تشخیص قطعات معیوب از لحاظ خواص مکانیکی باکمک تعیین اندازه دانه قطعات فولادی با استفاده از روش غیرمخرب جریان‌های گردابی

محمودرضا قندهاری فردوسی[1]، مهراد کاشفی[2]، سعید کهربائی[3]

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

r_m_ghandehari@yahoo.com

چکیده

اندازه‌دانه از مهمترین پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی قطعات فولادی می‌باشد. یکی از راه‌های جداسازی قطعات معیوب و نامطلوب از لحاظ خواص مکانیکی مانند استحکام و چقرمگی بررسی اندازه دانه می باشد. روش‌های سنتی جهت تعیین اندازه‌دانه، شامل روش‌های مخرب متالوگرافی بوده که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیرمخرب است که به سرعت اجرا شده و از آنجا که پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده‌ی موردنظر حساس است، می‌توان از آن در تعیین اندازه دانه در قطعات با ترکیب شیمیایی یکسان بهره گرفت. همچنین امکان انجام ازمون غیر مخرب فوق بر روی تمامی قطعات وجود دارد. در تحقیق حاضر، روش غیر مخرب جریان های گردابی جهت تعیین اندازه دانه بر روی فولاد CK20 بکار رفته است. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول (R=0.97) خروجی های القا جریان مخصوصا امپدانس نرماله شده در مقایسه با روش متالوگرافی است.

واژه‌های کلیدی: جداسازی قطعات معیوب، تعیین اندازه دانه، آزمون غیرمخرب، آزمون جریان گردابی.

۱- دانشجوی کارشناسی ، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

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

تشخیص قطعات معیوب از لحاظ خواص مکانیکی باکمک تعیین اندازه دانه قطعات فولادی با استفاده از روش غیرمخرب جریان‌های گردابی

محمودرضا قندهاری فردوسی[۱]، مهراد کاشفی[۲]، سعید کهربائی[۳]

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

Corresponding Author E-mail: (R_m_ghandehari@yahoo.com)

چکیده

اندازه‌دانه از مهمترین پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی قطعات فولادی می‌باشد. بنابراین یکی از راه‌های جداسازی قطعات معیوب و نامطلوب از لحاظ خواص مکانیکی مانند استحکام و چقرمگی، می‌تواند بررسی اندازه دانه باشد. روش‌های سنتی جهت تعیین اندازه‌دانه، شامل روش‌های مخرب متالوگرافی می‌باشد که وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیرمخرب است که به سرعت اجرا شده و از آنجا که پاسخ آن به ترکیب شیمیایی و ریزساختار ماده‌ی موردنظر حساس است، می‌توان از آن در تعیین اندازه دانه از یک ترکیب شیمیایی یکسان با دقت قابل قبولی بهره گرفت. در این مقاله این روش تعیین اندازه دانه بر روی فولاد CK20 انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: جداسازی قطعات معیوب، تعیین اندازه دانه، آزمون غیرمخرب، آزمون جریان گردابی

مقدمه

یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر روی خواص مکانیکی قطعات فولادی، اندازه دانه می‌باشد. به طوری که افزایش یک شماره ASTM (یا به عبارتی کاهش اندازه دانه)، دمای انتقال نرمی به تردی را برای فولاد حدود ۱۷°C کاهش می‌دهد [۱]. در حقیقت کاهش اندازه دانه راهی مناسب برای تولید فولادهایی که در دماهای پایین نرم هستند، می‌باشد. گرچه همواره استحکام و چقرمگی در فولادها رابطه عکس دارند، اما ریزکردن دانه تنها روشی است که می‌توان هم استحکام و هم تافنس را

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

به کمک آن افزایش داد. با کاهش اندازه دانه، دمای انتقال نرمی به تردی[۴] کاهش و در نتیجه چقرمگی افزایش می‌یابد. از طرفی رابطه هال-پچ[۵] تنش تسلیم را به اندازه دانه مربوط می‌سازد.

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y D^{-1/2} \quad (۱)$$

که در این رابطه، σ_y تنش تسلیم، D اندازه‌دانه و K_y ضریبی است که به تجمع نابجایی‌ها در مرزدانه بستگی دارد و σ_0 نیز تنش اصطکاکی[۶] می‌باشد و نشان می‌دهد با کاهش اندازه دانه، تنش تسلیم افزایش می‌یابد.

انجام عملیات متالوگرافی و مشاهدات میکروسکوپی جهت تعیین اندازه دانه، روش‌هایی مخرب، وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند که به طور سنتی بدین منظور به کار می‌روند. از طرفی امکان بررسی ۱۰۰٪ قطعات نیز با این روش امکان‌پذیر نیست.

امروزه کاربرد روش‌های غیرمخرب تنها به بازرسی عیوب و ترک‌یابی محدود نمی‌شوند. با توجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب درفرایندهای کنترلی 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. این امر سبب صرفه‌جویی 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 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[۲و۳].

کاناپلایک[۷] ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده[۴] و یوچی موتو و چک[۸] در پژوهش‌هایی جداگانه همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان داده‌اند[۵و۶]. تعیین عمق دی کربوره شده با آنالیز هارمونیک[۷] و همچنین براساس تفاوت خواص مغناطیسی در دو فاز فریت و پرلیت[۸] گزارش شده است. خان[۹] توانسته است با استفاده از پاسخ جریان گردابی درصد پرلیت فولاد را تعیین کند[۹]. رومیچه[۱۰] و همکارانش اثر ریزساختار را برروی رفتار مغناطیسی فولادهای کربنی به وسیله‌ی سنسورهای الکترومغناطیسی بررسی کرده اند[۱۰] و تأثیر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی توسط محققین دیگری نیز بررسی و تأیید شده است[۱۱و۱۲و۱۳]. تعیین اندازه دانه هدف پژوهش حاضر می باشد. در این مقاله این روش غیرمخرب با استفاده از خروجی‌های مختلف جریان گردابی بر روی فولاد CK20 انجام شده است. برای این منظور ارتباط بین اختلاف فاز ولتاژ و جریان (Φ)، ولتاژ اولیه و ثانویه و امپدانس نرماله شده ناشی از پاسخ مواد به القاء جریان با اندازه دانه بررسی شده که نشان دهنده ارتباط مناسب بین این خروجی‌ها و اندازه دانه فریت در قطعات فولادی می‌باشد.

روش تحقیق

در این بررسی از فولاد ساده کربنی CK20 استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول شماره ۱: ترکیب شیمیایی فولاد CK20

نام عنصر	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
درصد وزنی	۰/۱۸	۰/۳۰	۰/۹۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۸

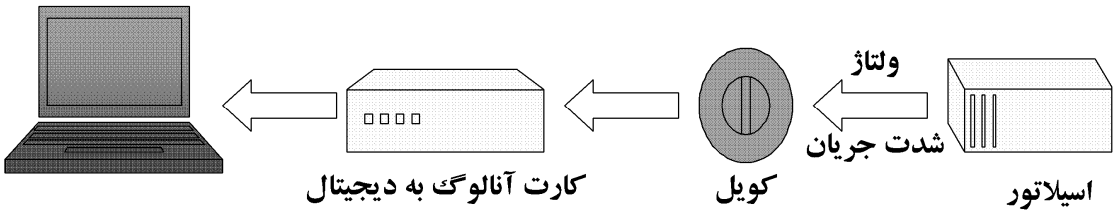
[۴] Ductile – Brittle Transition Temperature (DBTT)
[۵] Hall-Petch
[۶] Friction Stress
[۷] Konoplyuk
[۸] Uchimoto,Check
[۹] Khan
[۱۰] Rumiche

تعداد ۵ نمونه استوانه ای شکل به قطر ۲۴ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر تهیه گردید. جهت به وجود آوردن اندازه دانه‌های گوناگون در نمونه‌ها، عملیات حرارتی متفاوتی بر روی آنها اعمال شد به این صورت که نمونه‌ها در دماهای مختلف آستنیته و با سرعت‌های متفاوتی سرد شدند. پس از انجام عملیات متالوگرافی، از هر نمونه‌ی قرصی شکل تهیه شده، تعداد ۶ عکس از سطح به مغز در بزرگنمایی های مختلف گرفته شد و تمامی عکس ها جهت تعیین اندازه دانه با نرم افزار Clemex مورد پردازش قرارگرفتند. همان‌طورکه درجدول ۲ نشان داده شده است، اندازه دانه های متفاوت ناشی از عملیات حرارتی های گوناگون حاصل شده است.

جدول شماره ۲: عملیات حرارتی های متفاوت جهت ایجاد اندازه دانه‌های متفاوت

شماره نمونه	دمای آستنیته (°C)	زمان آستنیته (دقیقه)	نحوه سرد شدن	اندازه دانه (μm)	ASTM Number
۱	۹۰۰	۳۰	هوای متلاطم	۱۱/۵	۱۰/۹۱
۲	۹۰۰	۳۰	هوای راکد	۱۱/۹۳	۱۰/۸۸
۳	۹۰۰	۳۰	کوره خاموش	۱۴/۷	۱۰/۲۴
۴	۹۸۰	۳۰	کوره خاموش	۲۶/۹۵	۸/۵۷
۵	۱۰۷۰	۳۰	کوره خاموش	۳۶/۴	۷/۶۸

تمامی آزمون های غیرمخرب با دستگاه آزمایشگاهی جریان‌گردابی که قابلیت تولید فرکانس‌هایی از ۱هرتز تا ۲مگاهرتز را داراست، انجام شد. طرح شماتیک دستگاه به کار رفته در شکل۱ نشان داده شده است .



شکل۱: تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی

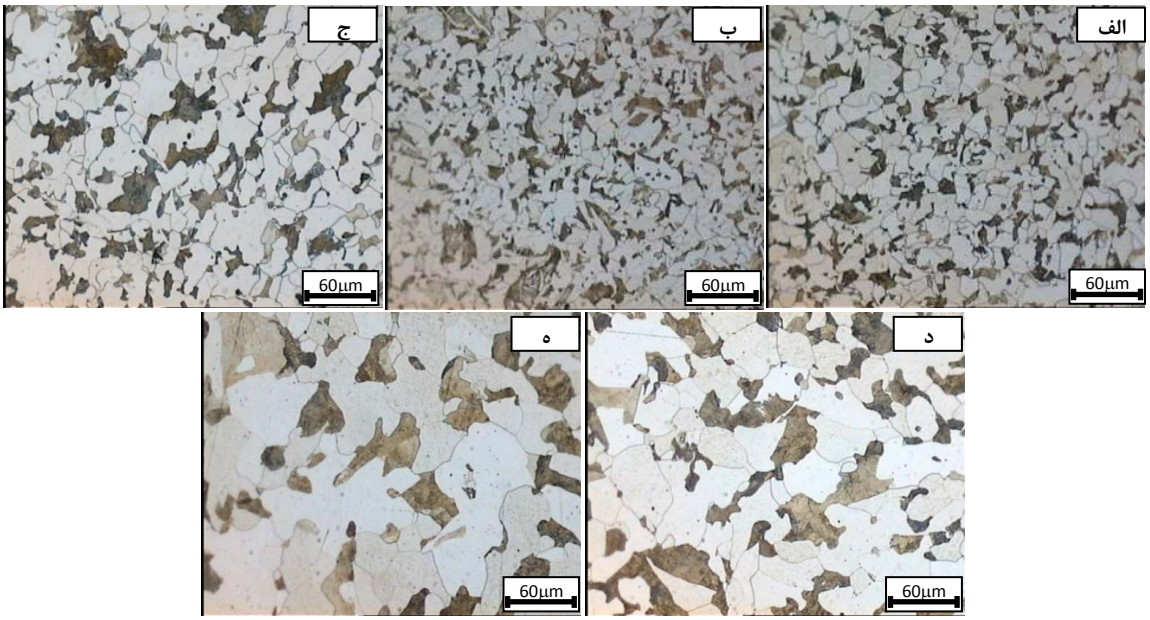
تمامی نمونه‌ها درکویل با ضریب پرشوندگی ۰/۹۸ و دمای ثابت ۲۷°C آزمایش شدند. برای بدست آوردن فرکانس بهینه آزمون جریان القایی، این آزمون در فرکانس هایی بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز انجام گردید.

نتایج و بحث

با توجه به عملیات حرارتی صورت گرفته بر روی قطعات، نمونه هایی با اندازه دانه‌های متفاوت بدست آمد. که تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختارهای این پنج نمونه در شکل۲ نشان داده شده است.

با استفاه از نرم افزار پردازش تصویر Clemex همان طور که در شکل۳ برای دو نمونه با کمترین و بیشترین اندازه دانه نشان داده شده است، اندازه دانه‌های ۱۱/۵ تا ۳۶/۴ میکرومتر یا عدد اندازه دانه[۱۱] ۱۰/۹۱ تا ۷/۶۸ بدست آمد.

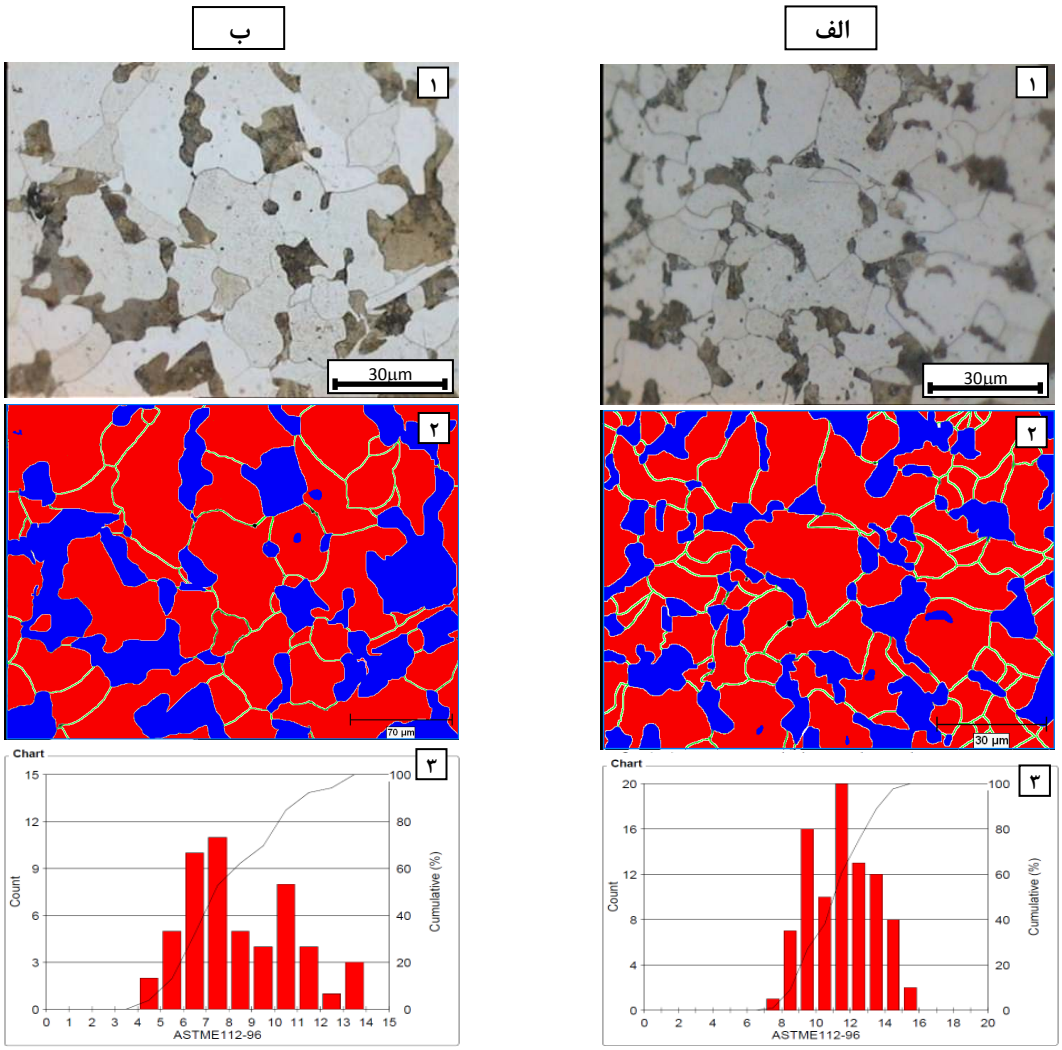
طبق پردازش انجام شده بر روی عکس‌های متالوگرافی، مشخص شد که در اثر این عملیات حرارتی‌ها، درصد فازهای فریت و پرلیت در نمونه های مختلف بین ۱ تا ۳ درصد دچار تغییر شده که این عامل یکی از منابع اصلی خطا در تعیین اندازه دانه می‌باشد.



شکل۲: تصاویرمیکروسکوپ نوری از ریزساختارهای نمونه‌های شماره الف)۱، ب)۲، ج)۳، د)۴، ه)۵

مطابق با مندرجات جدول شماره ۲

[۱۱] ASTM Number



شکل۳: تفاوت بیشترین و کمترین اندازه دانه و نحوه تعیین اندازه دانه با استفاده از نرم‌افزار Clemex

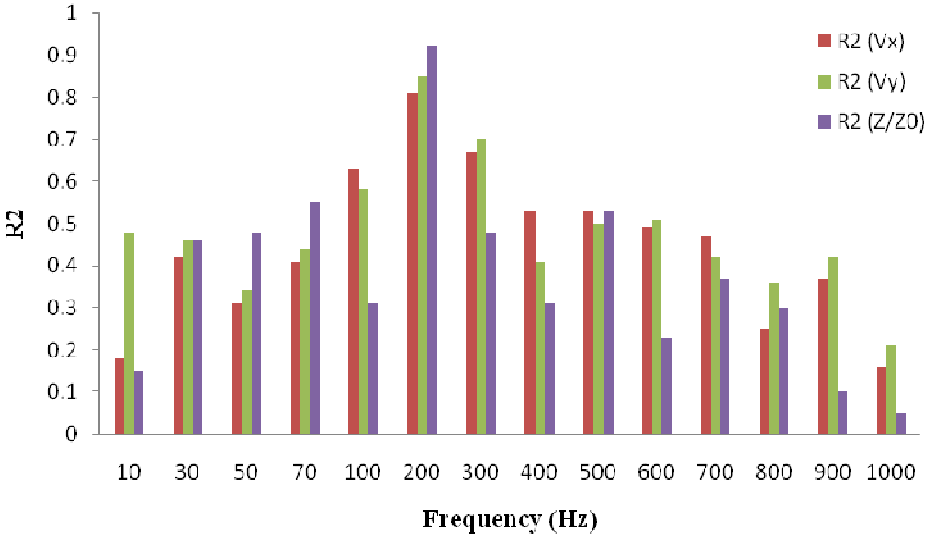
الف) نمونه با عدد اندازه دانه ASTM Number =10.91 ، ۱)ریزساختار ۲) پردازش اتوماتیک تصویر ۳) توزیع فراوانی عدد اندازه دانه

ب) نمونه با عدد اندازه دانه ASTM Number =7.68 ، ۱)ریزساختار ۲) پردازش اتوماتیک تصویر ۳) توزیع فراوانی عدد اندازه دانه

با هدف تعیین فرکانس بهینه از دو روش فرمول عمق استاندارد و آنالیز رگرسیون نتایج استفاده گردید [۲و۳]. ضریب همبستگی (R^2) همان طور که در شکل۴ نشان داده شده است، در فرکانس ۲۰۰هرتز، بیشترین مقدار را دارا بوده و به عنوان فرکانس بهینه جهت تعیین اندازه دانه انتخاب گردید.

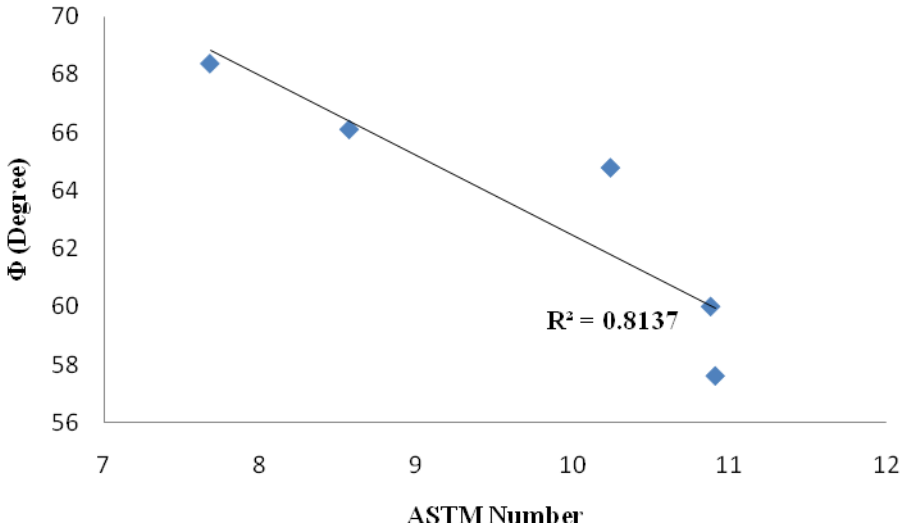
اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ(φ) یکی از پارامترهای قابل محاسبه توسط آزمون جریان گردابی است. چنانچه تنها سیم پیچ اولیه در مدار قرار گیرد، با رسم نمودار جریان و ولتاژ می توان اختلاف فاز بین آن ها را بدست آورد. برای این کار، پس از ثبت داده های مربوط به جریان و ولتاژ در طی آزمون جریان القایی، نمودار آن ها در نرم افزار MATLAB در یک دستگاه رسم، و با محاسبه طول موج و اختلاف زمانی بین جریان و ولتاژ (Δt)، از طریق رابطه۲ مقدار اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ(φ) تعیین گردید.

$$\varphi = 360\left(\frac{\Delta t}{\text{طول موج}}\right) \qquad (۲)$$



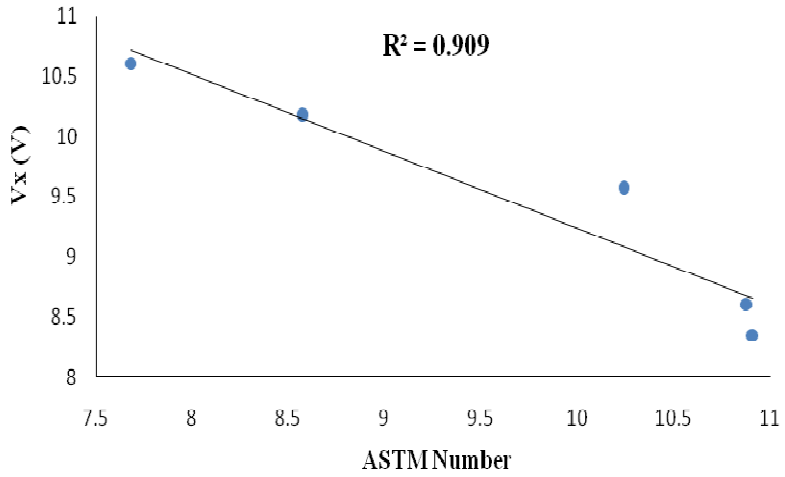
شکل۴: ضریب تناسب R^2 بین اندازه دانه و امپدانس نرماله شده، ولتاژ اولیه و ولتاژثانویه جهت تعیین فرکانس بهینه

شکل۵ ارتباط بین اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ(φ) و اندازه دانه را نشان می دهد. ضریب همبستگی (R^2) بدست آمده نشان دهنده ارتباط مناسب، میان اختلاف فاز (φ) با اندازه دانه می باشد.

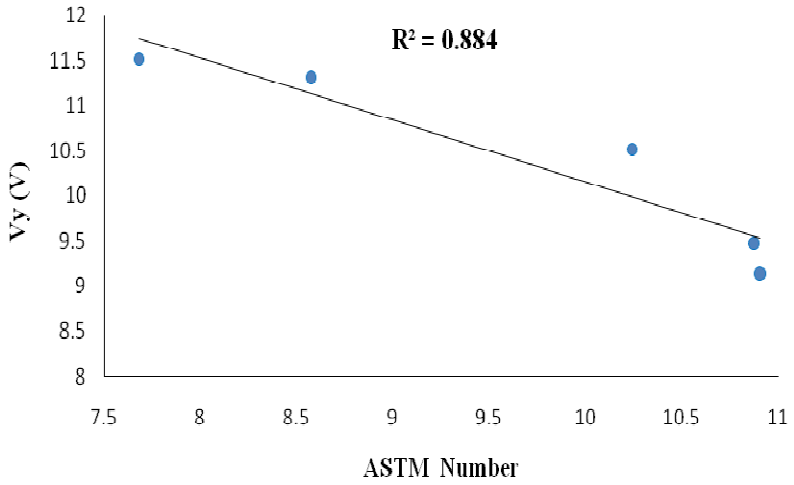


شکل۵: ارتباط بین اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ(φ) و عدد اندازه دانه

ولتاژ اولیه و ثانویه، از جمله پارامترهایی است که از طریق آزمون جریان القایی بدست می آید و می توان آن را مستقیما از ورودی و خروجی کویل اندازه گیری کرد. شکل‌های۶و۷ ارتباط بین اندازه دانه با ولتاژ ورودی و خروجی را نشان می دهد. ضریب همبستگی (R^2) بدست آمده برای هرکدام از ولتاژهای اولیه و ثانویه، نشان دهنده ارتباط مناسب تری با اندازه دانه می باشد.



شکل۶: ارتباط بین عدد اندازه دانه و ولتاژ اولیه ، در فرکانس ۲۰۰هرتز



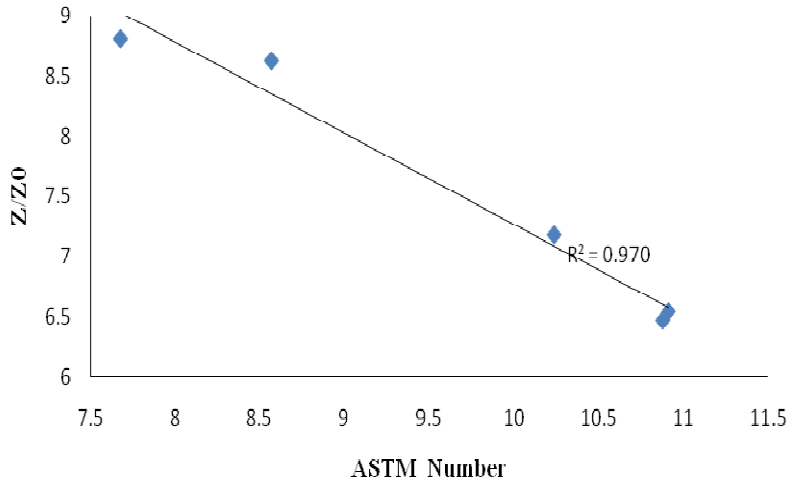
شکل۷: ارتباط بین عدد اندازه دانه و ولتاژ ثانویه، در فرکانس ۲۰۰هرتز

از دیگر پارامترهایی که توسط آزمون جریان القایی می توان بدست آورد امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) است. جهت یافتن این پارامتر، ولتاژ (V) و شدت جریان (I) حاصله از سیم پیچ کویل ثبت گردید، سپس با استفاده از رابطه۳ مقدار امپدانس کویل (Z) مربوط به هر نمونه محاسبه شد.

$$Z = \frac{V}{I} \qquad (۳)$$

با تقسیم امپدانس کویل مربوط به هر نمونه (Z) به امپدانس کویل خالی (Z_0)، امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) بدست می آید.

با محاسبه این پارامترها و برای یافتن ارتباطی بهتر، امپدانس نرماله شده بر حسب اندازه دانه رسم شد (شکل ۸).



شکل۸- ارتباط بین عدد اندازه دانه و امپدانس نرماله شده ، در فرکانس ۲۰۰هرتز

همان گونه که دیده شد در تمامی نمودارها با افزایش اندازه دانه یا به عبارت دیگر با کاهش چگالی مرز دانه، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان، امپدانس نرماله شده (Z/Z_0) و ولتاژ اولیه و ثانویه افزایش می یافت. برای توجیه این مسئله ابتدا به بررسی اثر مرزدانه بر روی پاسخ‌های مواد به القای جریان گردابی می پردازیم.

خواص مغناطیسی تحت تاثیر مرزدانه ها بوده، زیرا میدان بسته ای در مرزدانه ها به وجود آمده که با حرکت دامنه میدان [۱۲] در هنگام مغناطیسی شدن مخالفت می‌کند[۱۰]. به طور کلی مرزدانه با دو مکانیسم متفاوت بر روی حرکت دامنه میدان اثر می‌گذارد: الف) اثر خارجی که مربوط به جدایش و رسوبات و حضور آخال ها و ... در مرزدانه ها می‌باشد ب) اثر داخلی که به انرژی مغناطیس دائمی ناشی از تغییرات جهت گیری در دو دانه مجاور مرتبط می باشد[۱۱]. بنابراین مرزدانه ها به صورت مانع در برابر عبور جریان عمل می کنند و با افزایش اندازه دانه (کاهش چگالی مرز دانه)، افزایش نفوذپذیری مغناطیسی (μ) را شاهد هستیم. از طرفی رابطه۱ بیان می‌کند که با افزایش تراوایی مغناطیسی (μ)، مقدار ضریب خودالقایی (L) افزایش می‌یابد.

$$L = \mu N^2 A/l \qquad (۴)$$

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

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

$$X_L = 2\pi f L \qquad (۵)$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I \qquad (۶)$$

بنابراین افزایش در امپدانس دلیلی بر افزایش ولتاژ اولیه و ثانویه (V) و امپدانس نرماله شده ناشی از القاء جریان گردابی در نمونه‌های با اندازه دانه بزرگتر می‌باشد که در شکل‌های۶، ۷ و ۸ چنین ارتباطی مشاهده می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین ضریب همبستگی (R^2=۰/۹۷) بین اندازه دانه و امپدانس نرماله شده، بدست آمدکه نشان دهنده ضریب اطمینان بالای این روش در تعیین اندازه دانه و پیش بینی آن می‌باشد.

[۱۲] Domain walls

نتیجه گیری

در این بررسی کاربرد روش غیر مخرب جریان القایی در تعیین اندازه دانه قطعات فولادی از جنس CK20 مطالعه گردید. با استفاده از آنالیز رگرسیون ارتباط بسیار مناسبی (R^2=۰/۹۷) بین اندازه دانه و امپدانس نرماله دیده شدکه نشان دهنده امکان استفاده از روش غیرمخرب جریان القایی در تعیین اندازه دانه قطعات فولادی با ترکیب یکسان با دقت بالا می‌باشد.

مراجع

[۱] س ع، سجادی، رفتار مکانیکی مواد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ؛ ۱۳۸۴

[2] Don E.Bray, Roderic K.Stanly, “Nondestructive Evaluation”, CRC, 1997

[3] Donald J.Hagemair, “Fundamentals of Eddy Current Testing”, ASNT, 1990, ترجمه شرکت تست"تولید آلیاژ"

[4] S. Konoplyuk et al. "Characterization of ductile cast iron by eddy current method", NDT&E International, 2005

[5] T. Uchimoto et al., “Eddy current evaluation of cast irons for material characterization”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003

[6] J. Cech, “Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods”, NDT International April 1990

[7] D. Mercier et al., “Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing”, NDT&E International, 2006

[8] X.J.Hao et al., “Off-line measurement of decarburization of steels using a multifrequency electromagnetic sensor”, Scripta MATERRIALIA, 2008

[9] S.H. Khan et al., “Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method”, Journal of Materials Processing Technology, 2007

[10] 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, 2008

[11] J. Degauque et al., “Influence of the Grain Size on the Magnetic and Magnetomechanical Properties of High-Purity Iron”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1982

[12] J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, and J. Capo-Sanchez., “Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis Loop in Commercial Carbon Steel”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001

[13] B. K. Tanner, J. A. Szpunar, S. N. M. Wlllcock, L. L. Morgan, P. A. Mundell., “Magnetic and Metallurgical Properties of High-Tensile Steels”, Journal of Materials Science, 1988