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

مهرداد کاشفی، سعید کهربائی و علیرضاصاحبعلم دانشکاده مهنادسی مواد – دانشگاه فردوسی مشهاد (دریافت مقاله : ۸۸/۱۰/۳۰ – پذیرش مقاله : ۸۹/۱/۲۱)

چکیدہ

کربن زدایی اثرات نامطلوبی بر خواص مکانیکی فولاد از جمله سختی، مقاومت به سایش و خستگی دارد. از آنجا که تقریبا 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 ویا سختی سنجی است که وقت گیر و پرهزینه می باشند. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیر مخرب است که به سرعت اجرا شده و از آنجا که پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریز ساختار ماده موردنظر حساس است، لذا به دلیل تفاوت خواص مغناطیسی لایه کربن زدایی شده با دیگر قسمت های قطعه، می توان از شیمیایی و ریز ساختار ماده موردنظر 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 دلامی گیه کربن زدایی شده در قطعات فولادی بهره گرفت. در این پژوهش به منظور بدست آوردن عمق های متفاوت وین 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 وین 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 وین روش غیر مخرب در تعیین عمق لایه کربن زدایی شده در زمانهای متفاوتی قرار داده شده و اندازه این لایه ها با سه روش مشاهدات میکروسکوپی، وین روش این می می این گردایی 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 هارمونیکها ، مورد توجه و بررسی قرار گرفته اند. نتایج حاصله نشان ده در دقت قابل قرل جریان گردایی در مقایسه با دو روش مخر 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

عواملی دانست که باعث توجه ویژه به این روش شده است[۶و ۷].

کاناپلایک' ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده[۸] و یوچی موتو و چک، در پژوهشهایی جداگانه، همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان دادهاند [۹و ۱۰]. تعیین عمق کربنزدایی شده در فولاد باریزساختار مارتنزیتی با کمک آنالیز هارمونیک[۱۱] و همچنین براساس پیکهای اضافی ظاهر شده در پروفیل سیگنال بارک هازون (MBN) " [۱۲،۱۳] گزارش شده است. تأثیر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی نیز توسط محققین بررسی و تأیید شده است[۱۴و۱۵و۱۶]. خان ً و کاشفی درصد پرلیت فولاد [۱۸و ۱۸] و نیز درصد کربن سطح را در فولادهای کربن دهمی شده [۱۹] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی مورد بررسی قرار داده اند. در این پژوهش، ارتباط مناسبی بین عمق لایه کربنزدایی شده با خروجی-های اندازه گیری شده از آزمون جریان گردابی (ولتاژ اولیه و ولتاژ ثانویه) و پارامترهای محاسبه شده از این خروجی ها (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. نمونه ها به مدت زمان های ۱ تا ۲/۵ ساعت، دردمای ۲۰۰۰ قرار داده شدند تا عمق های 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. لازمه اغلب عملیات حرارتی هایی که بر روی فولادها صورت می گیرد، قرارگیری آنها در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می باشد 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 می شود. به این فرآیند کربن زدایی می گویند. فقدان کربن در سطح باعث کاهش خواص مکانیکی قطعه فولادی می شود[۱]. در تحقیقات صورت گرفته بر روی کربن زدایی فولادها [۲۰۳] مشخص شده است که این یدیده به

به خستگی[۵] را تحت تاثیر قرار میدهد. بر طبق استاندارد ISO 3887 ، دو روش برای کنترل و اندازه گیری 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. روش های بیان شده، همگی روشهایی مخرب هستند که وقت گیر و هزینهبر میباشند و از طرفی امکان کنترل روش ها امکان پذیر نیست.

شدت خواصی چون مقاومت به خوردگی [۴] و مقاومت

امروزه کاربرد روش های غیرمخرب تنها به بازرسی عیوب و ترکیابی محدود نمی شوند. با توجه به توانایی ها و مزایای روش های غیرمخرب در فرآیندهای کنترلی تولیدات صنعتی، در سال های اخیر به تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد و بدست آوردن نتایج آزمون های مخرب با کمک روش های غیرمخرب توجه بسیاری شده است. این امر سبب صرفه جویی ازلحاظ 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 می دارد. حساسیت ایا آزمون به ترکیب شیمیایی و ریزساختار و خواص مکانیکی را می توان جزء مهمترین

مقدمه

¹ Konoplyuk

² Uchimoto, Check

³ Magnetic Barkhausen Noise

⁴ Khan

کاشفی و همکاران، کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی در فولادها، علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹) 🛛 ۴۳

С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni
• / ٤ ٤	•/٢٥	•/0V	*/**£	•/•٣•	•/10	•/•٣	٠/٠٩

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده (CK45)

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 برحسب 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 جریانگردابی که قابلیت تولید فرکانس هایی از اهرتز تا ۲مگاهرتز را دارا ست و طرح شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است ،انجام شد. تمامی نمونه ها درکویل با ضریب پرشوندگی ۸۹/۰ و دمای ثابت ۲۰⁰ 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 هارمونیک (اعمال تا با فریس) و بدست آوردن



شکل ۱. تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی www.SID.ir

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

نتايج و بحث

نتایج مشاهدات میکروسکوپی و پروفیل های سختی در شکل ۲-۱، تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی از ریزساختار نمونه کربن زدایی شده که به مدت ۳/۵ ساعت در دمای ۵۹۰۰ 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 ۵۹۰۰ و در نتیجه ایجاد ساختار فریتی پس ازسرد شدن و گذشتن از دمای استحاله میباشد. در قسمت داخلی به طرف مغز قطعه که نفوذ و خروج کربن به بیرون صورت نگرفته، ساختارفریتی – 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 میرود، 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.



فاصله از سطح (µm)

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



شکل ۴. عمق لایه کربنزدایی 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 می دهد. همان طور که مشاهده می شود میزان عمق لایه اندازه گیری شده در دو روش مشاهده میکروسکوپی ریزساختار و رسم پروفیل سختی متفاوت می باشد. در اینجا به دلیل مشکلاتی که در روش بررسی میکروسکوپی ذکر شد، اندازه گیری های حاصل از روش میکروسختی به عنوان معیار مقایسه با آزمون غیرمخرب جریان گردابی قرار می گیرند.

روش غیر مخرب جریان گردابی

روش های بیان شده، همگی روشهایی مخرب هستند که وقتگیر و هزینهبر میباشند و از طرفی امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش ها امکان پذیر نیست.



شکل ۲. نمونه کربن زدایی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳/۵ ساعت۱) 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 سانتی گراد نشان داده شده است. عمق اندازه گیری شده با روش سختی سنجی ۱۰۰۰ میکرومتر بدست آمده است. عمقهای کربن زدایی شده برای سایر نمونه ها در جدول۳ 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. www.SID.ir کاشفی و همکاران، کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی در فولادها، علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹) 🛛 ۴۵

تصوير	پردازش	م افزار	از نر	استفاده	ه با.	زدایی ش	كربن	های	عمق	اندازه	۲.	جدول
-------	--------	---------	-------	---------	-------	---------	------	-----	-----	--------	----	------

زمان آستنيته (ساعت)	١	٢	٣/٥	٤	٤/٥
عمق لایه کربن زدایی شده (µm)	07	٦٦٣	309	017	٧٢٣

جدول۳. اندازه عمق های کربن زدایی شده با استفاده از رسم پروفیل سختی

زمان آستنيته (ساعت)	١	۲	٣/٥	٤	٤/٥
عمق لايه كربن زدايي شده (μm)	7	٤ • •	00+	V••	1

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 تاثیر ترکیب شیمیایی می باشد بنابراین پاسخ جریان گردابی در صورتی که نمونه ها تحت عملیات حرارتی یکسان قرار گرفته باشند، به طور غیر مستقیم تحت تأثیر ترکیب شیمیایی می باشد[۱۹].

با هدف تعیین فرکانس بهینه از روش آنالیز رگرسیون نتایج استفاده گردید [۶ و۷]. به این ترتیب که در هر فرکانس ضریب همبستگی(R²) بین خروجی های حاصل از جریان های گردابی و عمق لایه کربنزدایم شده را بدست آورده، در فرکانسی کے بالاترین مقدار برای این ضریب حاصل شود، فركانس بهينه نيـز حاصـل خواهـد شـد. بـدين منظور آزمون جریان گردابی در ۵ فرکانس ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ هرتز انجام شد و ضریب همبستگی (R²) در فرکانس ۵۰ هرتز برای خروجیهای مختلف، بیشترین مقدار را دارا بوده و به عنوان فرکانس بهینه جهت تعیین عمق کربنزدایی شده، انتخاب گردید. ولتاژهای اولیه و ثانویه، از جمله پارامترهایی از جریان گردابی هستند که میتوان آنها را مستقیما از ورودی و خروجی کویل اندازه گیری کرد. شکل۵ ارتباط بین عمق کربن زدایی شده با ولتاژهای اولیه و ثانویه رانشان می دهد. ضریب همبستگی (R²) بدست آمـده برای هرکدام از ولتاژهای اولیه و ثانویه، نشان دهنده ارتباطی نه چندان مناسب با عمق کربن زدایی می باشد.

D.irگلای گاز 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 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 (Δ)، از طریق رابطه۱ مقدار اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ (φ) ، با کمک نرم افزار، MATLAB تعیین گردید. (۱)

شکل ۵، این ارتباط را در فرکانس ۵۰ هرتز نشان می دهد. با توجه به ضریب همبستگی این ارتباط (R² = 0.84)، برای این خروجی می توان اطمینان قابل قبولی را در پیش بینی عمق کربنزدایی شده، در نظر گرفت. جهت یافتن ارتباطی بهتر، با استفاده از معادله ۱ و ۲ ، از ولتاژ(V) و جریان(I) کویل برای محاسبه امپدانس(Z) برای تمامی نمونهها استفاده شد.

 $Z = V/I \tag{7}$

با تقسیم امپدانس محاسبه شده برای هر نمونه بر امپدانس کویل خالی(20)، پارامتر جدیدی تحت عنوان امپدانس نرماله شده (2/Z) حاصل می شود [۲۰،۸و ۲۱]. 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 شده است. همان طور که مشاهده می شود، ضریب همبستگی کربنزدایی شده با استفاده از این خروجی می باشد. فرایند کربن زدایی در دماهای بالا (2۰۰۲–۸۰۰) یک فرایند کربن زدایی در دماهای بالا (2۰ 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 ۸/۰ درصد کربن را برابر ۵۶ و در فولادی با ۲۸/۰ کربن، با ۸/۰ درصد کربن را برابر ۵۶ و در فولادی با ۲۸/۰ کربن، 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 ۳۵۰ [۳۳] و برای فولادهای کربن زدایی شده که درصد کربن کمتر از برای فولادهای کربن زدایی شده که درصد کربن کمتر از است. (۳۲).

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

² Tanner

طبق روابط زیر با افزایش لم، مقدار مقاومت القایی (X_L) و امپدانس(Z) نیزافزایش مییابد.

$$X_{L} = 2\pi f L \tag{(1)}$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I \tag{(0)}$$

بنابراین افزایش در امپدانس دلیلی بر افزایش ولتاژ اولیه و ثانویه (V) و امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان گردابی در نمونههای با عمق کربن زدایی بیشتر میباشد 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) نرمالـه شده بر حسب مقاومت ظاهری(R) نرمالـه شـده) بـرای همـه نمونهها رسم شده است.

برای محاسبه X و R نرماله شده، ابتـدا مقاومـت و راکتـانس کویل (به ترتیب قسمتهای حقیقی و موهومی Z) بـرای هـر نمونه محاسبه شد.

$$Z = R + iX (R = ZCos(\Phi), X = ZSin(\Phi))$$
 (9)

در نهایت از معادلات ۷ و ۸ جهـت محاسـبه X و R نرمالـه شده، استفاده گردید. [۲۰،۸و۲۱].

Normalized
$$\mathbf{R} = (\mathbf{R} - \mathbf{R}_0) / \mathbf{X}_0$$
 (V)

Normalized
$$X = X/X_0$$
 (A)

نتایج محاسبات در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل اثر عمق کربنزدایی 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 نمونهها، مقدار Φ افزایش مییابد که دلیل آن افزایش نفوذپذیری مغناطیسی با افزایش عمق این لایه میباشد.

در انتها، بر روی پاسخ جریان گردابی (ولتاژ اولیه) و سیگنال بدست آمده از آن، آنالیز هارمونیک (اعمال تابع فوریه) در فرکانس ۵۰هرتز صورت گرفت و پس از محاسبه قسمت های موهومی و حقیقی هر هارمونیک و همچنین مقادیر مدول بدست آمده از آنها به طور جداگانه (جدول۴)، ارتباط بین آنها با عمق های مختلف کربنزدایی شده بررسی شد.

همان طور که در شکل۸ نشان داده شده است، ارتباط قابل قبول در هارمونیکهای ۳ و ۵ حاصل گشت که نشان دهنده افزایش مقدار مدول برای هارمونیکها با افزایش عمق کربن زدایی شده میباشد.



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

زمان آستنيته (ساعت)		•	١	٢	٣/٥	٤	٤/٥
عمق کربن زدایی شده (µm)		•	۲۰۰	٤٠٠	00+	٧	۱۰۰۰
	هارمونيک ۳	٤/٠٩	۲/۲٤	٦/٥٢	٣/٩٧	٤/٥٢	٤/٧٥
فسمت موهومي هارمونيك	هارمونیک ٥	۲/۲ (٧/٥١	۱۰/٦	Λ/Λ ٦	۱۱/۸	1/11
	هارمونيک ۳	٤٣/٨	٤٦٦	٤٨/٢	٥٠	01/0	०९/٦
فسمت حقيقي هارمونيت	هارمونیک ٥	٤٥/٦	٤٩/٣	٤٦/٧	٥١/٩	٥١/٩	٥٨
	هارمونيک ۳	٤٤	٤٦/٦	٤A/V	٥٠/٢	٥١/٨	wwwsMD.
معداد مدون	هارمونيک ٥	٤٧	٤٩/٨	٤٧/٩	٥٢/٦	٥٣/٣	09/1

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



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.
- C. Standaert, K. Eloot, 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.
- 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, *Characteriz* –

ation of ductile cast iron by eddy current method, NDT&E International, 38(2005)623-626.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

 ۱۸. میثم شیخ امیری و مهرداد کاشفی، کاربرد روش غیر مخرب جریان گردابی در تعیین میزان پرلیت فولاد، سومین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و انجمن علمی ریخته گران ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۸)۱۲۲–۱۲۲.

- 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.