

تعیین غیرمخرب میزان کاربید، سختی و عمق سخت شده در سطح قطعات

چدنی

سعید کهربائی

گروه مهندسی مواد، موسسه آموزش عالی سجاد

مهرداد کاشفی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

صادق مسلمی مهنی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله : ۹۱/۰۷/۱۱ - پذیرش مقاله : ۹۱/۱۱/۰۳)

چکیده

یکی از مشکلات متداول در ماشین کاری قطعات چدن خاکستری، ایجاد مناطق ناخواسته سخت کاربیدی در لایه نازکی از سطح قطعات می باشد. ایجاد این لایه سخت، عمر ابزار برشی را بشدت کاهش داده و هزینه تولید قطعات را بالا می برد. در نتیجه تشخیص وقوع این لایه و میزان سختی حاصله به منظور جداسازی، از فاکتورهای اساسی در کنترل کیفیت این قطعات چدنی می باشد. در پژوهش حاضر امکان تشخیص و تعیین غیر مخرب پارامترهای متالورژیکی در سطح (میزان کاربید سطحی، سختی در سطح و عمق سخت شده) با استفاده از روش جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده پتانسیل بالای این روش غیرمخرب در تعیین سریع و دقیق پارامترهای متالورژیکی مؤثر در ایجاد سختی در سطح و در نتیجه جداسازی قطعات نامطلوب می باشد.

واژه های کلیدی: چدن خاکستری، کاربید سطحی، سختی سطح، عمق سخت شده، آزمون جریان گردابی

Nondestructive assessment of carbide content, hardness and case depth at the surface of cast iron parts

M. Kashefi

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

S. Kahrobaee

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Sadjad institute of higher education
(Received 1 October 2012, accepted 22 January 2013)

S. Moslemi Mehni

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

Abstract

A common problem in surface machining of gray cast iron parts is due to formation of carbide at the surface, which results in decreasing cutting tool life and increasing production cost. Therefore, detection of hardened layer and its hardness are key factors in quality control and inspection processes. In the present paper, nondestructive evaluation of metallurgical parameters (surface carbide, surface hardness and hardened depth) has been investigated using eddy current technique. The results show the high potential of the proposed method as a fast and accurate nondestructive technique in determination of metallurgical parameters affecting hardness of the surface and consequently separation of undesirable parts.

Keywords: Gray cast iron, Surface carbide, surface hardness, Case depth, Eddy current testing.

E-mail of corresponding author: saeed_kahrobaee@yahoo.com, kahrobaee@sadjad.ac.ir

مقدمه

به طور معمول قطعات چدنی پس از تولید به روش ریخته‌گری نیاز به فرآیندهایی نظیر تمیزکاری سطحی، عملیات حرارتی و ماشینکاری دارند. نظر به اهمیت دقت ابعادی، قابلیت ماشینکاری چدن‌ها پارامتری بسیار مهمی می‌باشد که عمدتاً به وسیله عمر ابزار برش بیان می‌شود. عمر ابزار برش مدت زمانی است که در سرعت جابجایی ابزار و فشار ثابت، عمق مشخصی از ابزار در اثر سایش با سطح قطعه دچار تخریب شده [۱] و در نتیجه دقت ابعادی، کیفیت سطحی و سرعت فرآیند ماشینکاری کاهش یابد. در مورد چدن‌ها بررسی‌ها نشان داده‌اند که قابلیت ماشین کاری مستقیماً متأثر از ریزساختار فاز زمینه در اطراف گرافیت‌ها می‌باشد [۱]. هرچه ساختار زمینه از فریت به سمت پرلیت تغییر کند، عمر ابزار کاهش و از طرفی توان مصرفی برای ماشینکاری نیز افزایش می‌یابد. به نحوی که زمینه فریتی بالاترین و زمینه پرلیتی ظریف یا دارای کاربید آزاد کمترین قابلیت ماشینکاری را دارد.

یکی از مشکلات متداول در ماشین کاری قطعات چدن خاکستری، ایجاد لایه نازکی شامل کاربیدهای سخت بر روی سطح قطعات می‌باشد. این امر ناشی از انجماد سریع ناخواسته به دلیل عدم طراحی مناسب سیستم راهگامی و رعایت نکردن سرعت و دمای مناسب بارریزی به خصوص در قطعات چدنی شامل مقاطع نازک می‌باشد. ایجاد این لایه سخت، عمر ابزار برشی را کاهش داده و ماشین کاری قطعات را به شدت محدود می‌کند. در نتیجه تشخیص، جداسازی و حتی تعیین عمق این لایه از فاکتورهای کلیدی و اساسی در کنترل کیفیت و بازرسی قطعات چدنی می‌باشد.

روش‌های متعارف موجود در تشخیص این لایه کاربیدی که معمولاً بعد از کاهش عمر ابزار برش صورت می‌گیرد، آزمون‌های متالوگرافی و سختی‌سنجی می‌باشند که نه تنها مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی بوده، بلکه به عنوان روش‌هایی پیشگیرانه جهت کاهش عمر ابزار محسوب نمی‌شود. لذا در این زمینه کاربرد روش‌های غیرمخرب به عنوان روش‌هایی سریع، کم هزینه و به خصوص پیشگیرانه که امکان بازرسی

۱۰۰٪ قطعات را نیز فراهم می‌نماید، بیش از پیش اهمیت می‌یابد [۲]. از میان این روش‌های غیرمخرب می‌توان به آزمون جریان گردابی که در سال‌های اخیر، به منظور شناسایی تغییرات ریزساختاری در قطعات فولادی و چدنی شامل تعیین درصد فازها [۳-۵]، اندازه دانه [۶]، رسوب فازهای ثانویه [۷] و همچنین خواص مکانیکی [۸]، بسیار کارا بوده است، اشاره نمود.

علاوه بر بررسی‌های انجام شده در حجم ماده، تعیین عمق لایه کربن زدایی قطعات عملیات حرارتی شده [۹-۱۱]، عمق لایه سخت شده قطعات سخت کاری القائی شده [۱۲-۱۳] و درصد کربن سطح قطعات کربن‌دهی شده [۱۴] بیانگر پتانسیل بالای این روش در شناسایی تغییرات ریزساختاری و سختی در سطح قطعات فرومغناطیس می‌باشد.

در پژوهش حاضر، کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین درصد کاربید سطحی، میزان سختی در سطح و عمق سخت شده ناشی از حضور این کاربیدهای ناخواسته در سطح قطعات چدن خاکستری، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش آزمایش‌ها

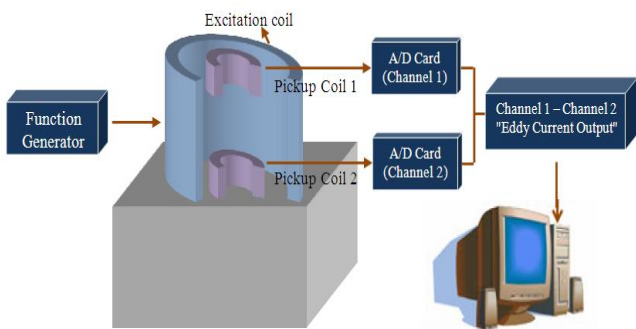
در این پژوهش از ۶ نمونه چدن خاکستری با ابعاد $4 \times 3 \times 4 \text{ cm}$ و ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول ۱، استفاده شده است. تمامی نمونه‌ها در یک مرحله ریخته‌گری شده و به منظور ایجاد لایه‌هایی با درصد‌های متفاوت کاربید سطحی، مبردهای چدنی با ضخامت‌های ۴ تا ۲۰ میلی‌متر هنگام مذاب ریزی بکار رفته است (مطابق شکل ۱). پس از این مرحله، مقطع طولی نمونه‌ها مورد بررسی‌های متالوگرافی و سختی‌سنجی قرار گرفت. درصد کاربید سطحی (با استفاده از مشاهدات میکروسکوپی و نرم افزار پردازش تصویر MIP^۱) و پروفیل سختی قطعات (با استفاده از دستگاه میکرو سختی‌سنجی) و همچنین سختی در سطح (بر اساس سختی‌سنجی تا عمق ۵۰۰ میکرومتر) اندازه‌گیری شد تا با مقادیر بدست آمده از آزمون جریان گردابی مقایسه گردد. در

^۱ Microstructure Image Processing

نتایج و بحث

بررسی های مخرب متالوگرافی و سختی سنجی

یکی از روش های شناسایی تغییرات ریزساختاری در سطح قطعات چدنی ناشی از تفاوت در سرعت انجماد، بررسی های متالوگرافی و مشاهدات میکروسکوپی می باشد. در شکل ۳، تصویر میکروسکوپی لایه سخت ایجاد شده در قطعات چدنی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در قسمت سطحی مرفولوژی گرافیت ها نسبت به قسمت های مرکزی قطعه (که به شکل گرافیت های نوع D هستند) تغییر یافته و به حالت توده ای تبدیل شده است. همچنین درصد کاربیدها در سطح قطعه نسبت به قسمت های مرکزی نمونه افزایش یافته است. در واقع وجود مبردها، سرعت سرد شدن و نحوه انجماد در سطح قطعه را به گونه ای تغییر داده است که قسمتی از کربن به صورت گرافیت رسوب یافته و بقیه در فاز سمیتیت حضور پیدا کرده است. در نتیجه ریزساختار میکروسکوپی سطح، حاوی نواحی سیاه رنگ گرافیت و سفید رنگ سمیتیت در زمینه ای پرلیتی خواهد بود که این ساختار بنام چدن خالدار^۴ شناخته می شود.

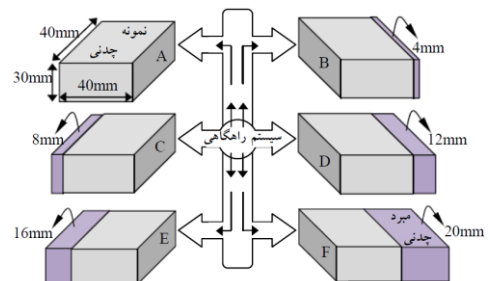


شکل ۲. شماتیک سیستم جریان گردابی طراحی شده

نهایت بر روی تمامی نمونه ها، آزمون جریان گردابی اعمال شد. شکل ۲ نمای شماتیک روش غیرمخرب جریان گردابی بکار رفته در این تحقیق را نشان می دهد. سیستم جریان گردابی طراحی شده در پژوهش حاضر، شامل مولد جریان سینوسی (با قابلیت تولید امواج در محدوده فرکانسی بین ۰/۵ هرتز تا ۵ مگا هرتز)، تقویت کننده امواج، سیم پیچ دیفرانسیلی^۱ که از یک سیم پیچ تحریک^۲ و دو سیم پیچ حس-گر^۳ تشکیل شده، اسیلوسکوپ و کامپیوتر جهت پردازش و تحلیل داده ها، می باشد. ولتاژ القاء شده در قطعات، از دو سیم پیچ حس گر توسط کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال به داده های قابل پردازش توسط کامپیوتر تبدیل می شود. سیم پیچ تحریک از تعداد ۲۰۰ دور سیم مسی که به دور یک هسته فریتی استوانه ای توخالی پیچیده شده، تشکیل شده است. قطر خارجی و داخلی این هسته فریتی به ترتیب ۲۵ و ۲۱ میلی متر می باشد. دو سیم پیچ حسگر (با تعداد ۱۵۰ دور سیم مسی به دور هسته فریتی استوانه ای با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۱۱ و ۵ میلی متر)، در راستای محور مرکزی سیم پیچ تحریک در قسمت بالا و پایین آن قرار داده شد (مطابق شکل ۲). به منظور تعیین فرکانس بهینه، این آزمون در محدوده فرکانس ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز، انجام شد.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی چدن مورد استفاده در پژوهش حاضر

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
۹۳/۷۰	۳/۴۷	۱/۹۶۶	۰/۴۵۴	۰/۰۲۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶



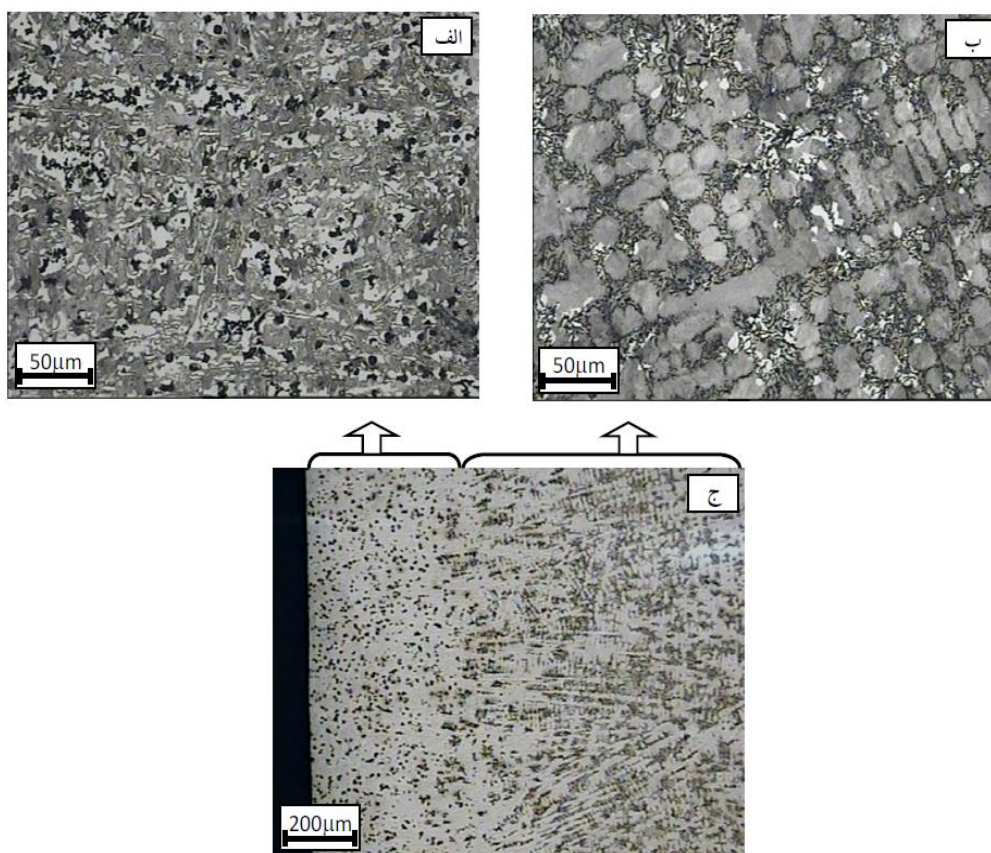
شکل ۱. نحوه ایجاد شرایط متفاوت سرمایش در سطح (بکارگیری مبردها با ضخامت های متفاوت).

^۱ Differential coil

^۲ Excitation coil

^۳ Pick up coil

^۴ Mottled iron

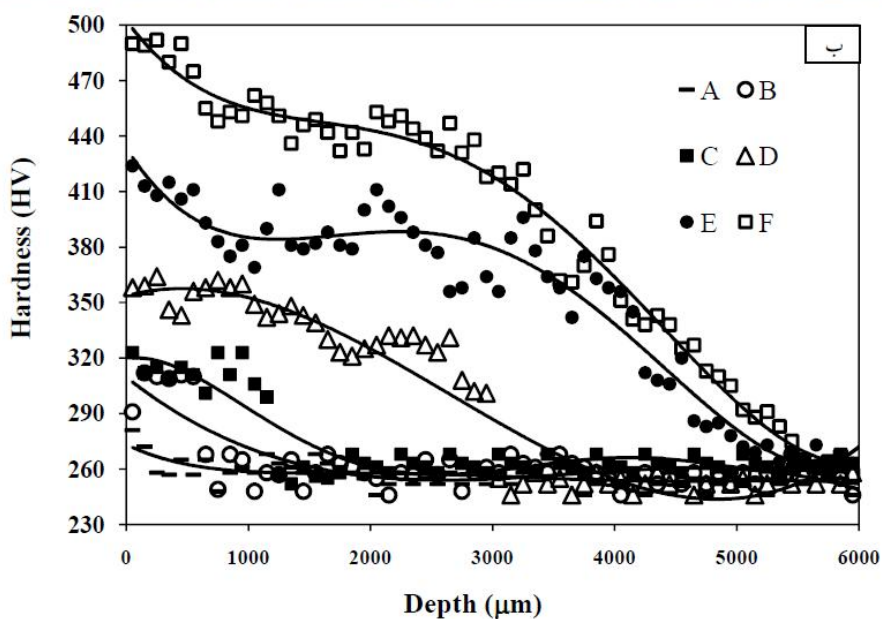
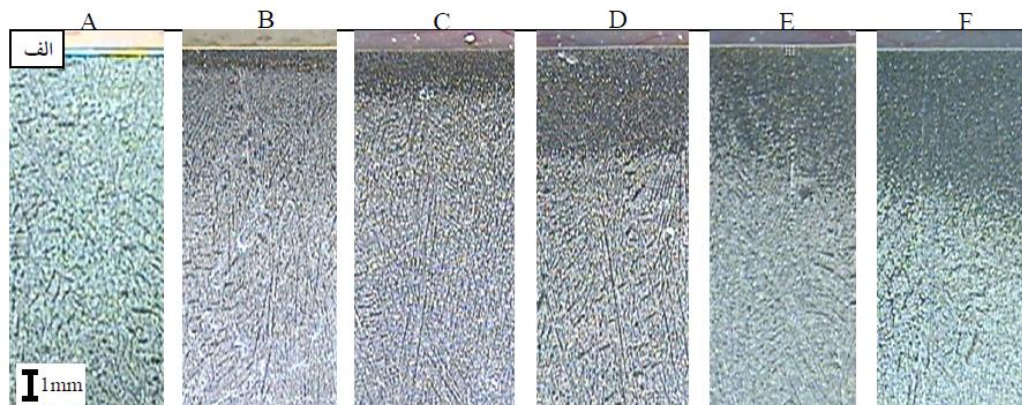


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار در سطح چدن خاکستری،

(الف) ریزساختار لایه سخت شده، (ب) ریزساختار قسمت مرکزی نمونه، (ج) مرز بین لایه سخت ایجاد شده و قسمت مرکزی.

این امر حاکی از افزایش درصد کاربید در سطح قطعات با افزایش سرعت انجماد (افزایش ضخامت مبرد) می باشد. به همین جهت درصد کاربید ایجاد شده در سطح قطعات با استفاده از مشاهدات میکروسکوپی و با کمک نرم افزار پردازش تصویر MIP، تعیین شد. چگونگی تعیین درصد فازها با استفاده از این نرم افزار، که بر اساس تفاوت رنگ فازهای کاربیدی، گرافیت ها و ساختار پرلیت می باشد، در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج بررسی های میکروسکوپی و سختی سنجی ها در سطح و عمق تمامی قطعات در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۴-الف، مقاطع طولی از نمونه ها بعد از پولیش کاری و اچ کردن با محلول نایتال ۲٪ نشان داده شده است. این تصاویر به خوبی محدوده ای از سطح را که دچار تغییرات ریزساختاری شده و سختی آن افزایش یافته را نمایان می سازد. علاوه بر مشاهدات میکروسکوپی، پروفیل سختی قطعات با استفاده از روش سختی سنجی برحسب ویکرز رسم شد (شکل ۴-ب). همان طور که مشاهده می شود، انطباق بسیار خوبی بین پروفیل های سختی با تصاویر ماکرواچ، حاصل شده است. بعلاوه بررسی پروفیل های سختی نشان می دهد که علاوه بر افزایش عمق لایه سخت شده در شرایط سرمایش شدیدتر، سختی در سطح قطعات نیز افزایش یافته است.



شکل ۴. الف) تصاویر ماکرو اچ، ب) تغییرات سختی بر حسب فاصله.

جدول ۲. مقادیر اندازه گیری شده درصد فازها، سختی در سطح و عمق سخت شده برای قطعات با استفاده از روش های متالوگرافی و میکروسختی سنجی

نمونه	A	B	C	D	E	F
ضخامت مبرد (mm)	۰	۴	۸	۱۲	۱۶	۲۰
درصد کاربید سطح	۵/۸۹	۷/۱۰	۱۸/۴۶	۲۴/۲۵	۲۸/۸۲	۳۱/۲۷
درصد گرافیت	۱۳/۳۹	۱۵/۹۱	۷/۰۸	۹/۳۴	۸/۷۸	۷/۱۰
درصد پرلیت	۸۰/۷۳	۷۶/۹۸	۷۴/۴۷	۶۶/۴۲	۶۲/۴	۶۱/۶۳
سختی در سطح (HV)	۲۶۶	۳۰۶	۳۱۴	۳۵۴	۴۱۳	۴۸۸
عمق سخت شده (μm)	۰	۶۷۰	۱۳۰۰	۳۲۰۰	۵۰۵۰	۵۳۰۰

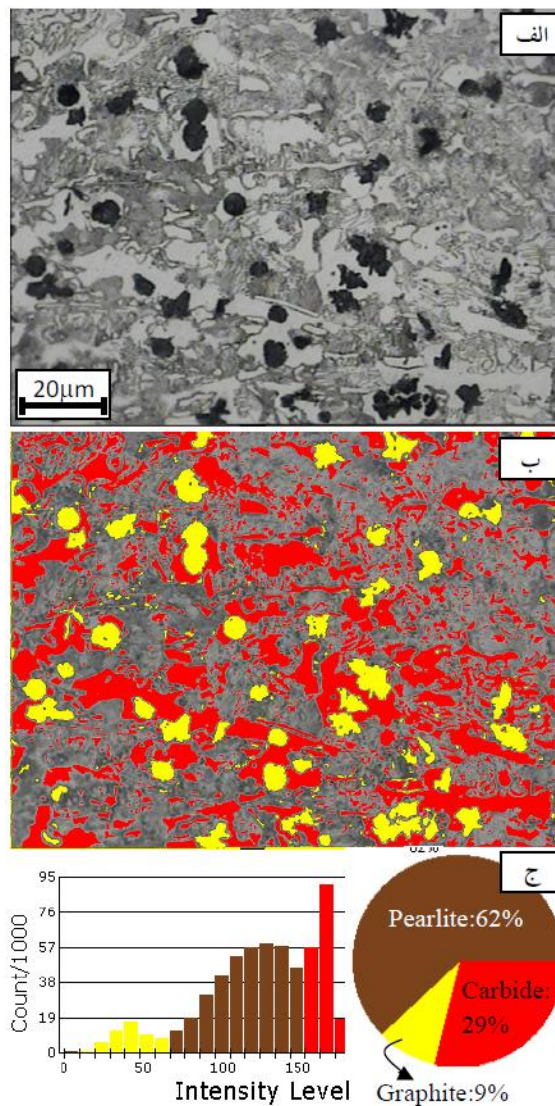
جریان گردابی در ماده. ۲- تراکم شارمغناطیسی یا به عبارتی تقویت میدان مغناطیسی اولیه ناشی از قرارگیری یک ماده فرو مغناطیس در نزدیکی سیم پیچ. از آنجا که نمونه‌های مورد آزمایش، فرومغناطیس بوده، لذا، عامل تقویت کنندگی میدان اولیه اثری غالب دارد. از طرفی سیم پیچ حس گر قرار گرفته در قسمت بالا، تنها میدان‌های مغناطیسی ناشی از سیم پیچ تحریک را حس خواهد کرد. لذا با کم نمودن ولتاژهای القائی سیم پیچ‌های حس گر زیرین و بالایی که آن را خروجی آزمون جریان گردابی می‌نامیم، می‌توان ادعا نمود که خروجی جریان گردابی، به طور خالص متأثر از خواص مغناطیسی قطعات می‌باشد و بدین ترتیب اثر میدان ناشی از سیم پیچ تحریک حذف شده است.

برقراری ارتباط بین پارامترهای متالورژیکی و خروجی-

های آزمون جریان گردابی

در گام اول، آنالیز رگرسیون جهت تعیین فرکانس بهینه کاری بکار گرفته شد. بدین ترتیب که در محدوده فرکانس ۱۰۰Hz تا ۱۰۰۰Hz مقدار ضریب همبستگی ناشی از ارتباط‌های بین خروجی آزمون جریان گردابی و درصد کاربید سطحی تعیین گردید. بیشترین مقدار این ضریب همبستگی در ۳۵۰ Hz حاصل شد. لذا این فرکانس به عنوان فرکانس بهینه در نظر گرفته و کلیه آزمون‌ها در این فرکانس انجام شد. در شکل ۶، ارتباط بین خروجی جریان گردابی و درصد کاربید سطحی در نمونه‌های چدنی نشان داده شده است.

ضریب رگرسیون نسبتاً بالای بدست آمده از این ارتباط ($R^2=0.86$) نشان دهنده قابلیت این روش غیرمخرب در تعیین درصد کاربید سطحی می‌باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش درصد کاربید سطحی باعث کاهش در خروجی آزمون جریان گردابی (ولتاژ القائی خالص) می‌شود. به طور کلی تفاوت در خروجی‌های آزمون جریان گردابی به دلیل تغییر در خواص الکترومغناطیسی مواد (ناشی از تغییرات ریزساختاری آنها) می‌باشد.



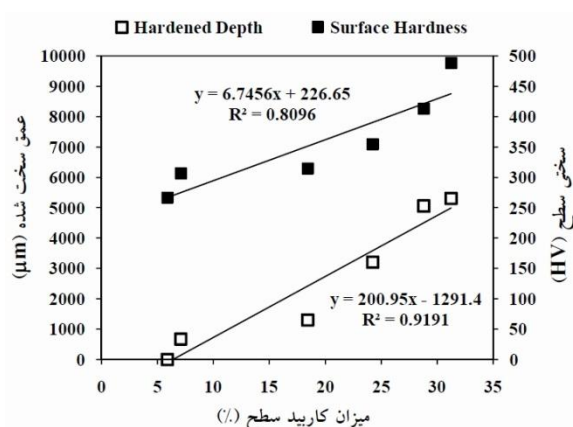
شکل ۵. تصویر میکروسکوپی از سطح نمونه E.

(الف) ریزساختار، (ب) پردازش اتوماتیک تصویر به کمک کامپیوتر، (ج) توزیع فراوانی درصد فازها.

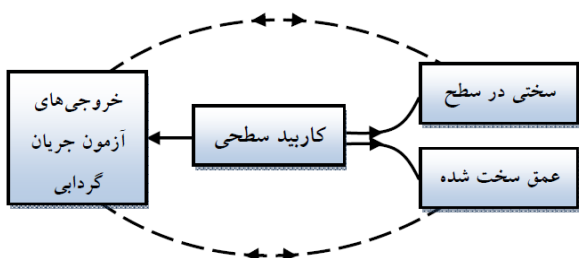
بررسی غیرمخرب با استفاده از روش جریان گردابی

در آزمون جریان گردابی، با استفاده از مولد جریان، جریان متناوب به دو سر سیم پیچ تحریک اعمال می‌شود. بدین ترتیب، میدان مغناطیسی متناوب اولیه جهت القاء جریان‌های گردابی در نمونه مورد آزمایش فراهم می‌شود که توسط سیم پیچ‌های حس گر قابل شناسایی است. علاوه بر شدت میدان مغناطیسی اولیه دو عامل مقابله کننده دیگر نیز بر روی سیم پیچ حس گر زیرین اثر گذار می‌باشند؛ ۱- ایجاد میدان مغناطیسی معکوس در خلاف جهت میدان اولیه ناشی از القاء

از آنجا که در مواد فرو مغناطیس تغییرات نفوذ پذیری، یا به عبارتی X_L ، بسیار بیشتر از تغییرات R می باشد [۱۴]، می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد کاربید سطحی در نمونه ها امپدانس کویل یا به عبارت بهتر ولتاژ القایی نیز کاهش خواهد یافت. این رفتار در شکل ۶ مشهود می باشد. تفاوت در درصد کاربید سطحی (یا میزان پرلیت زمینه) دلیل اصلی تفاوت در خروجی آزمون جریان گردابی می باشد. در نتیجه می توان یک ارتباط مستقیم بین این دو پارامتر ریزساختاری و الکترومغناطیسی برقرار نمود.

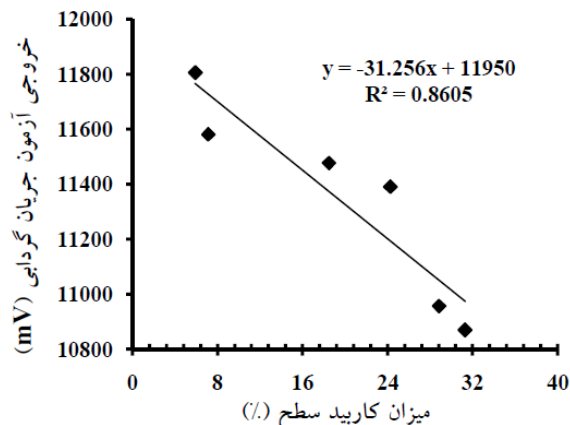


شکل ۷. ارتباط های خطی بین درصد کاربید سطح، سختی سطح و عمق سخت شده.



شکل ۸. ارتباط بین پارامترهای متالورژیکی و خروجی آزمون جریان گردابی. (خطوط پر، ارتباط های مستقیم و خط چین ها نشان دهنده ارتباط غیر مستقیم می باشد).

از طرفی همان طور که در جدول ۲ نشان داده شد، با افزایش درصد کاربید سطحی، سختی در سطح و همچنین عمق لایه سخت شده نیز افزایش می یابد. بنابراین به دلیل ارتباط های مستقیم بین درصد کاربید سطح، سختی در سطح و عمق سخت شده که در این پژوهش حاصل شده اند (شکل ۷)،



شکل ۶. ارتباط خروجی های آزمون جریان گردابی و درصد کاربید سطح.

با توجه به مندرجات جدول ۲، مشخص است که در نمونه های چدنی تهیه شده، با افزایش ضخامت مبرد یا به عبارتی شدت سرد شونندگی در سطح، درصد کاربیدها افزایش یافته و درصد ساختار زمینه (پرلیت)، کاهش می یابد. این در حالی است که تغییرات درصد گرافیت نسبت به دو فاز دیگر، چندان محسوس نمی باشد. بنابراین به طور کلی با افزایش ضخامت مبردها، بر درصد فاز کاربیدی افزوده و از ساختار پرلیت (که دارای فاز فریت با مغناطش بالا می باشد)، کاسته شده است. این امر سبب می شود تا در نمونه A، که بیشترین مقدار پرلیت را دارا می باشد، چگالی شار مغناطیسی بیشترین و در نتیجه راکتانس^۱ (X_L) کویل نیز بالاترین مقدار را دارا باشد. به همین ترتیب، با کاهش میزان پرلیت یا افزایش درصد کاربید، میزان تراکم شار مغناطیسی کاهش و در نتیجه راکتانس کویل نیز کاهش خواهد یافت. از طرفی وجود فاز بسیار سخت کاربید، حرکت الکترون ها را محدود کرده و در نتیجه مقاومت الکتریکی (R) را افزایش می دهد. تغییر در X_L و R سبب تغییر در امپدانس کویل (Z) و نتیجتاً ولتاژ القایی (V) در قطعه می شود. این ارتباط توسط رابطه ۱ نشان داده می شود.

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

¹ Reactance

برقراری ارتباط بین پارامترهای متالورژیکی (درصد کاربرد سطح، سختی در سطح و عمق سخت شده) و خروجی ناشی از القاء جریان‌های گردابی در قطعات، تغییرات ریزساختاری و سختی در سطح قطعات چدنی تعیین شد. نتایج نشان داده است که روش غیرمخرب پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مخرب متالوگرافی و سختی سنجی، روشی کارا، دقیق و سریع بوده که امکان بازرسی ۱۰۰٪ قطعات را در تولید انبوه صنعتی فراهم می‌آورد.

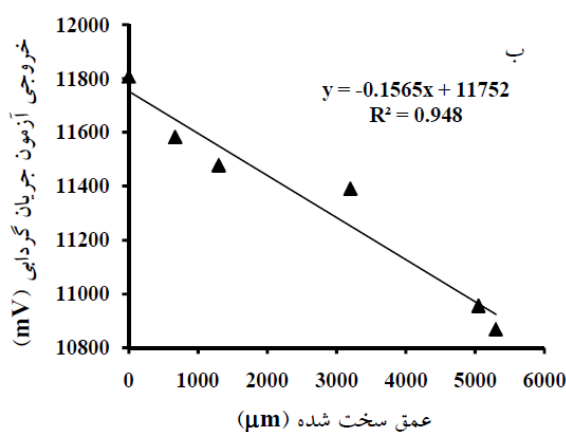
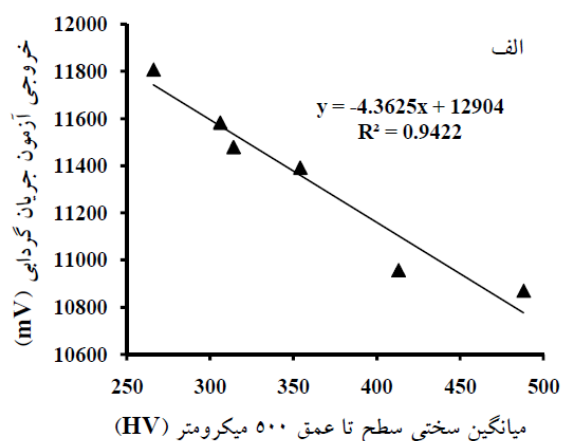
تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل پشتیبانی مالی از تحقیق حاضر طی قرارداد شماره ۱۶۲۷۶/۲ مورخ ۱۳۸۹/۱۰/۲۸ قدردانی می‌نمایند. همچنین از مدیریت محترم شرکت مجموعه سازی توس و شرکت فورج گستر سناباد به جهت همکاری در انجام ریختگری قطعات چدنی، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. M. Field and J. F. Kahles, Machining Characteristics of Gray Cast Irons, A.F.S Transactions, 1954.
2. D. C. Jiles, Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2), NDT International, 23(1990)83-92.
3. S. Konoplyuk, Estimation of pearlite fraction in ductile cast irons by eddy current method, NDT & E International, 43(2010)360-364.
4. M. Kashefi, S. Kahrobaee and M. H. Nateq, On the Relationship of Magnetic Response to microstructure in cast iron and steel parts, Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, article in press, DOI: 10.1007/s11665-011-0047-5.
5. 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.
6. J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese, and J. Capovilla-Sanchez, Magnetic barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: Influence of applied stress and grain size,

می‌توان ارتباطی غیرمستقیم بین سختی در سطح و عمق سخت شده با خروجی جریان گردابی برقرار نمود. چگونگی ارتباط بین پارامترهای متالورژیکی و خروجی‌های جریان گردابی در شکل ۸ نمایش داده شده است. ارتباط بین سختی در سطح و عمق سخت شده برای نمونه‌های مختلف با خروجی جریان گردابی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضرایب رگرسیون ۰/۹۴، نشان دهنده دقت قابل قبول روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین این دو پارامتر متالورژیکی می‌باشد.



شکل ۹. ارتباط خروجی جریان گردابی و الف) سختی در سطح و ب) عمق سخت شده.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش غیرمخرب جریان گردابی در شناسایی تغییرات ریزساختاری و میزان سختی در سطح قطعات چدن خاکستری، بهره گرفته شد. به این منظور با

- Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 231(2001)299-306.
7. S. H. Khan, A. Nusair Khan, F. Ali, M. A. Iqbal and H. K. Shukaib, Study of precipitation behavior at moderate temperatures in 350 maraging steel by eddy current method, Journal of Alloys and Compounds, 474(2009)254-256.
 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.
۹. مهرداد کاشفی، سعید کهربائی و علیرضا صاحب علم، کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی در فولادهای، علوم و مهندسی سطح، ۱۰ (۱۳۸۹) ۴۱-۴۹.
10. S. Kahrobaee, M. Kashefi and A. Saheb Alam, Magnetic NDT Technology for characterization of decarburizing depth, Surface & Coatings Technology, 205(2011)4083-4088.
 11. X. J. Hao, W. Yin, M. Strangwood, A. J. Peyton, P. F. Morris and C. L. Davis, Off-line measurement of decarburization of steels using a multifrequency electromagnetic sensor, Scripta Materialia, 58(2008)1033-1036.
۱۲. سعید کهربائی و مهرداد کاشفی، تعیین غیرمخرب عمق لایه سخت شده و پروفیل سختی با استفاده تحلیل پاسخ قطعات به القاء جریان، علوم و مهندسی سطح، ۱۲ (۱۳۹۰) ۳۷-۴۷.
13. S. Kahrobaee and M. Kashefi, Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor, NDT&E International 44 (2011) 335-338.
 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.