



دانشگاه شهید چمران اهواز

پانزدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی

9

چهارمین کنفرانس ملی آزمایشهای غیر مخرب



IWNT

انجمن جوشکاری آزمایشهای غیر مخرب ایران
دانشگاه شهید چمران اهواز، ۹ و ۱۰ دی ماه ۱۳۹۳

سرکار مهندس پریسا معین پور

کدمقاله: ۹۳/۲۴

نویسنده محترم مقاله: بررسی تاثیر تبلور مجدد بر سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن

ارائه مقاله ارزنده و توسری جالبی به این کنفرانس نمودی از حرکت راستین شایستگی تو سرمدار کشورمان است چنین کوششی را ارج می نهم

و از آن تقدیر می نمایم.

عبدالوهاب آوازه

رئیس کنفرانس





*15th National Conference on Welding & Inspection
& 4th National Conference on NDT*

Dear Parisa Moein pour

With thanks and gratitude of your presence at the conference which has been held on December 30-31, 2014, Shahid Chamran University of Ahvaz , This Certificate is awarded for your participation.

A.Adabavazeh
IWNT President





دانشگاه شهید چمران اهواز

پانزدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی
چهارمین کنفرانس ملی آزمایشهای غیرمخرب

دانشگاه شهید چمران اهواز، ۹ و ۱۰ دی ماه ۱۳۹۳



انجمن پژوهش‌های آزمایش‌های غیرمخرب ایران

بررسی تاثیر تبلور مجدد بر سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن

- پریسا معین پور^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲، محمد مزینانی^۳
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

امروزه استفاده از سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن (MBN) به عنوان یک آزمایش غیرمخرب برای بررسی ویژگی های متالورژیکی در مواد فرومغناطیس جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. سیگنال بارک هاوزن نوعی سیگنال مغناطیسی است که در اثر پرش (jump) برگشت ناپذیر دیواره های حوزه های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس بوجود می آید. این سیگنال با توجه به ماهیت خود تحت تأثیر عوامل متالورژیکی مختلفی می باشد. یکی از این عوامل، تغییرات ریزساختاری حاصل از تغییر شکل پلاستیک است. اثر متقابل مرزدانه و دیواره حوزه های مغناطیسی، که یک عامل ریزساختاری است، با استفاده از سیگنال بارک هاوزن قابل بررسی است. در این پژوهش با اعمال کار سرد و تغییر شکل پلاستیک و انجام فرآیند آنیل در محدوده دمایی 500 تا 570 °C به بررسی اثر شروع و پایان تبلور مجدد بر سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن در یک فولاد ساده کربنی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که ارتفاع پیک و RMS ولتاژ سیگنال بارک هاوزن با افزایش زمان آنیل، تا شروع تبلور مجدد کاهش یافته و تا پایان تبلور مجدد و رسیدن به مرحله رشد دانه افزایش می یابد. این تغییرات به دلیل تأثیر حذف نابجایی های منفرد در فرآیند بازیابی و افزایش چگالی مرزدانه با شروع تبلور مجدد، بر حرکت دیواره های حوزه های مغناطیسی می باشد. بررسی های انجام شده به کمک منحنی اثر انگشت، نتایج حاصل را تأیید می کند. نتایج حاصله می تواند به عنوان یک روش غیر مخرب در تعیین وقوع تبلور مجدد در فولاد بکار رود.

کلمات کلیدی: سیگنال بارک هاوزن، تبلور مجدد، مرزدانه، حوزه مغناطیسی

بررسی تاثیر تبلور مجدد بر سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن

پریسا معین پور^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲، محمد مزینانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

امروزه استفاده از سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن (MBN) به عنوان یک آزمون غیر مخرب برای بررسی ویژگی های متالورژیکی در مواد فرومغناطیس جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. سیگنال بارک هاوزن نوعی سیگنال مغناطیسی است که در اثر پرش (jump) برگشت ناپذیر دیواره های حوزه های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس بوجود می آید. این سیگنال با توجه به ماهیت خود تحت تأثیر عوامل متالورژیکی مختلفی می باشد. یکی از این عوامل، تغییرات ریزساختاری حاصل از تغییر شکل پلاستیک است. اثر متقابل مرزدانه و دیواره حوزه های مغناطیسی، که یک عامل ریزساختاری است، با استفاده از سیگنال بارک هاوزن قابل بررسی است. در این پژوهش با اعمال کار سرد و تغییر شکل پلاستیک و انجام فرآیند آنیل در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۵۷۰°C به بررسی اثر شروع و پایان تبلور مجدد بر سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن در یک فولاد ساده کربنی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که ارتفاع پیک و RMS ولتاژ سیگنال بارک هاوزن با افزایش زمان آنیل، تا شروع تبلور مجدد کاهش یافته و تا پایان تبلور مجدد و رسیدن به مرحله رشد دانه افزایش می یابد. این تغییرات به دلیل تأثیر حذف نابجایی های منفرد در فرآیند بازیابی و افزایش چگالی مرزدانه با شروع تبلور مجدد، بر حرکت دیواره های حوزه های مغناطیسی می باشد. بررسی های انجام شده به کمک منحنی اثر انگشت، نتایج حاصل را تأیید می کند. نتایج حاصله می تواند به عنوان یک روش غیر مخرب در تعیین وقوع تبلور مجدد در فولاد بکار رود.

کلمات کلیدی: سیگنال بارک هاوزن، تبلور مجدد، مرزدانه، حوزه مغناطیسی

¹Moinpur83@yahoo.com

²M-kashefi@ferdowsi.um.ac.ir

³Mazinani@ferdowsi.um.ac.ir

سیگنال مغناطیسی بارک هاوزن که به عنوان یک روش غیرمخرب در تعیین ویژگی‌های مواد فرومغناطیس کاربرد دارد، در اثر حرکت ناگهانی (پرش) و برگشت‌ناپذیر دیواره‌ی حوزه‌های مغناطیسی از روی عیوب موجود در ساختار بلوری (مثل رسوبات، نابجایی‌ها، مرزخانه‌ها و غیره)، در حین مغناطیس شدن مواد فرومغناطیس ایجاد می‌شود. سیگنال بارک هاوزن به عواملی مانند ترکیب شیمیایی، ریزساختار، مقدار و جهت تنش و کرنش وابسته است. تغییر در عوامل مذکور می‌تواند باعث تغییر در نوع و تعداد حرکت دیواره‌ها باشد و از این جهت، سیگنال‌های بارک هاوزن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در پژوهشی از ان‌جی (Ng) و همکارانش، مشخص شد که سیگنال بارک هاوزن با افزایش چگالی مرز دانه‌ها (کاهش اندازه دانه) افزایش می‌یابد که علت آن را مربوط به قابلیت قفل کنندگی مرز دانه دانستند [۱]. افزایش فاز پرلیت در فولادها باعث افزایش سیگنال بارک هاوزن می‌شود که مربوط به افزایش موانع حرکت دیواره‌ها یعنی فصل مشترک سمیتیت و آستنیت است [۲]. مطالعات گسترده‌ای نیز روی اثر تنش بر خروجی بارک هاوزن انجام گرفته است؛ نشان داده شده است که تنش کششی باعث افزایش سیگنال بارک هاوزن می‌شود و برعکس تنش فشاری سیگنال بارک هاوزن را کاهش می‌دهد [۳]. مطالعات انجام گرفته روی اثر تغییر شکل پلاستیک بر خروجی بارک هاوزن نیز نشان می‌دهد که سیگنال بارک هاوزن با افزایش تغییر شکل افزایش می‌یابد که علت آن را به افزایش چگالی نابجایی‌ها نسبت داده اند [۴]. در این پژوهش به بررسی اثر فرآیند بازیابی و تبلور مجدد بر خروجی سیگنال بارک هاوزن پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که این روش به خوبی قادر است تغییرات ناشی از این فرآیندها را شناسایی کند.

روش تحقیق

در این پژوهش، از ورق فولاد ساده کربنی با ضخامت ۴mm با آنالیز شیمیایی که در جدول ۱ آمده است استفاده شد. جهت یکنواخت کردن ریزساختار و از بین بردن اثر فرآیندهای متالورژیکی، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در درجه حرارت °C ۹۵۰ داخل کوره قرار داده شدند و سپس در هوای آرام در دمای محیط سرد شدند. سپس نمونه‌هایی با ابعاد ۴۰×۱۰۰mm آماده شده و با انجام نورد سرد، ۷۵٪ از ضخامت نمونه‌ها کاسته شد. نمونه‌های نورد شده در دو دمای °C ۵۰۰ با مدت زمان‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴ ساعت و °C ۵۷۰

با مدت زمان‌های ۱۰ و ۱۰۰ ثانیه، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۴۰ دقیقه حرارت داده شدند سپس در هوای آرام تا دمای محیط سرد شدند تا مقادیر مختلفی از بازیابی و تبلور مجدد بوجود آید. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری انجام شد.

برای انجام آزمون بارک‌هاوزن، یوک^۱ از سیم مسی با قطر ۰/۳mm و تعداد دور ۴۰۰ و کویل برگیر از سیم مسی با قطر ۰/۱mm و تعداد دور ۳۰۰۰ ساخته شد. شماتیک مدار مورد استفاده در آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق، جریان اعمالی به یوک توسط موج سینوسی با فرکانس ۱/۲۵ Hz انجام گرفت. حد پایینی فیلتر کردن ۱۵۰ Hz انتخاب شد و حد بالایی برای فیلتر کردن انتخاب نشد تا تمام سیگنال‌های بیشتر از ۱۵۰ Hz در محاسبات لحاظ شود. برای محاسبه پارامترهای روش بارک‌هاوزن، از نرم‌افزار Origin Pro استفاده شد. مهم‌ترین پارامتر در روش بارک‌هاوزن، پروفایل سیگنال‌های بارک‌هاوزن^۲ یا منحنی اثر انگشت^۳ است. پارامترهایی که از این منحنی بدست می‌آیند شامل ارتفاع بیشینه و موقعیت میدان بیشینه ارتفاع است.

نتایج و بحث

بررسی‌های ریزساختاری

با بررسی ریزساختاری نمونه‌ها مشخص شد که برای نمونه‌هایی که در دمای 500°C آنیل شدند دانه‌های کوچک هم‌محور فریت پس از ۱۲۰ دقیقه حرارت دهی متبلور شده و با افزایش زمان، بر تعداد و اندازه‌ی این دانه‌ها افزوده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که از زمان ۳ ساعت به بعد اندازه‌ی دانه‌های متبلور شده بطور چشمگیرتری نسبت به زمان‌های قبل، درشت‌تر شده‌اند. در نمونه‌هایی که در دمای 570°C آنیل شدند، زمان‌های مذکور ۱۰۰ ثانیه و ۵ دقیقه بوده است. تصاویر ریزساختاری در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود.

آزمون سیگنال بارک‌هاوزن

شکل منحنی اثر انگشت

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب منحنی‌های اثر انگشت در دماهای ۵۰۰ و ۵۷۵ درجه‌ی سانتیگراد را نشان می‌دهند.

¹ Yoke

² Barkhausen Noise Profile

³ Barkhausen Finger-print Curve

تغییرات بیشینه ارتفاع منحنی اثر انگشت

در تمام نمونه‌ها تنها یک پیک را می‌توان مشاهده کرد؛ تغییرات شدت این پیک می‌تواند تحت تاثیر سه مکانیزم بوجود آورنده سیگنال‌های بارک‌هازن، یعنی جوانه‌زنی حوزه‌های مغناطیسی، حذف حوزه‌های مغناطیسی و نیز پرش دیواره این حوزه‌ها از موانع باشد. شکل ۶، تغییرات بیشینه ارتفاع با زمان برای دو دمای ۵۰۰ و ۵۷۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به نمونه کارسرد شده (زمان صفر) است. با افزایش زمان حرارت دهی، بیشینه ارتفاع در هر دو دما ابتدا کاهش پیدا می‌کند، سپس مقدار این پارامتر زیاد شده و در ادامه با کاهش روبه‌رو می‌شود. تغییرات ریزساختار ناشی از تغییر شکل، بازیابی و تبلور مجدد بر سه مکانیزم شکل‌گیری سیگنال‌های بارک‌هازن اثر می‌گذارد که به شرح ذیل می‌باشد:

الف) کاهش بیشینه ارتفاع از زمان صفر تا ۲ ساعت برای دمای ۵۰۰ °C و از صفر تا ۱۰ ثانیه برای ۵۷۰ °C: در این مرحله، بازیابی اتفاق می‌افتد. در اثر بازیابی چگالی نابجایی‌ها که در اثر تغییر شکل افزایش یافته است، کاهش می‌یابد و مرزها و سلول‌های پایدار از آن‌ها شکل می‌گیرد. در بسیاری از تحقیقات، نابجایی‌ها را عامل قفل‌کننده دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی دانسته‌اند و پرش دیواره حوزه‌های مغناطیسی از نابجایی‌ها را علت افزایش سیگنال‌های بارک‌هازن در اثر تغییر شکل برشمردند [۷-۵]. طی فرآیند بازیابی، نابجایی‌ها با حذف یکدیگر و یا تشکیل ساختارهای پایدارتر نظیر سلول‌های نابجایی و یا مرزهای فرعی، از چگالی نابجایی‌های منفرد کاسته می‌شود. ساختارهای سلولی و مرزهای فرعی موانع بزرگ در مسیر حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی هستند بطوری‌که دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی قادر به جهش از این موانع نمی‌باشند و تنها باعث محدود شدن بازه حرکتی دیواره حوزه‌های مغناطیسی می‌شوند [۶]. بنابراین، کاهش ارتفاع بیشینه با افزایش زمان بازیابی را می‌توان ناشی از حذف نابجایی‌ها و محدود شدن حرکت آن‌ها به علت شکل‌گیری مرزهای فرعی دانست.

ب) افزایش بیشینه ارتفاع از زمان ۲ ساعت تا ۳ ساعت برای دمای ۵۰۰ °C و از زمان ۱۰ ثانیه تا ۵ دقیقه برای دمای ۵۷۰ °C: در این مرحله تبلور مجدد اتفاق می‌افتد. جوانه‌زنی دانه‌های جدید باعث افزایش چگالی مرز دانه‌ها می‌شود. در بسیاری از مطالعات، افزایش سیگنال‌های بارک‌هازن با کاهش اندازه دانه را به کاهش چگالی مرز دانه‌ها نسبت دادند. مرز دانه‌ها به عنوان محل‌هایی هستند که حوزه‌های مغناطیسی از سطح آن‌ها جوانه‌زنی کرده و نیز حذف می‌شوند [۹ و ۷ و ۱]. به علاوه، مرز دانه به محلی تشبیه شده است که از تعداد بسیار زیادی مانع نزدیک به هم تشکیل شده است و عبور ناگهانی دیواره حوزه‌های مغناطیسی از آن‌ها،

سیگنال‌های بارک‌هازن شدیدی را تولید می‌کند [۱]. بنابراین افزایش مرز دانه از طریق هر سه مکانیزم تولید کننده بارک‌هازن، یعنی، جوانه زنی، حذف و قفل شدن حوزه‌های مغناطیسی باعث افزایش سیگنال‌های بارک‌هازن می‌شود.

ج) کاهش بیشینه ارتفاع از زمان ۳ ساعت به بعد برای دمای 500°C و از زمان ۵ دقیقه به بعد برای دمای 570°C : در این مرحله نیز همانند مرحله قبل تبلور مجدد اتفاق می‌افتد؛ اما باید گفت که این مرحله رشد دانه-های متبلور شده چشمگیرتر از مرحله قبل (ب) اتفاق می‌افتد؛ در تحقیقی از او یارزابال^۱ و همکارانش [۱۰]، نشان داده شده است که در مراحل اولیه تبلور مجدد، نرخ جوانه‌زنی نسبت به نرخ رشد بیشتر بوده و در زمان-های زیاد این فرآیند، نرخ رشد بیشتر از نرخ جوانه‌زنی می‌شود. بنابراین در این مرحله، با رشد دانه‌های متبلور شده، چگالی مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد که در نتیجه آن ارتفاع بیشینه کاهش پیدا می‌کند.

تغییرات موقعیت میدان بیشینه ارتفاع منحنی اثر انگشت

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که موقعیت میدان بیشینه ارتفاع با افزایش فرآیندهای بازیابی و تبلور مجدد کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده بیان می‌دارد که این پارامتر بطور غیر مستقیم مقدار کورسیویتی^۲ مغناطیسی در حلقه هیستریزس را نشان می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. مقدار کورسیویتی در اثر افزایش عیوب ماده (موانع حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی) افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش تغییر شکل و افزایش چگالی مرز دانه‌ها باعث افزایش مقدار کورسیویتی می‌شود. در فرآیند بازیابی چگالی نابجایی‌ها کاهش پیدا می‌کند که این تغییر باعث کاهش موقعیت میدان می‌شود. در مرحله‌ای که تبلور مجدد شروع می‌شود، با وجود اینکه چگالی مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد اما باز هم موقعیت میدان کاهش پیدا می‌کند. علت کاهش موقعیت میدان با شروع تبلور مجدد، علاوه بر حذف نابجایی‌های مناطق تغییر شکل یافته، می‌تواند مربوط به اثر جوانه‌زنی حوزه‌های مغناطیسی باشد که از روی مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد. جوانه زنی حوزه‌های مغناطیسی در میدان‌های (ولتاژهای اعمالی) کم اتفاق می‌افتد که اثر سیگنال‌های بوجود آمده از آن باعث می‌شود که پیک منحنی اثر انگشت به میدان‌های کمتر جابه‌جا شود [۵].

¹ OYARZÁBAL

² Coercivity

نتیجه گیری

۱. زمان آغاز تبلور مجدد برای نمونه‌ای که ۷۵٪ نورده شده است ۲ ساعت برای دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و بین ۱۰ تا ۱۰۰ ثانیه برای دمای ۵۷۰ درجه سانتیگراد است.
۲. نابجایی‌ها با مکانیزم قفل کردن، سیگنال بارک‌هازن تولید می‌کند و مرز دانه‌ها علاوه بر مکانیزم قفل کردن، در اثر جوانه‌زنی حوزة‌های مغناطیسی از سطح آن‌ها، سیگنال بارک‌هازن تولید می‌کنند.
۳. پارامتر بیشینه ارتفاع، در اثر بازیابی کاهش می‌یابد و در اثر تبلور مجدد ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند؛ در قسمتی که افزایش می‌یابد، نرخ جوانه‌زنی نسبت به نرخ رشد بیشتر است و برعکس در قسمتی که این پارامتر کاهش می‌یابد نرخ رشد دانه نسبت به جوانه زنی دانه جدید بیشتر می‌باشد.
۴. پارامتر موقعیت میدان بیشینه ارتفاع بطور مرتب با افزایش فرآیندهای بازیابی و تبلور مجدد کاهش پیدا می‌کند.

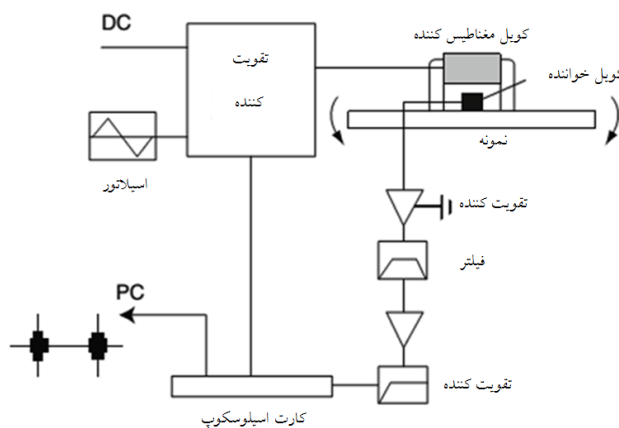
مراجع

- [1] D. Ng, K. Cho, M. Wong, S. Chan, X.-Y. Ma, C. Lo, "Study of microstructure, mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission", *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 358, pp. 186-198
- [2] K. Koo, M. Yau, D.H. Ng, C. Lo, "Characterization of pearlite grains in plain carbon steel by Barkhausen emission", *Materials Science and Engineering: A*. 2003, 351, pp. 310-315.
- [3] C. Gatelier-Rothea, J. Chicois, R. Fougères and P. Fleischmann, "Characterization of pure iron and 130 ppm) carbon-iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: study of the influence of stress and microstructure", *Acta materialia*, 1998, 46, pp. 4873-4882.
- [4] T. Liu, H. Kikuchi, Y. Kamada, K. Ara, S. Kobayashi, S. Takahashi, "Comprehensive analysis of Barkhausen noise properties in the cold rolled mild steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 310, pp. 989-991.
- [5] R. Baiotto, G. Gerhardt, M. Fukuhara, T. Yonamine, F.P. Missell, "Barkhausen noise and magnetic properties of plastically deformed silicon steels". *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2010, 46, pp. 294-297.
- [6] D. Buttle, C. Scruby, J. Jakubovics, G. Briggs, "Magneto-acoustic and Barkhausen emission: their dependence on dislocations in iron". *Philosophical Magazine*, 1987, A55, pp. 717-734.

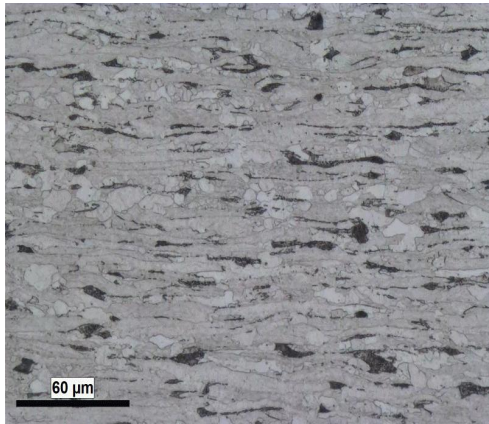
- [7] A. Ktena, E. Hristoforou, G.J. Gerhardt, F.P. Missell, F.J. Landgraf, D.L. Rodrigues Jr, M. Alberteris-Campos, "Barkhausen noise as a microstructure characterization tool". *Physica B: Condensed Matter*, 2014, 435, pp. 109-112.
- [8] S. Yamaura, Y. Furuya, T. Watanabe, "The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials". *Acta materialia*, 2001, 49, pp. 3019-3027.
- [9] J. Anglada-Rivera, L. Padovese, J. Capo-Sanchez, "Magnetic Barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size". *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2001, 231, pp. 299-306.
- [10] M. Oyarzábal, K. Gurruchaga, A. Martínez-de-Guerenu, I. GutiÉRrez, "Sensitivity of conventional and non-destructive characterization techniques to recovery and recrystallization". *ISIJ international*, 2007, 47, pp. 1458-1464.
- [11] M.J. Sablik and D.C. Jiles, "Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis". *Magnetics, IEEE Transactions on*, 1993, 29, pp. 2113-2123.
- [12] D. Jiles, "Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect". *Czechoslovak Journal of Physics*, 2000, 50, pp. 893-924.

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
%Wt	۰/۰۹۰	۰/۰۵۱	۰/۳۲۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۰	۰/۰۴۰	Bal.

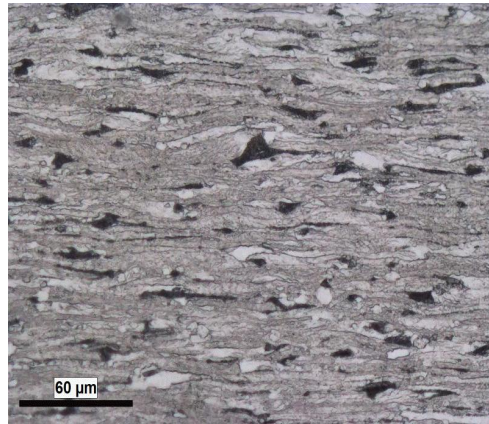
جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی.



شکل ۱: شماتیک مدار مورد استفاده در آزمایش.

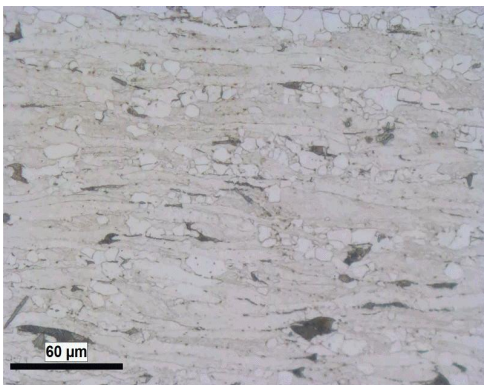


(ب)

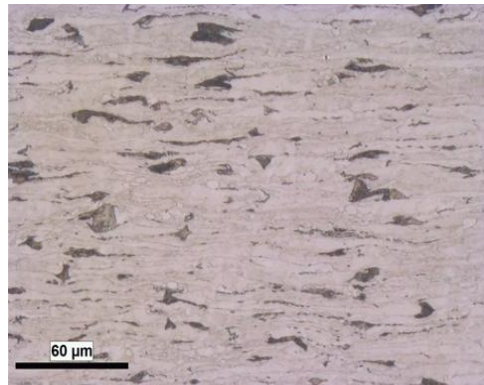


(الف)

شکل ۲: ریزساختار نمونه آنیل شده در دمای 500°C ، (الف) ۲ زمان ساعت، آغاز تبلور مجدد و (ب) زمان ۳ ساعت، شروع رشد دانه متبلور شده.

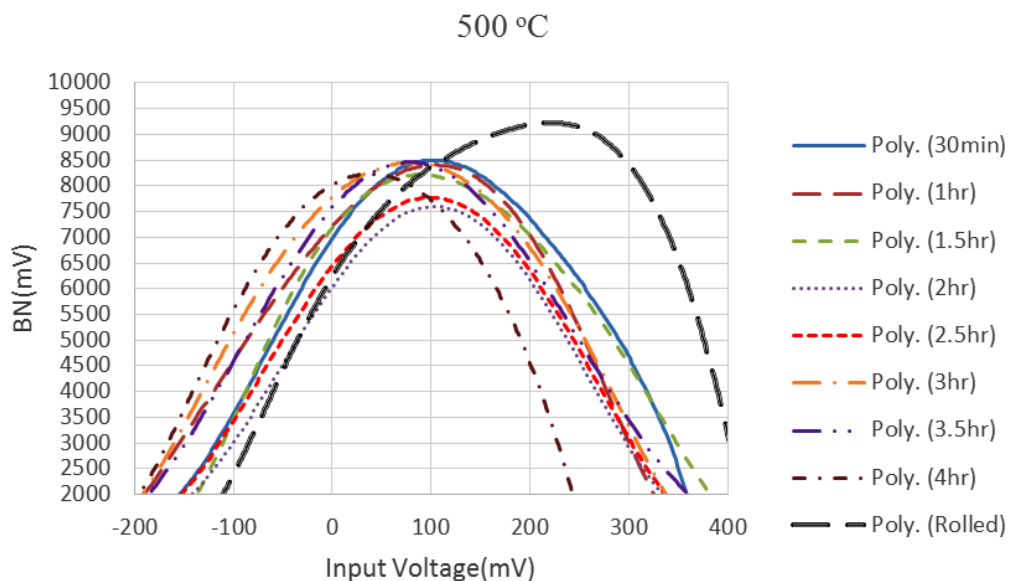


(ب)

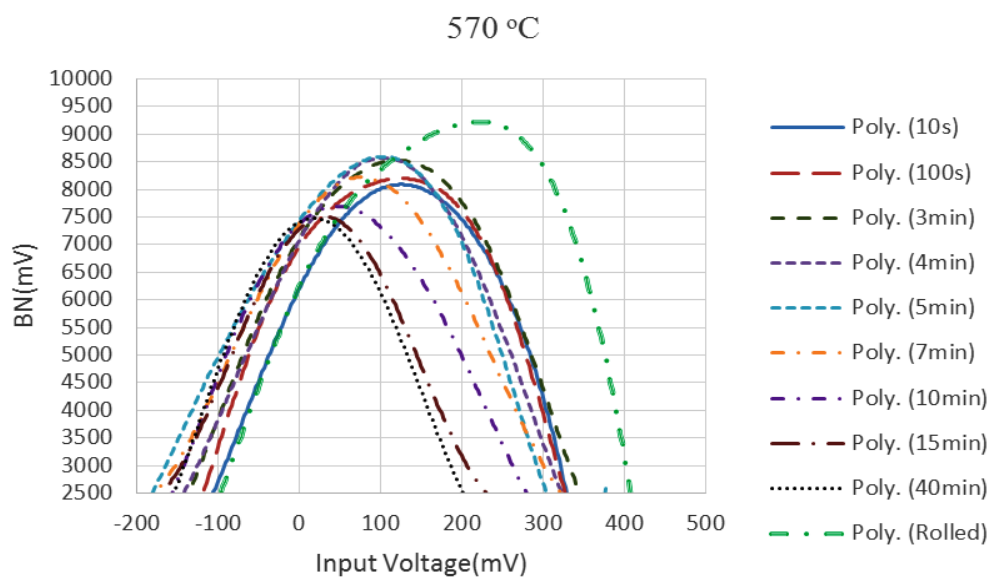


(الف)

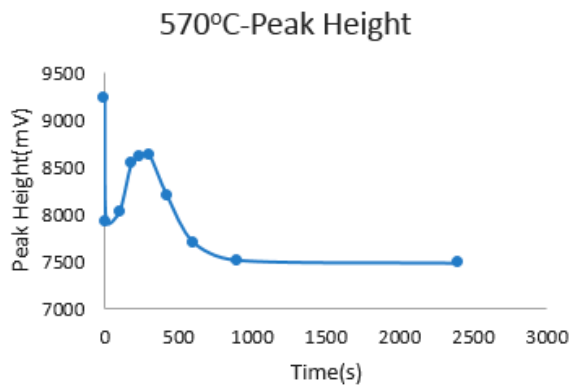
شکل ۳: ریزساختار نمونه آنیل شده در دمای 570°C ، (الف) زمان ۱۰۰ ثانیه، آغاز تبلور مجدد و (ب) زمان ۵ دقیقه، شروع رشد دانه های متبلور شده.



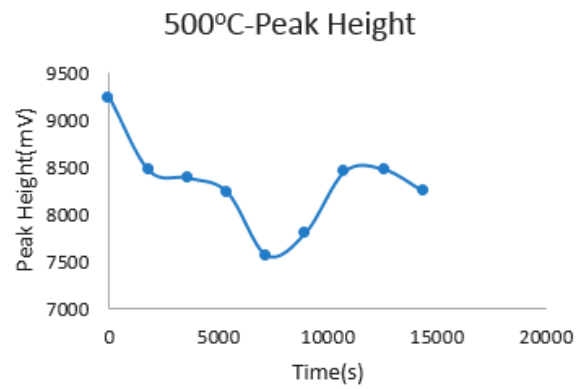
شکل ۴: منحنی‌های اثر انگشت برای نمونه نرماله شده و نمونه‌های حرارت داده شده در دمای ۵۰۰ °C در زمان‌های ۰/۵ تا ۴ ساعت.



شکل ۵: منحنی‌های اثر انگشت برای نمونه نرماله شده و نمونه‌های حرارت داده شده در دمای ۵۷۰ °C در زمان‌های ۱۰ ثانیه تا ۴۰ دقیقه.

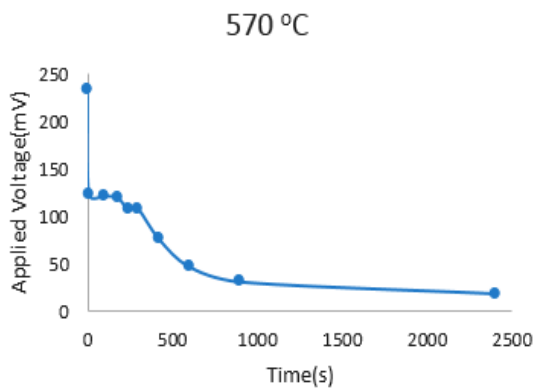


(ب)

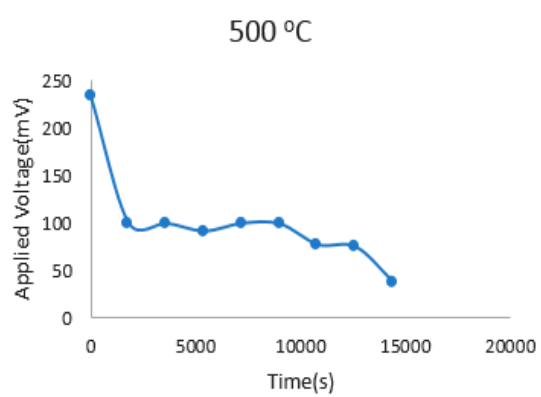


(الف)

شکل ۶: تغییرات بیشینه ارتفاع با زمان برای نمونه‌های حرارت داده شده در دمای (الف) 500°C و (ب) 570°C .



(ب)



(الف)

شکل ۷: تغییرات موقعیت میدان بیشینه ارتفاع با زمان برای (الف) دمای 500°C و (ب) دمای 570°C .