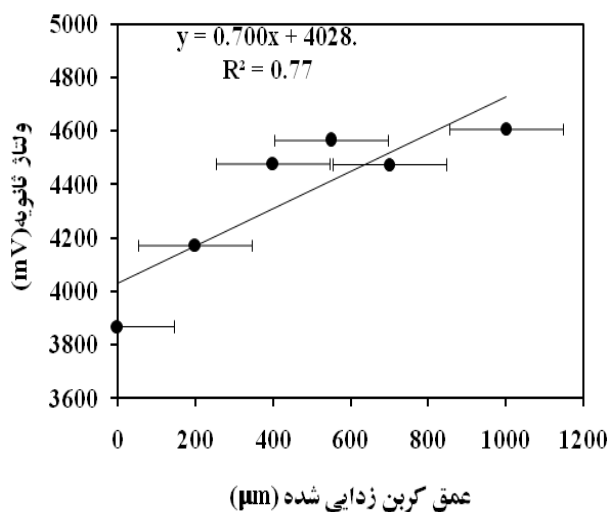
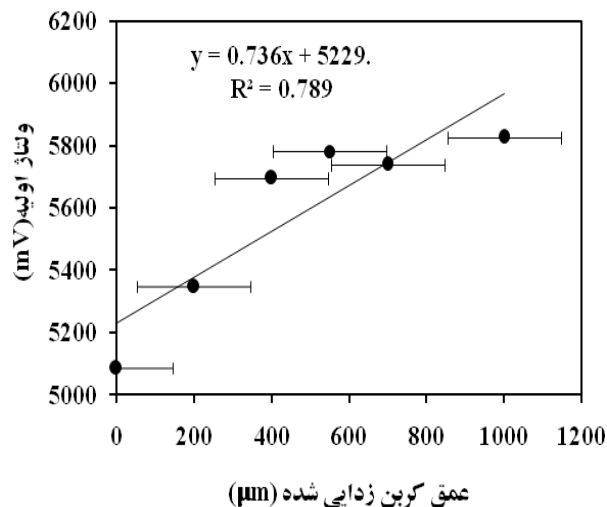
اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ (ϕ) یکی از پارامترهای قابل محاسبه توسط آزمون جریان گردابی است. چنانچه تنها سیم

حالی که قسمت داخلی در حین سرد کردن بعد از عبور از دمای بحرانی به فاز پرلیت (در سرد کردن تعادلی) و یا فاز مارتنزیت (در سرد کردن غیر تعادلی) تبدیل می‌شود. که فازهای حاصله دارای خواص مغناطیسی متفاوتی می‌باشند. تامپسون^۱ و تننر^۲ [۲۲] نفوذپذیری نسبی پرلیت را در فولادی با ۰/۸ درصد کربن را برابر ۵۶ و در فولادی با ۰/۱۷ کربن، (شامل فریت با مقادیر بسیار کمی پرلیت)، در حدود ۲۸۰ گزارش کرده اند. از آنجا که نفوذپذیری فریت بسیار به ترکیب، ریزساختار و عملیات حرارتی و شرایط مکانیکی وابسته است، رنج وسیعی از مقادیر برای آن گزارش شده است. به عنوان مثال برای فولادهای کم کربن [۲۳] ۳۵۰ و برای فولادهای کربن زدایی شده که درصد کربن کمتر از ۰/۰۰۵ درصد باشد، در حدود ۲۲۰۰-۲۴۰۰ گزارش شده است [۲۴].

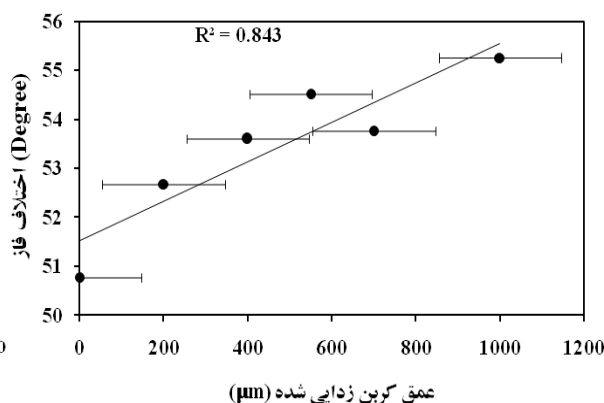
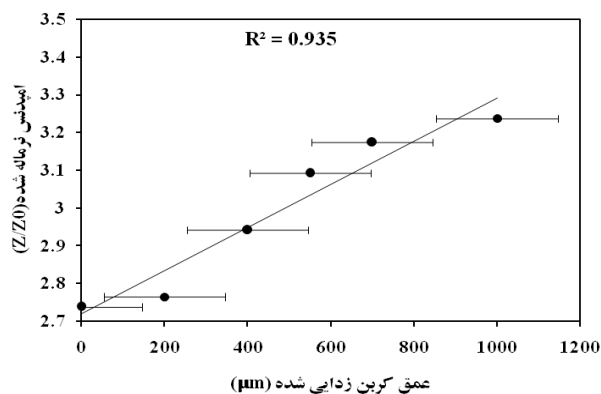
در هر صورت مشخص است که نفوذپذیری مغناطیسی در فاز فریت بسیار بیشتر از فاز پرلیت می‌باشد. پس با افزایش عمق لایه کربن زدایی شده یا به عبارتی درصد فاز فریت، افزایش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) را شاهد هستیم. از طرفی رابطه ۳ بیان می‌کند که با افزایش تراوایی مغناطیسی (μ)، مقدار ضریب خودالقایی (L) افزایش می‌یابد.

$$L = \mu N^2 A / l \quad (3)$$

که در آن μ نفوذپذیری مغناطیسی، N تعداد دور سیم پیچ، A سطح مقطع نمونه و l طول سیم پیچ می‌باشد. در نتیجه



شکل ۵. ارتباط بین عمق لایه کربن زدایی شده و ولتاژهای اولیه و ثانویه ناشی از القای جریان‌های گردابی، در فرکانس ۵۰ هرتز



شکل ۶. ارتباط بین عمق لایه کربن زدایی شده و اختلاف فاز ولتاژ و جریان و امپدانس نرماله شده، در فرکانس ۵۰ هرتز

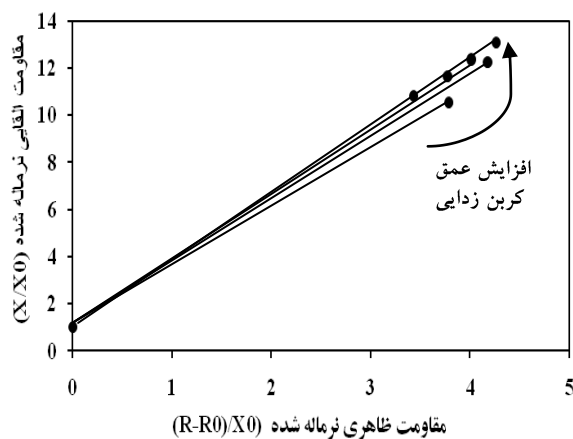
¹ Thompson

² Tanner

نتایج محاسبات در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل اثر عمق کربن زدایی شده بر روی موقعیت نقاط امپدانس جهت محاسبه Φ نشان داده شده است. همچنین این شکل نشان می دهد که با افزایش عمق کربن زدایی در نمونه ها، مقدار Φ افزایش می یابد که دلیل آن افزایش نفوذپذیری مغناطیسی با افزایش عمق این لایه می باشد.

در انتها، بر روی پاسخ جریان گردابی (ولتاژ اولیه) و سیگنال بدست آمده از آن، آنالیز هارمونیک (اعمال تابع فوریه) در فرکانس ۵۰ هرتز صورت گرفت و پس از محاسبه قسمت های موهومی و حقیقی هر هارمونیک و همچنین مقادیر مدول بدست آمده از آنها به طور جداگانه (جدول ۴)، ارتباط بین آنها با عمق های مختلف کربن زدایی شده بررسی شد.

همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ارتباط قابل قبول در هارمونیک های ۳ و ۵ حاصل گشت که نشان دهنده افزایش مقدار مدول برای هارمونیک ها با افزایش عمق کربن زدایی شده می باشد.



شکل ۷. صفحه امپدانس و اثر عمق کربن زدایی شده روی نقطه امپدانس

طبق روابط زیر با افزایش Φ مقدار مقاومت القایی (X_L) و امپدانس (Z) نیز افزایش می یابد.

$$X_L = 2\pi fL \quad (4)$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I \quad (5)$$

بنابراین افزایش در امپدانس دلیلی بر افزایش ولتاژ اولیه و ثانویه (V) و امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان گردابی در نمونه های با عمق کربن زدایی بیشتر می باشد که در شکل های ۵ و ۶ چنین ارتباطی مشاهده می گردد.

برای فهم بیشتر اثر عمق کربن زدایی شده در فولادها بر روی پاسخ حاصل از جریان گردابی خصوصا اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان (Φ)، صفحه امپدانس (مقاومت القایی (X) نرماله شده بر حسب مقاومت ظاهری (R) نرماله شده) برای همه نمونه ها رسم شده است.

برای محاسبه X و R نرماله شده، ابتدا مقاومت و راکتانس کوئل (به ترتیب قسمت های حقیقی و موهومی Z) برای هر نمونه محاسبه شد.

$$Z = R + iX \quad (R = Z\cos(\Phi), X = Z\sin(\Phi)) \quad (6)$$

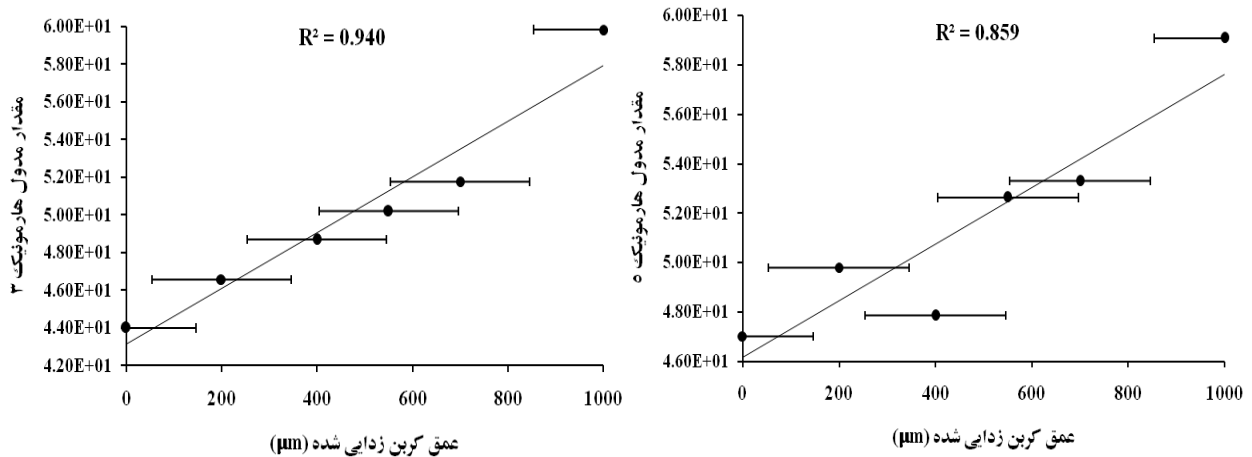
در نهایت از معادلات ۷ و ۸ جهت محاسبه X و R نرماله شده، استفاده گردید. [۲۱، ۲۰].

$$\text{Normalized } R = (R-R_0)/X_0 \quad (7)$$

$$\text{Normalized } X = X/X_0 \quad (8)$$

جدول ۴. قسمت های موهومی و حقیقی هر هارمونیک و همچنین مقادیر مدول بدست آمده از آنها

زمان استثنیه (ساعت)	۰	۱	۲	۳/۵	۴	۴/۵	
عمق کربن زدایی شده (μm)	۰	۲۰۰	۴۰۰	۵۵۰	۷۰۰	۱۰۰۰	
قسمت موهومی هارمونیک	هارمونیک ۳	۴/۰۹	۲/۲۴	۶/۵۲	۳/۹۷	۴/۵۲	۴/۷۵
	هارمونیک ۵	۱۲/۲	۷/۵۱	۱۰/۶	۸/۸۶	۱۱/۸	۱/۱۱
قسمت حقیقی هارمونیک	هارمونیک ۳	۴۳/۸	۴۶/۶	۴۸/۲	۵۰	۵۱/۵	۵۹/۶
	هارمونیک ۵	۴۵/۶	۴۹/۳	۴۶/۷	۵۱/۹	۵۱/۹	۵۸
مقدار مدول	هارمونیک ۳	۴۴	۴۶/۶	۴۸/۷	۵۰/۲	۵۱/۸	۵۹/۸
	هارمونیک ۵	۴۷	۴۹/۸	۴۷/۹	۵۲/۶	۵۳/۳	۵۹/۱



شکل ۸. ارتباط بین عمق لایه کربن زدایی شده و مقادیرمدول برای هارمونیک‌های ۳ و ۵، در فرکانس ۵۰ هرتز

مراجع

1. S. Wei, Z. Jinhua, X. Liujie and L Rui, *Effects of carbon on microstructures and properties of high vanadium high-speed steel*, Materials and Design, 17(2005)58-63.
2. A. F. Brown and D. J. Hayes, *Observations on the decarburization and graphitization of steels by sodium*, Journal of Nuclear Materials, 127(1968)187-194.
3. C. Standaert, K. Eloit, A. De Paepe and P. Wokowski, *Decarburization of interlocked and laser welded stator and rotor cores*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160(1996)139-140.
4. P. L. F. Rademakers and B. H. Kolster, *Corrosion of various ferritic steels in an isothermal sodium loop system*, Journal of Nuclear Materials, 97(1981)309-318.
5. R. B. Waterhouse and D. E. Taylor, *The effect of heat treatment and decarburization on the fatigue behaviour of a 0.7% carbon steel*, Proc, Inst. Mech Eng Wear, 19(1972)364-365.
6. D. E. Bray and R. K. Stanley, *Nondestructive evaluation: a tool design, manufacturing and service*, CRC Press, Boca Raton FL, (1997), p. 415.
7. D. J. Hagemair, *Fundamentals of Eddy Current Testing*, ASNT, (1990).
8. 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.
9. 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.
10. J. Cech, *Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods*, NDT International, 23(1990)93-102.
11. 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.
12. S. Vaidyanathan, V. Moorthy, T. Jayakumar and B. Raj, *Evaluation of induction hardened case depth using magnetic barkhausen emission*, Materials Science and Technology Materials Evaluation, 16(2000) 202-208.
13. M. Blaow, J. T. Evans and B. A. Shaw, *Surface decarburization of steel detected by magnetic barkhausen emission*, Journal of Materials Science, 40(2005) 5517-5520.
14. 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.
15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. میثم شیخ امیری و مهرداد کاشفی، کاربرد روش غیر مخرب جریان گردابی در تعیین میزان پرلیت فولاد، سومین همایش مشترک انجمن مهندسیین متالورژی و انجمن علمی ریخته گران ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۸) ۱۱۳-۱۲۲.
 19. 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(2009)618-621.
 20. J. Shull Peter, *Nondestructive evaluation theory, techniques and applications*, New York: Marcel Dekker, Inc, (2002). p. 279.
 21. S. M. Thompson and B. K. Tanner, *The magnetic properties of pearlitic steels as a function of carbon content*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 123(1993)283-298.
 22. D. C. Jiles, *Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels*, Journal of Physics D: Applied Physics, 21(1988)1186-1195.
 23. R. Ranjan, D. C. Jiles and P. K. Rastogi, *Magnetic Properties of decarburized steels: An investigation of the effects of grain size and carbon content*, IEEE Transaction on Magnetics, 23(1987)1869-1876.