



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

مقاله کامل شفاهی

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفندماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

بررسی کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در جداسازی صد در صد قطعات با ساختار میکروسکوپی نامناسب در عملیات حرارتی قطعات خودرو

سعید کهربائی^{۱*}، مهرداد کاشفی^۲، علیرضا صاحب علم^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد،
saeed_kahrobaee@yahoo.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

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

چکیده

در تولیدات انبوه صنعتی همواره این احتمال وجود دارد که برخی قطعات مراحل تولید مانند سیکل-های عملیات حرارتی را به درستی طی نکنند. جداسازی این قطعات معیوب، علاوه بر اینکه مستلزم آزمون‌های مخرب است، بسیار وقت‌گیر بوده و هزینه‌ی زیادی را در بردارد. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیرمخرب است که به سرعت اجرا شده و از آنجا که پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده‌ی مورد نظر حساس است، می‌توان از آن در تشخیص ریزساختارهای مختلف از یک ترکیب شیمیایی یکسان بهره گرفت. در این مقاله این روش تفکیک برای پنج ساختار حاصل از عملیات آنیل، نرماله، کوئینچ و کوئینچ و تمپر در دماهای 650°C و 400°C از فولاد CK45 انجام شده است. پس از تعیین فرکانس بهینه و بررسی پاسخ‌ها به القاء جریان مشخص شد که ولتاژهای اولیه و ثانویه و همچنین امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان می‌تواند جهت جداسازی ریزساختارها بکار رود.

واژه‌های کلیدی: جداسازی ریزساختارها - آزمون غیرمخرب - آزمون جریان گردابی - عملیات حرارتی



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

۱- مقدمه

در صنعت بر روی اغلب قطعات تولیدی، سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی انجام می‌شود تا خواص مکانیکی موردنظر حاصل شود. از آنجا که در بسیاری از موارد ریزساختار حاصل از یکی از فرآیندهای عملیات حرارتی به عنوان ریزساختار اولیه فرایند دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، همواره احتمال اختلاط ناخواسته‌ی قطعات وجود داشته و بنابراین جداسازی آنها براساس نوع عملیات حرارتی اعمال شده از اهمیت خاصی برخوردار است.

مشاهدات میکروسکوپی و سختی‌سنجی روش‌هایی هستند که به طور سنتی بدین منظور، به کار می‌روند. این روش‌ها همگی بسیار وقت‌گیر بوده، هزینه‌ی زیادی را در برداشته و از سوی دیگر روشی مخرب به شمار می‌روند.

امروزه کاربرد روش‌های غیرمخرب تنها به بازرسی عیوب و ترک‌یابی محدود نمی‌شوند. با توجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب در فرایند کنترل تولیدات صنعتی، در سال‌های اخیر به تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد و بدست آوردن نتایج آزمون‌های مخرب با روش‌های غیرمخرب توجه بسیاری شده است که این امر می‌تواند باعث صرفه‌جویی در 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 از جمله سختی را می‌توان جزء مهمترین عواملی دانست که باعث توجه به این روش شده است [۲۰].

کاناپلایک^۱ ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده [۳] و یوچی موتوچوک^۲ در پژوهش‌هایی جداگانه همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان داده‌اند [۴ و ۵]. تعیین عمق دکربوره شده با آنالیز هارمونیک [۶] و همچنین براساس تفاوت خواص مغناطیسی در دو فاز فریت و پرلیت [۷] گزارش شده است. خان^۳ توانسته است با استفاده از پاسخ جریان گردابی درصد پرلیت فولاد را تعیین کند [۸]. رومیچه^۴ و همکارانش اثر ریزساختار را بر روی رفتار مغناطیسی فولادهای کربنی به وسیله‌ی سنسورهای الکترومغناطیسی بررسی کرده [۹] و این تأثیر اندازه دانه بر این خواص مغناطیسی توسط محققین بررسی و تأیید شده است [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. جداسازی ریزساختارهای حاصل از عملیات حرارتی هدف پژوهش حاضر می‌باشد. در این پژوهش با بررسی و تحلیل خروجی‌های ناشی از پاسخ مواد به القاء جریان گردابی و ارتباط آنها با فرکانس در نمونه‌های با ریزساختارهای متفاوت، ریزساختارهای متفاوت از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد CK45 که از پرکاربردترین فولادها در صنعت می‌باشد، استفاده شد. پنج نمونه استوانه‌ای به قطر ۳۰/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر تهیه شد و سیکل‌های عملیات حرارتی گوناگون برای ایجاد ساختارهای موردنظر مطابق با جدول شماره ۱ روی نمونه‌ها انجام شد. از تمامی نمونه‌ها قرصی به ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر جدا گردید و پس از مانیت‌گیری، متالوگرافی شده و ریزساختارهای حاصله با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شد.

^۱ Konoplyuk

^۲ Uchimoto, Check

^۳ Khan

^۴ Rumiche



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

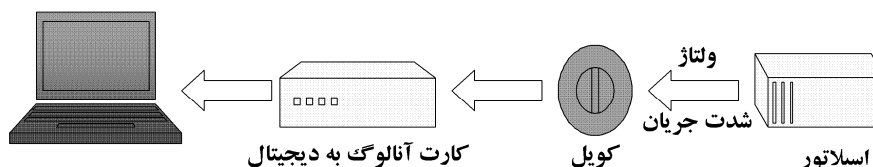


دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

جدول ۱- سیکل های عملیات حرارتی

شماره نمونه	نوع عملیات حرارتی	دما و زمان آستنیته	نحوه سرد کردن	عملیات ثانویه
۱	آنیل کامل	۹۰۰ °C و ۶۰ دقیقه	کوره خاموش	-
۲	نرماله	۹۰۰ °C و ۶۰ دقیقه	هوای راکد	-
۳	کوئینچ	۹۰۰ °C و ۶۰ دقیقه	آب نمک ۱۰٪ غلظت	-
۴	کوئینچ و تمپر در ۶۵۰ °C	۹۰۰ °C و ۶۰ دقیقه	آب نمک ۱۰٪ غلظت	تمپر در ۶۵۰ °C و در ۷۵ دقیقه
۵	کوئینچ و تمپر در ۴۰۰ °C	۹۰۰ °C و ۶۰ دقیقه	آب نمک ۱۰٪ غلظت	تمپر در ۴۰۰ °C و در ۷۵ دقیقه

تمامی آزمون های غیرمخرب با دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی که محدوده ی فرکانس از ۱ هرتز تا ۲ مگا هرتز را دارا است، انجام شد. طرح شماتیک دستگاه به کار رفته در شکل ۱ نشان داده شده است. تمامی نمونه ها در کویل با ضریب پرشوندگی ۰/۹۸ قرار داده شدند و دمای کویل در طول آزمایش ثابت نگه داشته شد (۲۷ °C).



شکل ۱- تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی [۲]

آزمون جریان گردابی در ۱۲ فرکانس انجام گردید و ولتاژ اولیه و ثانویه و امپدانس کویل در هر فرکانس برای هر نمونه توسط کارت اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت شد. پس از بررسی های مربوط به میزان تفاوت پاسخ های ناشی از القای جریان گردابی به ریزساختارها، محدوده ای از فرکانس که در آن بیشترین تفاوت بین خروجی ها حاصل شده بود، به عنوان محدوده فرکانس بهینه جهت تفکیک ساختارها تعیین شد.

سپس برای ساختارهای مذکور، توسط دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی، در فرکانس ۵۰ هرتز، منحنی های تلفات مغناطیسی (منحنی B-H) رسم گردید و مشخصه های چگالی شار مغناطیسی اشباع شده (B_{max})، می دان پسماند (H_c) و پسماند مغناطیسی (B_r) برای ساختارهای مذکور اندازه گیری شد. برای رسم منحنی ها به روش زیر عمل شد.

جریان اعمالی به سیم پیچ اولیه ثبت شد، از سیم پیچ ثانویه نیز ولتاژ القا شده در سیم پیچ ثبت شد. آنگاه با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ منحنی B-H رسم گردید.

$$X_L = 2\pi fL \quad (1)$$

$$V = -N(d\Phi/dt) \quad (2)$$

$$B = \Phi/A \quad (3)$$

که N تعداد دور سیم پیچ، L طول سیم لوله، V ولتاژ، Φ شار مغناطیسی، t زمان و A سطح مقطع نمونه می باشد.

۳- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ نوری از چهار ریزساختار مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. منحنی های تغییرات خروجی های جریان گردابی بر حسب فرکانس برای چهار ریزساختار در شکل ۳ نشان داده شده است.



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

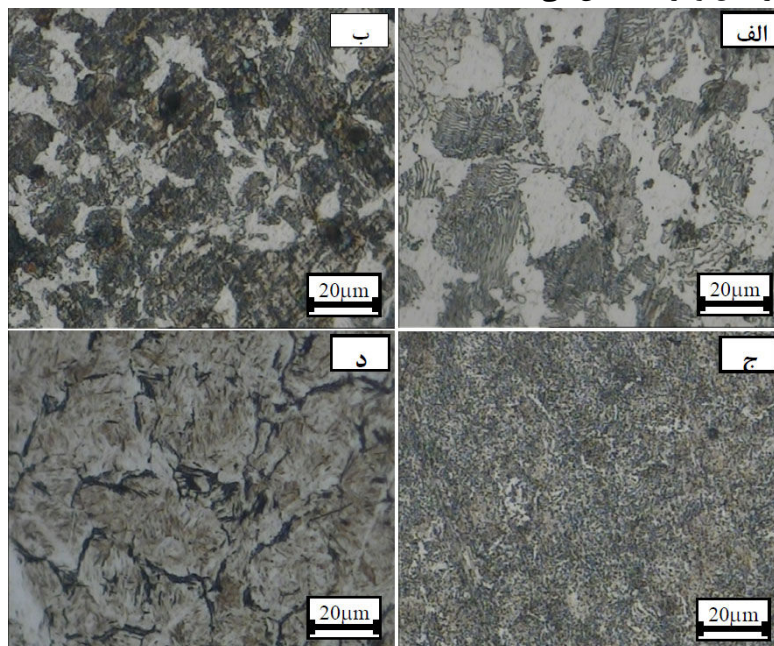
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



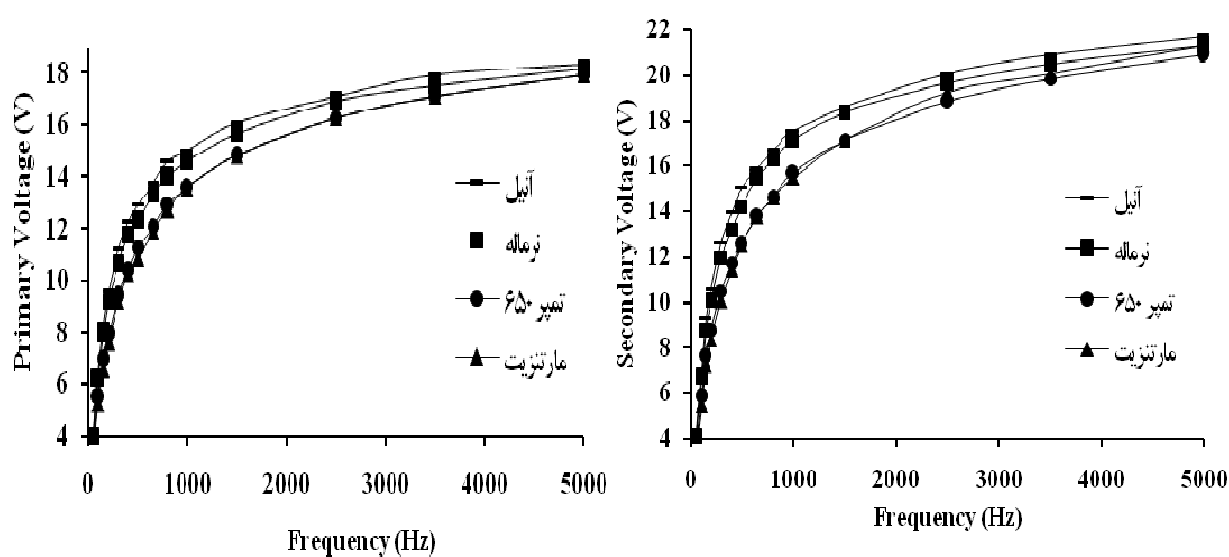
دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

۳-۱- تعیین فرکانس بهینه

برای انجام آزمون جریان گردابی، فرکانس دستگاه از ۵۰ تا ۵۰۰۰ هرتز تغییر داده شد. مشاهده شد که بیشترین اختلاف بین خروجی ها در محدوده فرکانس بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز برای ولتاژ اولیه و ۳۰۰ تا ۸۰۰ هرتز برای ولتاژ ثانویه می باشد. این محدوده فرکانس به عنوان محدوده فرکانس بهینه شناخته می شود. جدول ۲ نمونه ای از این اختلاف در خروجی های القاء جریان را برای دو ساختار آنیل و نرماله نشان می دهد.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختارهای حاصل از عملیات (الف) آنیل (فریت-پرلیتی)، (ب) نرماله (فریت-پرلیتی)، (ج) کوئینچ کاملاً تمپرسده (مارتنزیت تمپرسده در ۶۵۰°C)، (د) کوئینچ (مارتنزیت)، در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر



شکل ۳- منحنی تغییرات ولتاژ اولیه و ثانویه بر حسب فرکانس



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

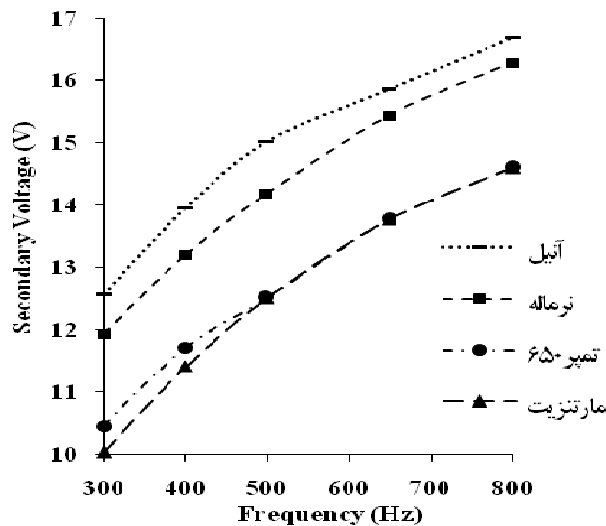
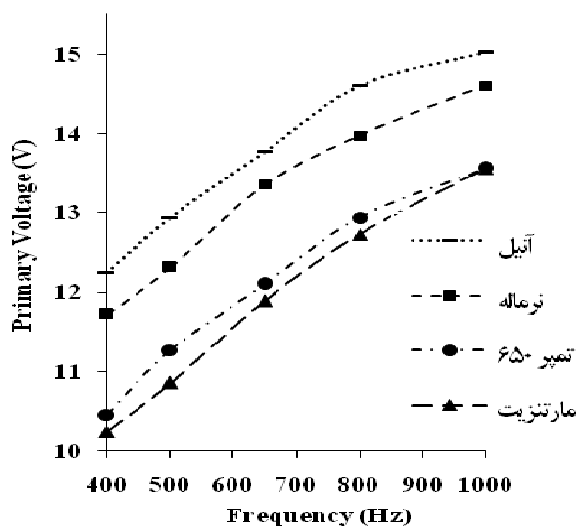


دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

در شکل ۴، نمودارهای موجود در شکل ۳ در محدوده فرکانس های بهینه آورده شده اند. که نشان دهنده ی بیشترین میزان اختلاف در خروجی های جریان گردابی می باشند. همان طور که مشاهده می شود، ریزساختارهای حاصل از عملیات آنیل، نرماله و کوئینچ ولتاژهای اولیه و ثانویه کاملا متفاوتی را نشان می دهند و از یکدیگر قابل تفکیک می باشند. در حالی که تفکیک دو ریزساختار مارتنزیت و مارتنزیت کاملا تمپر شده از یکدیگر توسط ولتاژ اولیه و ثانویه کویل عملا ممکن نیست.

جدول ۲- تعیین محدوده فرکانس بهینه

فرکانس (Hz)	اختلاف ولتاژ اولیه دوساختار (mV)	اختلاف ولتاژ ثانویه دوساختار (mV)
۵۰	۱۲۶	۱۶۸
۱۰۰	۲۵۴	۳۸۰
۲۰۰	۴۲۲	۴۲۶
۳۰۰	۴۲۹	۶۳۴
۴۰۰	۵۲۸	۷۴۰
۵۰۰	۶۲۶	۸۳۶
۸۰۰	۶۲۷	۵۱۶
۱۰۰۰	۵۱۸	۴۱۸
۱۵۰۰	۳۹۸	۲۰۹
۲۵۰۰	۲۰۹	۴۱۸
۳۵۰۰	۲۱۶	۴۱۶
۵۰۰۰	۲۰۹	۴۱۸



شکل ۴- منحنی تغییرات ولتاژ اولیه و ثانویه بر حسب فرکانس در محدوده فرکانس بهینه

برای تفکیک ریزساختارهای مارتنزیت و مارتنزیت تمپر شده در دماهای 400°C و 650°C از خروجی دیگری از جریان گردابی تحت عنوان امپدانس نرماله (Z/Z_0) که با تقسیم امپدانس کویل مربوط به هر نمونه (Z) به امپدانس کویل خالی (Z_0)، بدست می آید، استفاده شد که همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در فرکانس ۳۰۰ هرتز می توان این ریزساختارها را



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

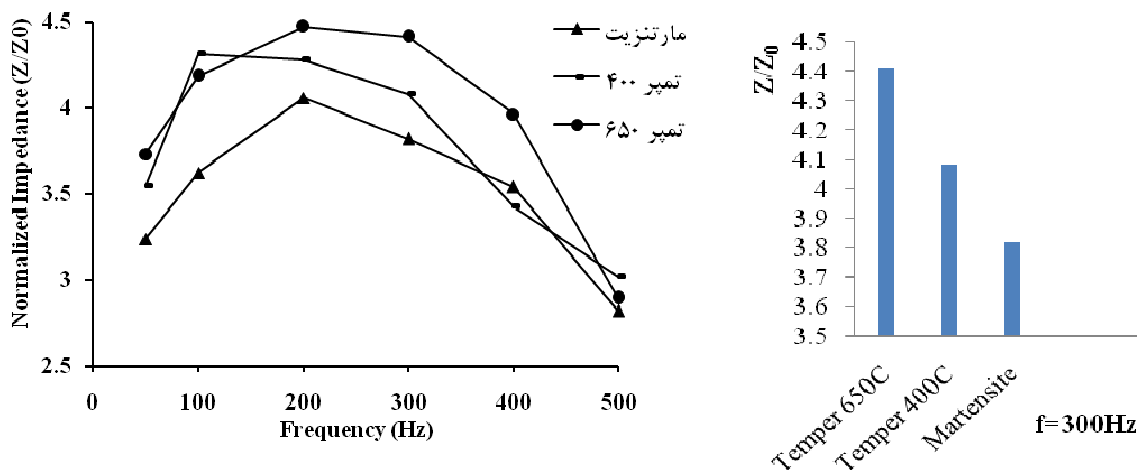
۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

تا حد خوبی از یکدیگر تفکیک نمود. تفکیک ریزساختارها بر اساس تفاوت در خواص مغناطیسی ریزساختارهای مورد نظر و در نتیجه تفاوت در پاسخ آنها به القاء جریان می باشد.



شکل ۵- جداسازی ریزساختارهای مارتنزیت، مارتنزیت تمپر شده در 650°C و مارتنزیت تمپر شده در 400°C در محدوده از فرکانس و در فرکانس بهینه 300Hz

۳-۲- بررسی خواص مغناطیسی ریزساختارهای مارتنزیتی و فریت-پرلیتی

می دانیم که با افزایش شدت میدان مغناطیسی (H)، شار مغناطیسی (B) عبوری از ماده افزایش می یابد. این وابستگی با رابطه $B=\mu H$ نشان داده می شود که شکل منحنی هیستریزیس را تشکیل می دهد. μ یا نفوذپذیری مغناطیسی، شیب قسمت خطی منحنی است. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، سختی ساختار بر مقدار تلفات مغناطیسی تأثیر گذار بوده و با توجه به سختی بالای بدست آمده برای ساختار مارتنزیتی (۵۸ راکول C)، بیانگر این می باشد که مقدار تلفات مغناطیسی ساختار مارتنزیت نسبت به ساختارهای فریت-پرلیتی بیشتر می باشد.

به منظور بررسی خواص مغناطیسی ساختارهای متفاوت، چگالی شار مغناطیسی اشباع شده (B_{max}) ، میدان پسماند مغناطیسی (H_c) و پسماند مغناطیسی (Br) برای ریزساختارهای مذکور اندازه گیری شد که جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار B_{max} و Br برای ساختار مارتنزیت از ساختارهای فریت-پرلیتی آنیل و نرماله کمتر و همچنین مقدار H_c برای ساختار مارتنزیت از ساختارهای فریت-پرلیتی آنیل و نرماله بیشتر می باشد و این مطلب مؤید آن است که تلفات مغناطیسی برای ساختار مارتنزیتی بیشتر می باشد. بنابر این نفوذپذیری مغناطیسی نیز کمتر خواهد بود. با توجه به رابطه ۴ می توان گفت با کاهش 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 می باشد. در نتیجه طبق روابط زیر با کاهش μ ، مقدار مقاومت القایی (X_L) و امپدانس (Z) نیز کاهش می یابد.

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

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I$$

۱-Saturated magnetic flux density

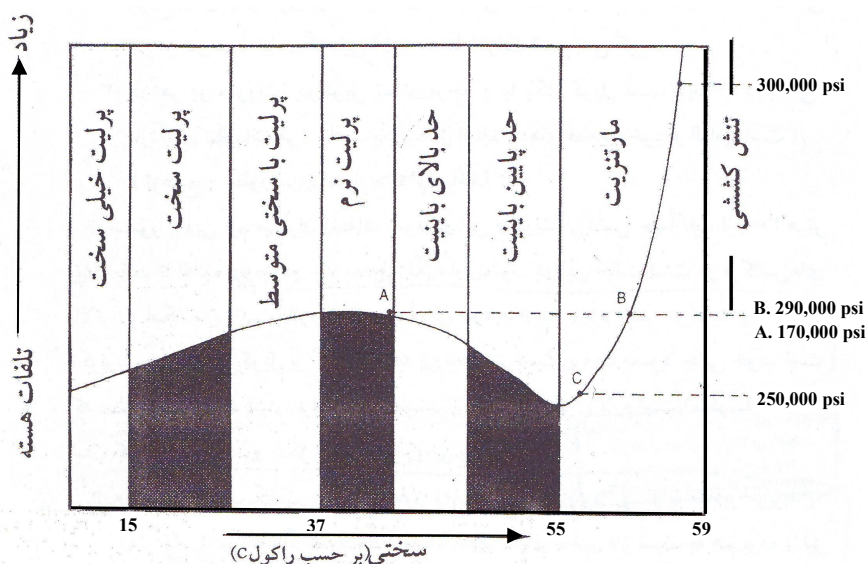
۲-Coercivity

۳-Retentivity



(۶)

کاهش در امیدانس با توجه به رابطه ۶ دلیلی بر کمتر بودن ولتاژ خروجی جریان گردابی در نمونه مارتنزیتی نسبت به نمونه های فریت-پرلیتی در شکل های ۳ و ۴ است.



شکل ۶- اثر سختی بر تلفات مغناطیسی [۲]

جدول ۳- مشخصه های منحنی تلفات مغناطیسی

Br(Tesla)	Hc(A/m)	Bmax(Tesla)	ریز ساختار
۰/۰۰۵۵	۶۳۳	۰/۰۰۵۷	فریت-پرلیتی (آنیل کامل)
۰/۰۰۵۳	۶۳۳	۰/۰۰۵۵	فریت-پرلیتی (نرماله)
۰/۰۰۴۹	۶۴۳	۰/۰۰۵۲	مارتنزیت کاملا تمپرشده
۰/۰۰۴۱	۶۹۹	۰/۰۰۴۷	مارتنزیت (کوئینچ)

همچنین نزدیک بودن مشخصه های B_{max} ، Br و Hc برای دو ریزساختار مارتنزیت و مارتنزیت کاملا تمپرشده، عدم امکان تفکیک این دو ریزساختار را با استفاده از ولتاژ اولیه و ثانویه تأیید می کند.

۳-۳- بررسی خواص مغناطیسی ریزساختارهای آنیل و نرماله

همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در دو ساختار آنیل و نرماله، اندازه دانه نمونه آنیل شده بزرگتر از اندازه دانه نمونه نرماله شده می باشد. بنابراین عاملی که باعث تفاوت در پاسخ القای جریان گردابی به این دو ریزساختار می شود، اثر اندازه دانه و چگالی مرزدانه ها بر خواص مغناطیسی آنها می باشد.

ریورا و همکارانش تأثیر اندازه دانه بر روی منحنی هیستریزیس (منحنی B-H) را مشاهده کرده و مشخص کردند که اشباع مغناطیسی (B_{max}) با افزایش اندازه دانه کاهش می یابد [۱۱]. اندازه گیری های B_{max} برای دو ریز ساختار حاصل از آنیل و نرماله، این مطلب را تأیید می کند. به طور کلی مرزدانه با دو مکانیسم متفاوت بر روی حرکت دامنه میدان (Domain walls) اثر می گذارد: الف) اثر خارجی که مربوط به جدایش و رسوبات و حضور آخال ها و ... در مرزدانه ها می باشد ب) اثر داخلی که



انجمن مهندسی
ساخت و تولید ایران

دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران

ICME 2010

۱۰-۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

به انرژی مغناطیسی دائمی (Magnetostatic)، ناشی از تغییرات جهت گیری در دو دانه مجاور مرتبط می باشد [۱۰]. خواص مغناطیسی تحت تاثیر مرزدانه ها بوده، زیرا میدان بسته ای در مرزدانه ها به وجود آمده که با حرکت دامنه میدان (Domain walls) در هنگام مغناطیسی شدن مخالفت می کند [۹] و علت تغییرات پاسخ های جریان القایی با تغییرات اندازه دانه، به میزان مرزدانه ها در مسیر عبور میدان مغناطیسی مرتبط می شود. بنابراین مخالفت مرزدانه ها در برابر عبور میدان، سبب کاهش ولتاژ بدست آمده از ورودی و خروجی کوئل می شود که در شکل های ۳ و ۴ چنین اختلاف ولتاژی در دو ساختار آنیل و نرماله مشاهده می گردد.

۵- نتیجه گیری

- ۱- آزمون جریان گردابی می تواند جهت جداسازی صد درصد ری زساختارهای متفاوت در قطعات با ترکیب شیمیایی یکسان بکار رود.
- ۲- روش آزمون غیرمخرب جریان گردابی با توجه به تفاوت در خواص مغناطیسی ری زساختارها، قادر به تفکیک ری زساختارهای حاصل از عملیات آنیل، نرماله و کوئینچ براساس ولتاژ اولیه و ثانویه کوئل می باشد.
- ۳- سه ری زساختار مارتنزیت، مارتنزیت تمپر شده در 650°C و مارتنزیت تمپر شده در 400°C را می توان با استفاده از خروجی امپدانس نرماله (Z/Z_0) تا حد خوبی تفکیک نمود.

مراجع

- 1- Don E. Bray, Roderic K. Stanly, "Nondestructive Evaluation", CRC, 1997
- 2- Donald J. Hagemair, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, 1990, "ترجمه شرکت تست "تولید آلیاژ"
- 3- Konoplyuk S, Abe T, Uchimoto T, Takagi T, Kurosawa M. Characterization of ductile cast iron by eddy current method. NDT&E International 2005;38: 623-6. T.
- 4- Uchimoto T, Takagi T, Konoplyuk S, Abe T, Huang H, Kurosawa M. Eddy current evaluation of cast irons for material characterization. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2003;258-259:493-6.
- 5- C'ech J. Measuring the mechanical properties of cast iron by NDT methods. NDT International 1990; 23(2):93-102.
- 6- Mercier D, Lesage J, Decoopman X, Chicot D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. NDT&E International 2006; 39:652-60.
- 7- X.J. Hao et al., "Off-line measurement of decarburization of steels using a multifrequency electromagnetic sensor", Scripta Materialia, 2008, 58 (2008) 1033-1036
- 8- S.H. Khan et al., "Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method", Journal of Materials Processing Technology, 2007
- 9- F. Rumic, 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
- 10- J. Degauque, B. Astie, J.L. Porteseil, and R. Vergne, "Influence of the Grain Size on the Magnetic and Magnetomechanical Properties of High-Purity Iron", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 26, 1982, 261-263
- 11- J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, and J. Capó-Sánchez, "Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis Loop in Commercial Carbon Steel: Influence of Applied Stress and Grain Size", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 231, 2001, 299-306
- 12- B. K. Tanner, J. A. Szpunar, S. N. M. Willcock, L. L. Morgan, P. A. Mundell., "Magnetic and Metallurgical Properties of High-Tensile Steels", Journal of Materials Science, 1988, JMMM 123 (1993) 283.