



اولین کنفرانس بین‌المللی جوشکاری و آزمایشهای غیرمخرب
چهاردهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی
وسومین کنفرانس ملی آزمایشهای غیرمخرب
۱۷۶۶ خردادماه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج



انجمن جوشکاری آزمایشهای غیرمخرب ایران

سرکار خانم مهندس فائزه جراحی

نویسنده محترم مقاله: بررسی ریزساختار فولاد عملیات حرارتی کروی شده توسط روش سیگنال بارک هاوزن

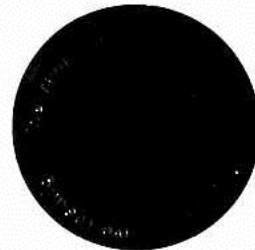
کدمقاله: ۹۲/۴۸

ارائه مقاله ارزنده پوستری جنابعالی به این کنفرانس نمودی از حرکت راستین شما برای توسعه پایدار کشورمان است چنین کوششی را ارج می‌نهمیم

و از آن تقدیر می‌نماییم.

عبدالوهاب ادب آوازه

رئیس کنفرانس





چهاردهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی
و سومین کنفرانس ملی آزمایش‌های غیرمخرب

۷۶امینیندسه سال ۱۳۹۲
دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج



انجمن پیشگامی آرایشهای غیرمخرب ایران

بررسی ریزساختار فولاد عملیات حرارتی کرووی شده توسط روش سیگنال بارک هاوزن

فائزه جراحی^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

سیگنال های بارک هاوزن توسط حرکت غیرپیوسته و برگشت ناپذیر دیواره حوزه های مغناطیسی که ناشی از میدان مغناطیسی متناوب خارجی است، ایجاد می شود. حرکت دیواره ها نیز وابسته به ساختار کریستالی مواد، چگالی عیوب کریستالی و توزیع آن ها در بلور است. سیگنال های بارک هاوزن کمک به مشخصه یابی ریزساختار مواد فرومغناطیس می کنند. هدف این مطالعه بررسی عملیات حرارتی کرووی کردن روی فولاد به روش بارک هاوزن است. نمونه های مختلفی که شامل پرلیت های لایه ای یا کاربید سمنتیت کامل، جزئی کرووی شده می باشند با عملیات حرارتی مناسب از فولاد Ck60 تهیه می شود. نمونه ها با انجام متالوگرافی، اندازه گیری سختی و بررسی سیگنال های بارک هاوزن مشخصه یابی می شوند. نتایج نشان می دهد که میزان سیگنال های بارک هاوزن با افزایش زمان کرووی سازی و تبدیل کاربیدها از لایه های درشت به کاربید های کرووی، به علت کاهش موانع دیواره های حوزه های مغناطیسی افزایش و با درشت شدن کره ها، کاهش پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: سیگنال بارک هاوزن، کرووی کردن، ریزساختار، عملیات حرارتی

بررسی ریزساختار فولاد عملیات حرارتی کرووی شده توسط روش سیگنال بارک هاوزن

فائزه جراحی^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

سیگنال‌های بارک هاوزن توسط حرکت غیریوسته و برگشت ناپذیر دیواره حوزه‌های مغناطیسی که ناشی از میدان مغناطیسی متناوب خارجی است، ایجاد می‌شود. حرکت دیواره‌ها نیز وابسته به ساختار کریستالی مواد، چگالی عیوب کریستالی و توزیع آن‌ها در بلور است. سیگنال‌های بارک هاوزن کمک به مشخصه‌یابی ریزساختار مواد فرومغناطیس می‌کنند.

هدف این مطالعه بررسی عملیات حرارتی کرووی کردن روی فولاد به روش بارک هاوزن است. نمونه‌های مختلفی که شامل پرلیت‌های لایه‌ای یا کاربید سمنتیت کامل / جزئی کرووی شده می‌باشند با عملیات حرارتی مناسب از فولاد Ck60 تهیه می‌شود. نمونه‌ها با انجام متالوگرافی، اندازه‌گیری سختی و بررسی سیگنال‌های بارک هاوزن مشخصه‌یابی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که میزان سیگنال‌های بارک هاوزن با افزایش زمان کرووی سازی و تبدیل کاربیدها از لایه‌های درشت به کاربیدهای کرووی، به علت کاهش موانع دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی افزایش و با درشت شدن کره‌ها، کاهش پیدا کرده است.

¹ Faezeh_jarrahi66@yahoo.com

² m-kashefi@ferdowsi.um.ac.ir

"کلمات کلیدی": سیگنال بارک هاوزن، کرووی کردن، ریزساختار، عملیات حرارتی

مقدمه

کرووی سازی یک عملیات حرارتی تجاری برای فولادهای کم کربن و پر کربن است که باعث بهبود کارپذیری و قابلیت ماشین کاری در آنها، یا بهبود ریزساختار مناسب برای عملیات حرارتی بعدی می شود. در صورتی که حرارت دهی در دمای به قدر کافی بالا اعمال شود و مدت زمان کافی برای نفوذ و ایجاد کره های سمنتیتی، فراهم باشد ریزساختار کرووی در هر نوع ریزساختار اولیه ای ایجاد می شود. فرایند کرووی سازی را می توان به دو مرحله نفوذی تقسیم کرد. در مرحله اول تمام کاربیدها با نسبت هندسی بالا (مثل سمنتیت های لایه ای در پرلیت) به تکه های کوچکتر کاربیدهای کرووی شکسته می شوند، ذرات کرووی شده در مقایسه با ساختار کشیده نسبت سطح به حجم کمتری دارند. این ذرات کرووی شده کوچک با فرایند استوالد راپینینگ به ذرات بزرگ تبدیل شده از این رو کاهش بیشتری در نسبت سطح به حجم نهایی پیدا می کنند. سنیتیک هر دو مرحله کرووی سازی تحت کنترل نفوذ کربن و دیگر عناصر آلیاژی زمینه فریت یا آستنیتی است. بنابراین، تغییر در مورفولوژی کاربید، نیرو محرکه ترمودینامیکی است که از کاهش فصل مشترک فریت-کاربید ناشی می شود (۱).

تست بارک هاوزن می تواند انتخاب مناسبی برای بررسی غیر مخرب برای کرووی سازی فولاد باشد. سیگنال-های بارک هاوزن اثری از تغییرات ناپیوسته در مغناطیسی کردن است که به وسیله حرکت ناگهانی و غیر برگشت پذیر دیواره حوزه ها ایجاد می شود. مشاهده می شود که تست بارک هاوزن برای بررسی های ریزساختاری فولاد به روش غیر مخرب به طور گسترده استفاده می شود که دلیل آن حساسیت این روش به ریزساختار است (۲). فولادهای کربنی تحت عملیات حرارتی کرووی سازی قرار می گیرند تا کاهش سختی و افزایش انعطاف پذیری برای بهبود قابلیت ماشینکاری در آنها حاصل شود (۳). مشاهده شد که اندازه و توزیع ذرات کاربیدی به شدت ساختار حوزه ها و فرایند دیواره حوزه ها را تحت تاثیر قرار می دهد و از این رو خواص مغناطیسی فولادها را تعیین می کند (۴). نمودار سیگنال بارک هاوزن فولاد C% ۰/۲ کوئینچ و تمپر شده بعد از تمپر کردن در حدود ۱۰۰-۱۵ ساعت از حالت تک پیک به دو پیک تبدیل می شود (۵). حین کرووی سازی فولاد پرلیتی، کاهش در پیک تست مغناطیسی نشر صوتی و ایجاد پیک دوم در نمودار سیگنال های بارک هاوزن مشاهده شد (۶). در فولاد فریت-پرلیتی با افزایش فاز فریت فعالیت بارک هاوزن در میدان مغناطیسی های کم، کاهش می یابد و باعث ایجاد پیک خارجی در نمودار بارک هاوزن می شود (۸)-

۷). این پژوهش به بررسی مراحل کروی سازی فولاد توسط روش بارک هاوزن پرداخته می‌شود. با به- کارگیری عملیات حرارتی کروی سازی در نمونه‌های فولادی CK60، مجموعه‌ای از نمونه‌ها شامل پرلیت- های لایه‌ای یا کاربیدهای به طور جزئی/کامل کروی شده در زمینه فریتی حاصل می‌شوند.

روش تحقیق

در این بررسی از فولاد کربنی CK60 استفاده شد. که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. تعداد ۸ نمونه استوانه‌ای شکل به قطر 12 mm و طول 100 mm تهیه گردید. جهت به وجود آوردن درصد کرویت‌های گوناگون در نمونه‌ها، عملیات متفاوتی بر روی آن‌ها اعمال شد به این صورت که ابتدا نمونه‌ها در دمای 885°C به مدت ۳۰ دقیقه نرماله و بعد در هوا سرد شدند. سپس یکی از نمونه‌ها در شرایط نرماله باقی مانده و روی باقی نمونه‌ها عملیات حرارتی کروی سازی انجام شد. روند عملیات حرارتی کروی کردن در نمونه اول به شرح زیر است: ابتدا نرماله در دمای 885°C به مدت ۳۰ دقیقه، سپس فرایند کروی سازی که قرار دادن نمونه‌ها در کوره 740°C به مدت ۱۵ دقیقه و بلافاصله قرار دادن در کوره 700°C و نگهداری برای ۳ ساعت در این دما و سپس سرد کردن در هوا تا دمای محیط.

نمونه‌های دیگر با همین روند عملیات کروی سازی به طور تکرار شونده عملیات حرارتی می‌شوند. که در جدول ۲ تعداد دفعات تکرار پروسه کروی سازی در نمونه‌ها آورده شده است. بعد از بررسی‌های متالوگرافی از نمونه‌ها، اندازه‌گیری‌های کمی جهت تعیین درصد کرویت از تصاویر SEM توسط نرم افزار Celemex انجام شد. اندازه‌ی کره‌ها و نسبت هندسی نیز برای بررسی درشت شدن حین کروی سازی توسط این نرم افزار تعیین شد. عدد سختی ویکرز (VHN) نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد که تغییرات آن با افزایش زمان عملیات حرارتی از نمونه نرماله تا نمونه کروی با بیشترین زمان کروی سازی، کاهش می‌یابد. مقادیر میانگین اندازه کره‌ها و درصد کرویت نیز در جدول ۲ آورده شده است.

برای اندازه‌گیری و بررسی سیگنال‌های بارک هاوزن از دستگاه آزمایشگاهی که به همین منظور طراحی شده بود استفاده شد. حین اندازه‌گیری میدان مغناطیسی سینوسی، فرکانس اعمالی $4/5\text{ Hz}$ به نمونه که با یوک مغناطیسی در تماس است، اعمال می‌شود. یوک مغناطیس کننده به صورت U شکل و از ورق‌های آهن-سیلیسی ساخته شده است. در این کوئل سیمی به ضخامت $0/55$ میلی‌متر و به تعداد دور ۵۰۰ دور در اطراف هسته آهنی پیچیده شده است. برای ساخت کوئل خواننده برگیر از ۳۰۰ دور سیم به ضخامت $0/13$ میلی‌متر که در اطراف یک هسته فریتی پیچیده شده است، استفاده می‌شود. ولتاژ خروجی توسط تقویت

کننده‌ها تقویت می‌شود. نمودار شدت بارک هاوزن نویز با رسم شدت سیگنال‌ها به عنوان تابعی از ولتاژ کاربردی در شکل ۱ نشان داده شد.

نتایج و بحث

مطالعه تصاویر SEM نشان می‌دهد که با ادامه روند کروی سازی، لایه‌های سمتی به ذرات کاربید شکسته شده و تعداد ذرات کاربید با افزایش زمان (t)، افزایش می‌یابد. حین کروی سازی، درشت شدن ذرات کاربید مشاهده شد، که با افزایش میانگین قطر ذرات کروی شده (d) مشخص گردید. پروسه کروی سازی تا حدود ۲۶ ساعت ادامه داشته و نتیجه آن افزایش بیشتر در مقادیر d را نشان می‌دهد (جدول ۲). تصویر میکروسکپ نوری نمونه نرماله و SEM نمونه‌های اول، پنجم و هفتم در شکل ۲ آورده شده است.

تعیین میانگین اندازه کره‌ها

اندازه ذرات برای مشاهده‌ی تشکیل ذرات کروی اولیه حین کروی سازی و تاثیر فرایند درشت شدن کره‌ها بعد از ایجاد کره‌های ریز، به کار برده می‌شود. در پژوهشی مشابه، هاسفرد و همکارانش (۹) یک ذره کروی را ذره‌ای با نسبت هندسی کمتر از ۳ به ۱ تعریف کردند. در پژوهشی دیگر، داووت (۱۰) نیز به بررسی کروی سازی پرلیت پرداخت و ذرات کروی را ذراتی با نسبت هندسی کمتر از ۵ به ۱ تعریف کرد. در این پژوهش یک ذره کروی، ذره‌ای با نسبت هندسی کمتر از ۲/۵ به ۱ تعریف می‌شود. شکل ۳ توزیع اندازه ذرات کروی شده برای نمونه‌های اول، پنجم و هفتم در زمان‌های مختلف حین عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. با مشاهده نتایج با اعمال افزایش روند کروی سازی از نمونه ۱ تا نمونه ۵ تعداد کره‌ها افزایش می‌یابد، اما از این نمونه به بعد، فرایند درشت شدن با کاهش تعداد کره‌های ریز اتفاق می‌افتد. شکل ۴ تغییرات میانگین اندازه ذرات را برای نمونه‌های کروی شده نشان می‌دهد.

تعیین درصد کرویت

نرم افزار پردازش تصاویر نه تنها اندازه ذرات بلکه شکل ذرات را نیز بررسی می‌کند. در این پژوهش ذرات کروی ذراتی با ضریب هندسی ۲/۵ به ۱ تعریف می‌شوند. با استفاده از این معیار اندازه درصد کرویت توسط رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد.

$$\% \text{ کروی سازی} = \frac{A_S}{A_T} \times 100$$

۱

A_T مساحت کلی تمام ذرات و A_S مساحت ذرات کروی شده می‌باشد. شکل ۵ اندازه درصد کرویت را

برای نمونه‌های کروی شده نشان می‌دهد.

تعیین پارامترهای بارک هاوزن

با توجه به شکل ۱ با افزایش زمان کروی سازی ارتفاع پیک شدت سیگنال‌ها از نمونه نرماله تا نمونه ۵ کروی که شش مرحله تحت پروسه کروی سازی قرار گرفته است، رو به افزایش است، از این نمونه به بعد که فرایند درشت شدن کره‌ها اتفاق می‌افتد شدت ارتفاع پیک کاهش می‌یابد. اما موقعیت پیک روی محور افقی از نمونه نرماله تا نمونه ۵ کروی شده به سمت ولتاژهای کمتر که معادل با میدان‌های کمتر است شیفت پیدا می‌کند، و در نمونه‌های بعدی که درشت شدن اتفاق می‌افتد به سمت میدان‌های بیشتر حرکت می‌کند. از آنجایی که تغییرات موقعیت پیک ولتاژ مشابه تغییرات کورسیویتی H_c در حلقه هیستروزیس می‌باشد می‌توان این تغییرات را با تغییرات H_c ارتباط داد. تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی متناوب، سیگنال‌های بارک هاوزن در اثر تغییرات ناگهانی در مغناطش و حرکت برگشت ناپذیر دیواره حوزه‌های 180° درجه ایجاد می‌شوند. بنابراین، چگالی دیواره حوزه‌های مغناطیسی ارتفاع پیک بارک هاوزن یا بیشینه ولتاژ را تعیین می‌کند (۱۰). نتایج نشان می‌دهد که سیگنال‌های بارک هاوزن به تغییرات اندازه و مورفولوژی کاربیدها حین کروی سازی حساس می‌باشند. تغییرات شدت ارتفاع پیک ولتاژ و RMS ولتاژ با افزایش زمان کروی سازی به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲ هر دو پارامتر با افزایش زمان کروی سازی تا حد مشخصی افزایش پیدا کرده و بعد از آن با بزرگ شدن کره‌ها کاهش می‌یابند. مقادیر موقعیت پیک یا H_c نیز با افزایش زمان ابتدا کاهش پیدا می‌کند و سپس افزایش می‌یابد که در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر H_c برای نمونه‌های کروی نسبت به نمونه نرماله کمتر می‌باشد، که به معنی تاثیر بیشتر لایه‌های سمنتیتی نسبت به کاربیدهای کروی در قفل کنندگی دیواره‌ی حوزه‌های مغناطیسی است (۱۰). هدرینگتون و همکارانش (۱۱) به این نتیجه رسیدند که آرایش حوزه‌های مغناطیسی در فولادهای پرلیتی به آرایش دیواره‌ها و لایه‌های سمنتیتی وابسته است. اگر دیواره با لایه‌ها موازی باشد، به شدت قفل می‌شود. در حالی که اگر بر لایه‌ها عمود باشد، به آسانی حرکت می‌کند تا زمانی که به دانه دیگری برسد که لایه‌ها در آن آرایش دیگری داشته باشند. لو و همکارانش (۱۲) نتایج آزمایشات در پرلیت نشان می‌دهد که لایه‌های سمنتیتی اثر پین کنندگی قوی‌تری نسبت به کره‌های سمنتیتی برای حرکت دیواره حوزه‌ها دارند. که این امر به خاطر طبیعت مسطح و پیوسته ذرات، یا چیدمان فواصل منظم و موازی آن‌ها، یا ترکیبی از هر دو می‌باشد. در نتیجه نمونه فریت-پرلیت پیک بارک هاوزنی در بیشترین میدان‌های مغناطیسی که معادل با H_c های بالا است، دارد. در این نمونه‌ها حوزه‌های مغناطیسی در لایه‌های سمنتیتی قفل شده و آزاد شدن دیواره حوزه‌ها از موانع

نیازمند اعمال میدان مغناطیسی معکوس بیشتری خواهد بود. در نمونه‌های گروهی نیز با افزایش تعداد کره‌ها و شکسته شدن بیشتر لایه‌های سمنتیتی از نمونه ۱ تا ۵ موقعیت پیک و لثاژ به سمت H_c های کمتر شیفت پیدا می‌کند که با به تدریج از بین رفتن لایه‌های سمنتیتی قابل توجیه است. اما در نمونه ۶ و ۷ که کره‌ها درشت می‌شوند، مشاهده می‌شود که پیک میدان به سمت ولتاژهای کمتر که معادل با میدان‌های کمتر و یا H_c های کمتر است شیفت پیدا می‌کند، به دلیل افزایش چگالی پل‌های آزاد مغناطیسی در فصل مشترک سمنتیت-زمینه با افزایش اندازه کاربیدهای سمنتیتی، مقدار H_c افزایش می‌یابد (۱۴-۱۳). که این افزایش در کاربیدهای با میانگین اندازه به قدر کافی بزرگ ($< 0.5 \mu m$) که ایجاد حوزه‌های میله‌ای شکل ۹۰ درجه می‌کنند، رخ می‌دهد. با افزایش اندازه کاربیدها، افزایش در میدان مغناطیسی معکوس اتفاق می‌افتد که همراه با افزایش پل‌های آزاد مغناطیسی در فصل مشترک فریت-سمنتیت است و در نتیجه میزان قفل شوندگی دیواره حوزه‌های مغناطیسی افزایش می‌یابد. در صورتی که میانگین اندازه سمنتیت در فولادهای کربنی کمتر از $0.5 \mu m$ باشد، ایجاد حوزه‌های میله‌ای شکل در اطراف کاربید، باعث افزایش در قفل شدن دیواره حوزه‌های مغناطیسی نمی‌شود (۱۵). هاکان گور و همکارانش به این نتیجه رسیدند که نوع مکان‌های پین‌کننده برای دیواره حوزه‌های مغناطیسی در نمونه‌ها عمدتاً توسط لایه‌های سمنتیتی مشخص می‌شود. حین اندازه‌گیری‌های بارک‌هاوزن، بعد از مغناطیس شدن نمونه‌ها و رسیدن به نقطه اشباع، با به تدریج حذف کردن میدان مغناطیسی، هسته‌گذاری ناگهانی حوزه‌های مغناطیسی در جهت معکوس روی کاربیدهای سمنتیتی رخ می‌دهد. این حوزه‌های مغناطیسی هسته‌گذاری شده توسط حرکت دیواره حوزه‌ها گسترش می‌یابند. که در جهت مخالف با نیروی پین‌کنندگی اعمال شده توسط کاربیدها بوده و به آزاد شدن دیواره‌ها از موانع کمک می‌کند. جهش‌های ناگهانی دیواره حوزه‌ها با جدا شدن آن‌ها از کاربیدها رخ می‌دهد. بنابراین با فرایند گروهی سازی، شکسته شدن لایه‌های سمنتیتی و ایجاد کره‌های سمنتیتی رخ می‌دهد که باعث افزایش تعداد کاربیدها به عنوان موانع قفل‌کننده شده و در نتیجه هسته‌گذاری حوزه‌ها بیشتر و آزاد شده آن‌ها از موانع نیز بیشتر رخ می‌دهد، که باعث ایجاد پالس‌های بارک‌هاوزن بیشتری می‌شود. درشت شدن کره‌های سمنتیتی در ازای حذف کره‌های کوچکتر، باعث کاهش تعداد کاربیدها که مکان‌های هسته‌گذاری حوزه‌های مغناطیسی می‌باشند، می‌شود. که در نتیجه پالس‌های ناگهانی بارک‌هاوزن کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

حین کروی سازی فولاد CK60، مورفولوژی سمیتیت از لایه‌ای به کروی تغییر می‌کند که انرژی محرکه این تغییر کاهش در مساحت سطحی است. چگالی دیواره حوزه‌های مغناطیسی ارتفاع پیک بارک هاوزن یا بیشینه ولتاژ را تعیین می‌کند و راحت تر آزاد شدن دیواره ها از موانع موقعیت پیک را تعیین می‌کند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی کارایی تست غیر مخرب بارک هاوزن برای بررسی فرایند کروی سازی پرلیت و ریزساختار فولاد کروی شده است که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] Allen Schaneman Jr, "The effects of prior microstructure on spheroidizing kinetics and cold workability in bar steels", MS thesis, Faculty of Trustees of the Colorado, 2009.
- [2] D. J. Buttle, "Barkhausen and magnetoacoustic emission from ferromagnetic materials" 1987, A55, pp. 717-734.
- [3] G. Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1980.
- [4] J. Kameda and R. Ranjan, "Nondestructive evaluation of steel using acoustic and magnetic Barkhausen signals. I: Effect of carbide precipitation and hardness," Acta Metallurgica, 1987, A35, p. 1515–1526.
- [5] V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar and B. Raj, "Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1997, A171, p. 179–189.
- [6] C. Lo, J. Jakubovics and C. Scruby, "Non-destructive evaluation of spheroidised steel using magnetoacoustic and Barkhausen emission," IEEE Magnetics Society, 1997, A33, pp. 4035 - 4037.
- [7] C. Lo and C. Scruby, "Study of magnetization processes and the generation of magnetoacoustic and Barkhausen emissions in ferritic/pearlitic steel," Journal of Applied Physics, 1999, A85, pp. 5193 - 5195.
- [8] K. Davut and C. Gür, "Monitoring the microstructural changes during tempering of quenched SAE 5140 steel by magnetic Barkhausen noise," Journal of Nondestructive Evaluation, 2007, A26, pp. 107-113.
- [9] W. F. Hosford and J. M. O'Brien, "Spheroidization of Medium-Carbon Steels," Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, A6, pp. 69-72. R.
- [10] K. Davut and C. Hakan Gür, "Monitoring the Microstructural Evolution in Spheroidized Steels," Journal of Nondestructive Evaluation, 2010, A29, pp. 241-247.
- [11] M. Hetherington, J. Jakubovics, J. Szpunar and B. Tanner, "High-voltage Lorentz electron microscopy studies of domain structures and magnetization processes in

pearlitic steels," Philosophical Magazine , 1987, A56, pp. 561-577.

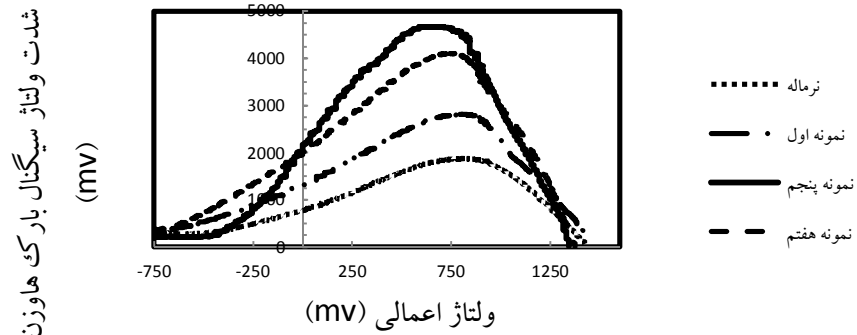
- [12] C. Lo, S. Lee, L. C. Kerdus and . D. Jiles, "Examination of the relationship between the parameters of Barkhausen effect model and microstructure of magnetic materials," Journal of Applied Physics, 2002, A91, pp. 7651 - 7653.
- [13] B. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley, 1972.
- [14] V. Moorthy, S. Vaidyanathan, B. Raj, T. Jayakumar and B. Kashyap, "Insight into the Microstructural Characterization of Ferritic Steels Using Micromagnetic Parameters," Metallurgical and Materials Transactions A , 2000, A31, pp. 1053-1065 .
- [15] V. Moorthy, B. Raj, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar and B. P. Kashyap, "Quantification of microstructural features in tempered carbon steel using magnetic Barkhausen emission parameters," American Institute of Physics, 2000.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد CK60 (%wt)

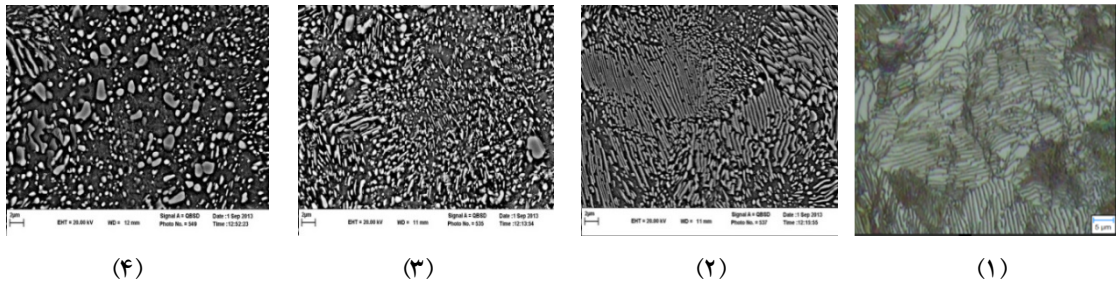
Sb	Cu	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	عنصر
۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۱	۰/۱۱	۰/۶۷	۰/۲۱	۰/۶۱	درصد وزنی

جدول ۲: تعداد دفعات تکرار پروسه کرووی کردن، زمان t (ساعت)، میانگین اندازه ذرات کرووی شده d (μm^2)، درصد کرویت (%) و سختی VHN، ارتفاع پیک H (mv)، ولتاژ RMS (mv) و موقعیت پیک ولتاژ یا موقعیت میدان (mv) در نمونه های نرماله و کرووی شده

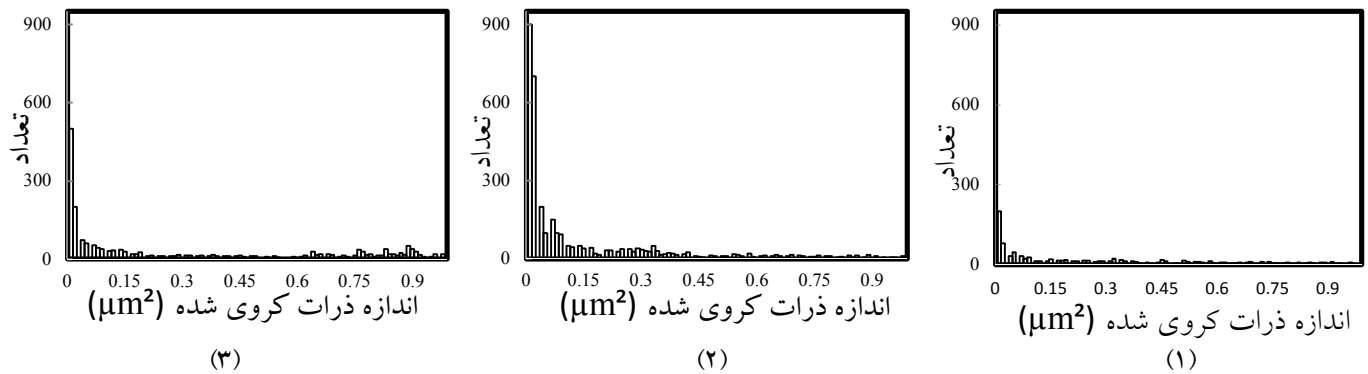
نمونه	تکرار پروسه کرووی کردن	t	d	درصد کرویت	VHN	H	RMS	موقعیت میدان
نرماله	-	-	-	-	۲۷۵	۱۸۷۰	۱۰۷۰	۸۱۵
۱	یک مرحله	۳: ۱۵	۰/۳۳	۲۳	۲۱۵/۳	۲۸۱۰	۱۶۶۰	۸۰۰
۲	دو مرحله	۶: ۳۰	۰/۳۴	۳۵	۲۱۳	۳۲۸۰	۱۹۰۰	۷۵۷
۳	سه مرحله	۹: ۴۵	۰/۳۶	۵۲	۱۹۰/۵	۳۴۵۰	۲۰۱۵	۷۲۹
۴	چهار مرحله	۱۳	۰/۴	۷۵	۱۸۳/۶	۴۵۱۶	۲۳۱۵	۷۱۵
۵	شش مرحله	۱۹: ۳۰	۰/۴۵	۷۹	۱۸۲	۴۶۶۰	۲۵۲۰	۶۷۳
۶	هفت مرحله	۲۲: ۴۵	۰/۵۸	۸۵	۱۷۹/۵	۴۲۷۳	۲۳۱۰	۷۴۳
۷	هشت مرحله	۲۶	۰/۷۵	۸۹	۱۷۰	۴۱۰۴	۲۴۰۵	۷۴۶,۵



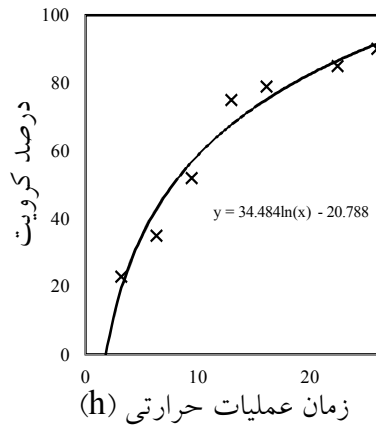
شکل ۱: نمودار شدت سیگنال بارک هاوزن به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی برای نمونه



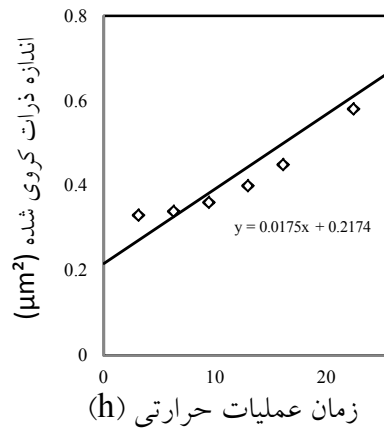
شکل ۲: تصاویر نمونه‌های عملیات حرارتی شده (۱) تصویر میکروسکپ نوری نمونه نرماله با بزرگنمایی $1000\times$ ، تصویر SEM با بزرگنمایی $10,000\times$ (۲) نمونه ۱ مرتبه تحت پروسه کروی قرار گرفته، (۳) نمونه ۶ مرتبه تحت پروسه کروی قرار گرفته، (۴) نمونه ۸ مرتبه تحت پروسه کروی قرار گرفته.



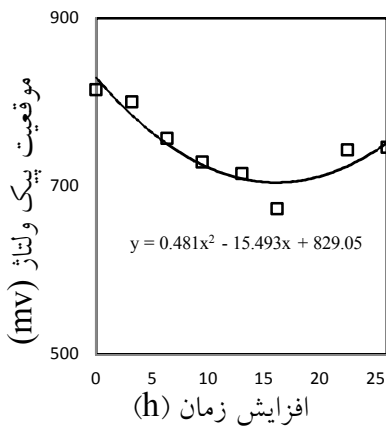
شکل ۳: هیستوگرام اندازه ذرات کروی در زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی کروی سازی (۱) نمونه ۱ مرتبه تحت پروسه کروی، (۲) نمونه ۶ مرتبه تحت پروسه کروی، (۳) نمونه ۸ مرتبه تحت پروسه کروی.



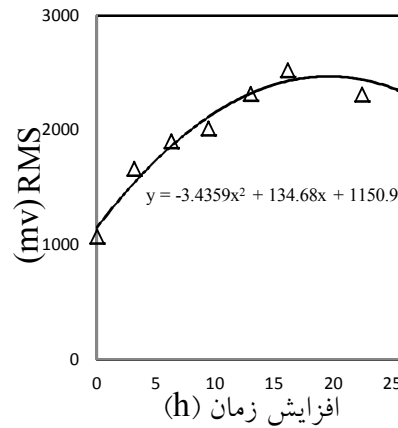
شکل ۵: تغییرات درصد کروی سازی
حین عملیات حرارتی کروی سازی فولاد
CK60



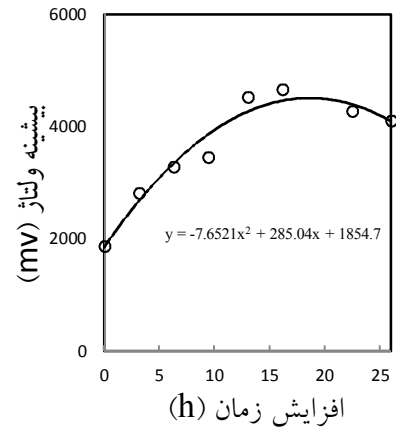
شکل ۴: تغییرات میانگین اندازه ذرات
کروی شده حین عملیات حرارتی کروی
سازی فولاد CK60



شکل ۸: موقعیت پیک ولتاژ با افزایش
زمان در نمونه‌های نرماله و کروی شده



شکل ۷: تغییرات RMS با افزایش زمان در
نمونه‌های نرماله و کروی شده



شکل ۶: تغییرات بیشینه ولتاژ با افزایش
زمان در نمونه‌های نرماله و کروی شده

