

بررسی تخمین تنش با تکنیک مغناطیسی بارکهاوزن

رسول محرمی^۱، حمید علیزاده^۲

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، r_moharami@znu.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵

چکیده

اساساً اغلب فرایندهای ساخت و تولید در قطعه عامل ایجاد تنش پسماند می‌باشند. جوشکاری، آهن‌گری، ریخته‌گری و جز این‌ها از جمله روش‌های عمده و پرکاربرد در ساخت تجهیزات صنعتی، از منابع ایجاد این تنش‌ها در محصولات صنعتی هستند. آثار تنش‌های پسماند ممکن است به بزرگی، جهت و توزیع تنش، با در نظر گرفتن تنش اعمالی از خارج، سودمند یا مضر وابسته باشد. امروزه موضوع اثر تنش‌های پسماند بر رفتار مکانیکی و کارکرد قطعات مهندسی مورد توجه بسیار است. در این مقاله، نخست خواص مغناطیسی مواد و پارامترهای اثرگذار و اثرپذیر بررسی و در ادامه روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش با روش مغناطیسی معرفی شده است. سپس تخمین تنش‌های پسماند با تکنیک مغناطیسی بارکهاوزن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها مورد توجه قرار گرفته و مشخصات اجزای سیستم اندازه‌گیری تنش با این تکنیک ارائه شده است. مشکل عمده این روش تأثیرپذیری نتایج از خواص متالورژیکی و محدودیت استفاده از آن در مورد مواد فرومغناطیسی می‌باشد. این روش مزایایی چون قابلیت حمل و راه‌اندازی در هر مکان صنعتی، سرعت بالا، هزینه پایین و غیرمخرب بودن را دارد.

واژگان کلیدی

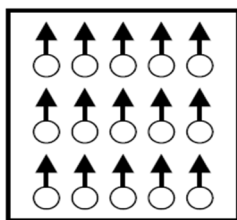
اندازه‌گیری تنش، تکنیک مغناطیسی، بارکهاوزن، تست غیرمخرب

۱. مقدمه

تحت تأثیر قرار دهند. تنش‌های پسماند، تنش‌هایی هستند که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌مانند و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. اکثر فرایندهای ساخت و مونتاژ در قطعه تحت عملیات، عامل ایجاد تنش پسماند هستند. تنش‌های پسماند

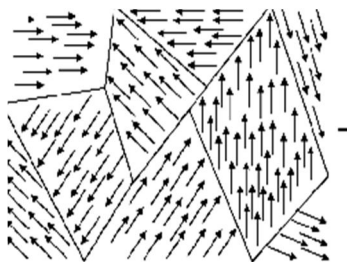
یکی از مهمترین مشکلات فرایندهای تولیدی مثل فرایندهای جوشکاری، ریخته‌گری و شکل‌دهی فلزات، ایجاد تنش‌های پسماند در سازه‌هاست. این تنش‌ها می‌توانند کارکرد سازه را از نظر استحکام در مقابل شکست ترد، خوردگی، خستگی و کمناش

الکتريکی و جريان الکترون ها به نوبه خود گشتاور مغناطیسی خاصی تولید می کند که جهت این گشتاورها با قاعده دست راست به دست می آید. گشتاور مغناطیسی کل اتم، برآیند این دو گشتاور خواهد بود. یک منطقه کوچک از ماده که دارای ویژگی مغناطیسی مشترک باشد حوزه مغناطیسی نامیده می شود. در داخل هر حوزه مغناطیسی در مواد فرومغناطیسی، مطابق نمای شماتیک نمایش داده شده در شکل ۱، بردارهای گشتاور مغناطیسی اتمها، موازی می باشند.



شکل ۱. حوزه مغناطیسی و گشتاورهای مغناطیسی اتمها

حوزه مغناطیسی می تواند بلور، دانه یا بخشی از آن باشد. هر قطعه دارای حوزه های مغناطیسی بیشماری است. در حالت کلی، اتم های مجاور هم در یک بلور، دارای گشتاورهای مغناطیسی هم جهت با اتم های بلور مجاور نیستند و گشتاورهای مغناطیسی در مواد جهت های تصادفی دارند.



شکل ۲. حوزه های مغناطیسی با جهت های مغناطیسی تصادفی

حوزه های مغناطیسی را دیواره های مغناطیسی از هم جدا می کنند. به عبارت دیگر، دیواره مغناطیسی مرز بین حوزه های با جهت های متفاوت هستند. برآیند حوزه های مغناطیسی نسبت به هم دارای زاویه های خاصی می باشند و دیواره های مغناطیسی با زاویه بین امتداد های دو حوزه مشخص می شوند. در شکل ۳ دیواره های مغناطیسی ۱۸۰ درجه نمایش داده شده اند. در داخل مواد فرومغناطیسی حوزه های مغناطیسی با جهت های مغناطیسی تصادفی قرار دارند. هنگام اعمال میدان مغناطیسی به نمونه، می توان اثر آن را به صورت حرکت دیواره های مغناطیسی، چرخش

در ترکیب با بارهای وارده خارجی می تواند سبب از کار افتادگی سازه در بارهایی به مراتب کمتر از بارهای منطقه ایمن طراحی شوند. تنش های پسماند می تواند در بخشی از جسم و در محدوده بزرگ، تنش ماکروسکوپی یا در حالت بسیار موضعی تنش میکروسکوپی ظاهر گردد. به دلیل اهمیت این نوع تنش ها در ترکیب با بارهای خارجی در طراحی و تخمین عمر سازه های مهندسی، تحلیل و شناخت ماهیت این نوع تنش ها از جایگاه ویژه ای برخوردار است [۱].

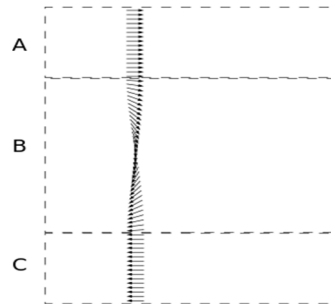
روش های متعددی برای اندازه گیری تجربی تنش وجود دارد که هر یک از این روش ها با ویژگی خاص خود در شرایط مختلفی به کار می رود. از روش های اندازه گیری تنش می توان به روش های اندازه گیری تنش با استفاده از اشعه ایکس، تکنیک اولتراسونیک، روش سوراخ عمیق، روش کرنش سنجی سوراخ و شیار گرد، روش مقطع زنی، روش لایه لایه کردن و روش های مغناطیسی اشاره کرد. روش های مغناطیسی نسبت به روش های دیگر اندازه گیری تنش، دارای مزایایی از جمله سرعت بالا، غیرمخرب بودن، اندازه گیری در محل، گستره وسیع روش های مغناطیسی، قیمت پایین و جز این ها می باشد. خواص مغناطیسی همچنین نسبت به سایر ویژگی های نمونه مورد آزمایش از جمله میکروساختار و سختی نیز حساس می باشد [۲]. با وجود حساسیت بالای این تکنیک به تنش های داخلی، این روش ها پیچیده بوده و در گذشته کمتر مورد توجه قرار بوده است. در ده سال اخیر، پیشرفت های مهمی در فهم اصول فیزیکی این روش انجام شده و این روش به روشی عملی و کاربردی مبدل شده است.

در این مقاله ابتدا تئوری روش بررسی و در ادامه سیستم اندازه گیری تنش با روش مغناطیسی، که به صورت کامل ساخته شده است، معرفی می گردد. طبق بررسی انجام شده با استفاده از این سیستم علاوه بر اندازه گیری مقایسه ای تنش در نمونه ها، می توان از این امکان جهت کنترل کیفیت و مقایسه خواص مکانیکی، متالورژیک یک قطعه با قطعه مرجع نیز استفاد نمود.

۲. حوزه های مغناطیسی

در حالت کلی هر ذره با بار الکتريکی اگر دارای حرکت باشد، میدان مغناطیسی تولید می کند. الکترون به عنوان یک ذره باردار هم دارای حرکت چرخشی در محدوده ابر الکترونی است و هم دارای حرکت دورانی حول محور عبوری از خود. حرکت میدان

دیواره‌های مغناطیسی، جوانه‌زنی دیواره و از بین رفتن دیواره مشاهده کرد. این اثر به علت واکنش دیواره‌های در حال حرکت و وجود عیوب متالورژیک در ماده می‌باشد و میزان بروز این اثر نیز به این عوامل بستگی دارد [۳].



شکل ۳. دیواره‌های مغناطیسی ۱۸۰ درجه

۳. اثر متقابل میدان مغناطیسی خارجی و قطعه

وقتی حوزه‌های مغناطیسی و دیواره‌های آن در اثر میدان اعمالی از خارج تغییر جهت می‌دهند یا حرکت می‌کنند، در اثر تغییر جهت حوزه‌های مغناطیسی، میدان مغناطیسی خاصی تولید می‌شود که ناشی از همین تغییر جهت‌ها خواهد بود. در سال ۱۹۱۸ م، هاینریش بارکهاوزن^۱ پدیده حرکت دیواره‌های مغناطیسی را مطرح کرد. طبق نظر او، این پدیده در داخل مواد فرومغناطیسی و در زمانی که به این مواد میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، اتفاق می‌افتد. امروزه به این میدان‌های مغناطیسی که در مقایسه با میدان اعمالی بسیار محدود هستند، نوفه بارکهاوزن گفته شده و این پدیده با بزرگنمایی نمودار B-H قابل مشاهده می‌باشند.

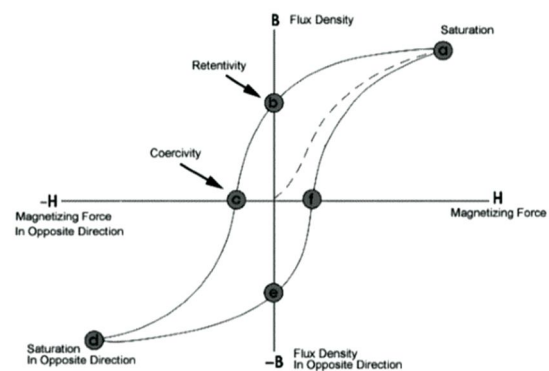
در گذشته تصور می‌شد که نوفه‌های بارکهاوزن بیشتر به علت چرخش دیواره‌های مغناطیسی بود، اما اکنون ثابت شده است که برای تولید نوفه‌های بارکهاوزن، پدیده حرکت دیواره‌های مغناطیسی، به چرخش دیواره‌های مغناطیسی غالب است. امروزه روش‌های مختلفی برای آنالیز و بررسی نوفه‌های بارکهاوزن ارائه شده است. با استفاده از سیستم‌های ثبت سیگنال‌های آنالوگ می‌توان سیگنال‌های بارکهاوزن را به صورت متوسط سیگنال، ریشه مجموع مجذورات سیگنال‌ها، طیف توان، مجموع قله‌های نوفه بارکهاوزن و جز این‌ها مورد بررسی قرار داد [۴]. اولین تحلیل جامع تنش با امواج مغناطیسی توسط هانت^۲ انجام شد. او با استفاده از خاصیت مواد فرومغناطیسی توانست تنش قطعات فرومغناطیسی را تخمین بزند.

قبل از ارائه این روش، اندازه‌گیری تنش به اندازه‌گیری کمیت‌هایی از جمله تغییر در ابعاد فیزیکی با استفاده از کرنش‌سنج‌های مقاومتی خلاصه می‌شد. در روش‌های پیشین به منظور تخمین تنش می‌بایست به نمونه بار اعمال می‌شد تا تغییرات تنش سبب ایجاد تغییرات ابعادی در قطعه شود و این تغییر بعد اندازه گرفته شود. به طور خلاصه در تکنیک مغناطیسی ارائه شده توسط هانت، با اعمال میدان مغناطیسی مشخصی به یک قطعه فولادی، گذردهی مغناطیسی قطعه ثبت می‌گردد. با توجه به اینکه گذردهی مغناطیسی قطعات با داشتن تنش‌های مختلف متفاوت است، با ثبت گذردهی مغناطیسی قطعه‌ای که تحت تنش نیست و یا دارای تنش معلوم است و مقایسه آن با گذردهی مغناطیسی قطعاتی که تنش آنها نامعلوم است، می‌توان تنش موجود را تخمین زد. در این رویه، در مرحله کالیبراسیون مشخصات مغناطیسی سطح بدون تنش بعنوان سطح مرجع شناخته شده و سطوح دیگر نسبت به سطح مرجع مقایسه می‌شوند [۵]. روش مقایسه‌ای تقریباً در همه تکنیک‌های بررسی مغناطیسی مورد استفاده است و تفاوت عمده بین روش‌ها در موضوع مورد بررسی برای مقایسه می‌باشد.

۴. منحنی هیستریزیس

یکی از بارزترین مشخصات مواد فرومغناطیسی و فری مغناطیسی، منحنی مغناطیس شونده‌گی (مغناطیدگی) یا چرخه پسماند است. در این منحنی تغییرات مغناطیدگی جسم \vec{M} (گشتاور مغناطیسی ماده در واحد حجم) برحسب میدان مغناطیسی خارجی \vec{H} رسم می‌شود. در عمل به جای منحنی $\vec{M} - \vec{H}$ منحنی $\vec{B} - \vec{H}$ رسم می‌شود که در آن \vec{B} القای مغناطیسی درون ماده است. دلیل وجود این چرخه ناشی از وجود حوزه‌های مغناطیسی متفاوت و متنوع در این مواد است. در حالت کلی، در شرایط طبیعی، برآیند گشتاورهای مغناطیسی در مواد فرومغناطیسی برابر با صفر است. به عبارت دیگر در مواد فرومغناطیسی، برآیند مغناطیسی یک حوزه صفر نیست، اما مجموع گشتاورهای همه حوزه‌ها صفر است. اگر یک ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی قرار داده شوند و میدان به تدریج افزایش یابد، ابتدا حجم حوزه‌هایی که گشتاور مغناطیسی آنها با میدان هم‌جهت (یا تقریباً هم‌جهت) است، افزایش یافته و با افزایش بیشتر شدت میدان و به تدریج برآیند گشتاور مغناطیسی حوزه‌های دیگر نیز با چرخش خود در جهت میدان قرار می‌گیرد. سرانجام در یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی

گشتاور مغناطیسی تمام حوزه‌ها با میدان مغناطیسی هم‌جهت می‌شوند و کل نمونه به‌صورت یک تک حوزه مغناطیسی درمی‌آید (نقطه a در شکل ۴). حال اگر شدت میدان مغناطیسی خارجی به تدریج کاهش یابد، گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به حالت اولیه خود بازمی‌گردند و در غیاب میدان مغناطیسی، مغناطیدگی ماده صفر نمی‌شود و به عبارتی ماده از خود پسماند مغناطیسی نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۴، در نقطه b ماده دارای پسماند مغناطیسی (B_r) است. همچنین در نقطه c نیروی وادارنده مغناطیسی جسم (H_c) وجود دارد که خاصیت مغناطیسی را در جسم حفظ می‌کند. نیروی وادارنده نیرویی است که مانع از غیرمغناطیسی شدن ماده و به حالت اولیه برگشتن آن می‌شود و برای غیرمغناطیسی شدن ماده باید از مبدا تا H_c به ماده میدان مغناطیسی معکوس وارد شود تا ماده غیرمغناطیسی شود.



شکل ۴. منحنی شماتیک هیستریزس مواد فرومغناطیسی [۳]

در مواد فرومغناطیس نیروی وادارنده مغناطیسی H_c کوچک است؛ به همین دلیل با حذف میدان مغناطیسی خارجی جسم پس از مدت زمان کوتاهی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. آن بخش از منحنی پسماند را که از نقطه a تا c کشیده شده است منحنی وامغناطیدگی جسم نامیده می‌شود. طبق بررسی‌ها شکل منحنی هیستریزس با تغییر پارامترهای زیر تغییر می‌کند:

۱. میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه
۲. فرکانس مغناطیسی کردن نمونه
۳. دمای نمونه
۴. ترکیب شیمیایی ماده
۵. ریزساختار نمونه
۶. تنش‌های اعمالی به نمونه

اعمال تنش باعث تغییر در پارامترهای پسماند مغناطیسی (B_r) و نیروی وادارنده مغناطیسی (H_c) و ویژگی گذردهی ماده خواهد شد. حساسیت نیروی وادارنده مغناطیسی (H_c) به تنش بسیار کمتر از حساسیت آن به فاکتورهای متالورژیک از جمله اندازه دانه یا توزیع کربن است. همچنین نیروی وادارنده مغناطیسی (H_c) به حرکت دیواره‌های مغناطیسی، که موانع از حرکت آنها جلوگیری می‌کنند بستگی دارد. از تأثیرپذیری خواص مغناطیسی ماده از تنش برای تخمین تنش موجود استفاده می‌گردد و تکنیک‌های مختلفی در این باره توسعه پیدا کرده است که برخی از این روش‌ها به شرح زیر می‌باشند [۶]:

۱. تکنیک مغناطیسی مگنتوآکوستیکی^۳
۲. روشی بر پایه گذردهی و ناهمسانگردی مغناطیسی^۴
۳. روش میدان مغناطیسی باقیمانده^۵
۴. روش‌های مگنتوالاستیکی^۶
۵. تکنیک مغناطیسی بارک‌هاوزن^۷

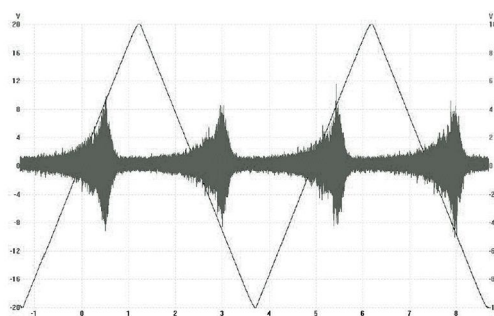
از بین چندین روش اندازه‌گیری مغناطیسی تنش، تکنیک مغناطیسی بارک‌هاوزن دارای کاربرد بیشتری است و روش مورد بحث این مقاله می‌باشد.

۵. نوبه بارک‌هاوزن

وقتی یک میدان مغناطیسی متغیر به نمونه فرومغناطیسی اعمال می‌شود، توسط نمونه میدان مغناطیسی عکس‌العمل تولید و القاء می‌شود که می‌توان برآیند میدان اعمالی ایجادشده را در نمودار هیستریزس قطعه دنبال کرد. در طی چرخه هیستریزس، تغییرات جزئی در مغناطیسی‌شدن، در گام‌های مجزایی انجام می‌شود. زمانی که دیواره‌های مغناطیسی تمایل به حرکت دارند (به علت هم‌جهت شدن حوزه‌های مغناطیسی با میدان خارجی)، بر موانع حرکتی خود غلبه کرده و این گذشتن از موانع سبب ایجاد اثر مغناطیسی پله‌ای در نمونه می‌شود. تغییرات پله‌ای میدان مغناطیسی باعث القای میدان مغناطیسی در کویل دریافت‌کننده، که نزدیک سطح نمونه فرومغناطیس قرار دارد، می‌شود. این ولتاژهای پالسی که شبیه به نوبه هستند، همان نوبه مغناطیسی بارک‌هاوزن یا به گسیل مغناطیسی بارک‌هاوزن می‌باشند که در شکل ۵ نمایش داده شده است. نوبه‌های مغناطیسی بارک‌هاوزن در نمودار هیستریزس وقتی که نمودار 10^5 بار بزرگنمایی می‌شود، قابل مشاهده می‌شوند.

میزان و شدت سیگنال‌های بارک‌هاوزن به خواص ماده از جمله ترکیب شیمیایی، ریزساختار و تنش‌های پسماند بستگی دارد. پالس‌های بارک‌هاوزن تابعی از میدان مغناطیسی‌ای هستند که توسط کوپل دریافت‌کننده دریافت می‌شود. تغییر در مشخصه‌های شکل پروفیل سیگنال بارک‌هاوزن مثل تعداد قله‌ها، ارتفاع قله، زمان قله (مکان افقی قله)، سطح زیر نمودار قله و جز این‌ها نشان‌دهنده تغییر در مشخصه‌های ماده است. مشخصات دیگر سیگنال بارک‌هاوزن مثل مقدار متوسط سیگنال بارک‌هاوزن به خواص ماده بستگی دارند. تغییرات خواص مغناطیسی در ماده که با خواص و مشخصه‌های مکانیکی ماده مرتبط هستند، می‌توانند از طریق بررسی و آنالیز سیگنال بارک‌هاوزن مشاهده شوند. منظور از خواص ماده، خواصی نظیر درصد آلیاژ، اندازه دانه، چگالی و پیکربندی ناهمسانی‌ها، اندازه و حجم فاز ثانویه، تنش‌های اعمالی و تنش‌های پسماند، تاثیر خزش، تاثیر خستگی و جز این‌ها می‌باشد [7]. ریزساختار ماده و بافت کریستالی آن روی خواص مغناطیسی تأثیر می‌گذارد. اگر دانه‌ای از یک نمونه دارای ناهمسانگردی بالای متالورژیک باشد، ناهمسانگردی مغناطیسی هم بالا خواهد بود. اگر اندازه‌گیری تنش در محدوده‌ای است که ناهمسانگردی در آن محدوده بالاست (مثل ورقه که نورد شده، اما بعداً دانه‌بندی آن تغییر نکرده است) باید تأثیر ناشی از این عامل را روی سیگنال بارک‌هاوزن جداسازی کرد. علاوه بر خواص متالورژیک، دما نیز به سه طریق روی اندازه‌گیری تنش در این تکنیک تأثیر می‌گذارد:

۱. ماندگاری و تغییرناپذیری سیستم الکترونیکی
۲. تغییر در خاصیت فرومغناطیسی ماده با توجه به دمای کوری
۳. تغییر در مقاومت الکتریکی نمونه مورد آزمایش

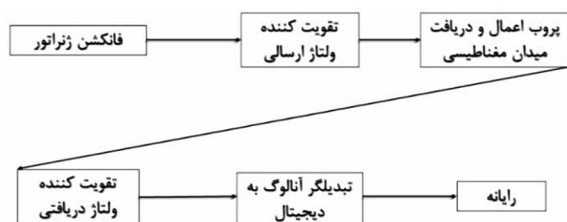


شکل ۵. ولتاژهای پالسی حاصل از سیگنال‌های بارک‌هاوزن و ولتاژ اعمالی به نمونه در چرخه هیستریزس

مغناطیسی‌شدن مواد فرومغناطیسی ابتدا با افزایش دما به صورت آهسته افت می‌کند تا اینکه دما به دمای کوری برسد (۷۷ درجه سانتی‌گراد در آهن). بنابراین زمانی که دما تغییر می‌کند، نفوذ میدان مغناطیسی و پاسخ مغناطیسی قطعه در سطح فولاد تغییر خواهد کرد. در اندازه‌گیری وقتی که دما افزایش می‌یابد، مقاومت الکتریکی و نفوذ میدان افزایش می‌یابد و چگالی شار مغناطیسی در سطح نمونه کاهش می‌یابد. به منظور حذف آثار دما در طی آزمایشات طولانی، معمولاً از نمونه‌های مرجع استفاده می‌شود. نمونه‌های مرجع باید در همان دمایی باشند که نمونه اصلی آزمایش می‌شود. استفاده از نمونه‌های مرجع باعث می‌شود بتوان اثر دما در تغییر پارامترهای فیزیکی را سنجید و در نظر گرفت.

۶. معرفی اجزای سیستم

سیستم اندازه‌گیری نوفه‌های بارک‌هاوزن اصلی شامل یک تولیدکننده تابع جریان می‌باشد که به یک تقویت‌کننده قدرت متصل است. این سیستم قدرت مورد نیاز را تولید کرده و به سیم‌پیچ اعمال‌کننده میدان مغناطیسی منتقل می‌کند. سیم‌پیچ دریافت‌کننده میدان مغناطیسی به یک تقویت‌کننده متصل است تا سیگنال بارک‌هاوزن را تقویت کند. سیگنال بارک‌هاوزن توسط سیم‌پیچ گیرنده دریافت و بعد از تقویت به رایانه ارسال می‌گردد. پارامترهای مختلف سیگنال بارک‌هاوزن از جمله پروفیل سیگنال بارک‌هاوزن ولتاژ کل ریشه مجموع مجذورات و جز این‌ها توسط رایانه محاسبه می‌شوند. چیدمان سیستم اندازه‌گیری بارک‌هاوزن در شکل ۶ نمایش داده شده است. در ادامه بخش‌های مهم این سیستم به صورت کامل‌تری معرفی می‌گردد.



شکل ۶. مراحل اندازه‌گیری به روش MBN

۶-۱. تقویت‌کننده ولتاژ ارسالی

سیگنال‌های تولیدشده توسط دستگاه تولید جریان، دارای سطح ولتاژ پایینی هستند. به منظور افزایش سطح ولتاژ سیگنال‌ها، از

تقویت‌کننده ولتاژ استفاده می‌شود و سیگنال‌ها پس از تقویت‌شدن وارد سیم‌های کوئل اعمال میدان مغناطیسی می‌شوند. در انتخاب جریان، باید قدرت میزان میدان اعمالی به قطعه مینا قرار گیرد و هرچه جریان بالا و فرکانس آن پایین باشد، نفوذ میدان هم بالاتر خواهد بود. رابطه ۱ برای عمق نفوذ میدان اعمالی آورده شده است [۹]:

$$H(z) = H_0 e^{-z\sqrt{\pi\mu_0\mu_r f / \rho}} = H_0 e^{-z/\delta} \quad (1)$$

در رابطه اخیر، $H(z)$ ، شدت میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه در عمق z از قطعه، H_0 شدت میدان شدت میدان مغناطیسی اعمالی به قطعه در سطح قطعه، z عمق قطعه، μ_0 و μ_r به ترتیب ضریب گذردهی مغناطیسی در خلأ و ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی قطعه، f فرکانس سیگنال الکتریکی گذرنده از سیم‌پیچ‌های تولیدکننده میدان مغناطیسی و ρ مقاومت الکتریکی ویژه قطعه است. در روش بارک‌هاوزن، یک پروب الکترومغناطیسی برای ایجاد و اعمال میدان مغناطیسی و بخشی برای دریافت سیگنال‌های بارک‌هاوزن از نمونه به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، پروب می‌تواند به صورت U طراحی شده و دارای دو سیم‌پیچ می‌باشد که هسته‌های آنها از نوع فولاد الکتریکی ورق شکل می‌باشد.



شکل ۷. شکل پروب فرستنده و گیرنده ساخته شده

در شکل ۷ ورق‌های فولاد الکتریکی در کنار هم قرار گرفته‌اند و سازه پروب ایجاد شده است. سیم‌های نازک به دور دو قرقره پیچیده و سپس قرقره‌ها روی هسته‌های مغناطیسی سوار شده‌اند. این دو سیم‌پیچ مغناطیسی می‌توانند به منظور اعمال میدان مغناطیسی به قطعه مورد استفاد قرارگیرند. دریافت سیگنال خروجی را می‌توان با استفاده از کوئلی که هسته آن فریتی است، انجام داد. به منظور بالا بردن حساسیت اندازه‌گیری، هسته فریتی

باید در تماس کامل با نمونه مورد نظر باشد. به این ترتیب، برای هر نمونه‌ای با شکلی خاص، پروبی طراحی و ساخته می‌شود که بهترین تماس را با سطح آن داشته باشد. در این طرح، به منظور دریافت میدان مغناطیسی القایی از سوی قطعه، سیم‌پیچ به دور قرقره سومی پیچیده شده و به پروب U شکل اتصال داده شده است. با استفاده از هسته‌های مغناطیسی، نفوذ میدان مغناطیسی به نمونه به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. تعداد دور سیم‌پیچ و جریان عبوری در پروب الکترومغناطیسی، بستگی به حداکثر قدرت میدان تولید شده دارد. لازم است تعداد دور سیم‌پیچ و جریان عبوری، به صورت مناسبی انتخاب شود. تعداد دور زیاد و جریان بالا در سیم‌پیچ میدان قوی‌تری تولید می‌کند و مقدار اشباع در منحنی هیستریزس بالا می‌رود، اما از طرفی نیروی الکترومغناطیسی بزرگی تولید می‌شود که با میدان اعمالی به نمونه، به خصوص در فرکانس‌های بالا، مخالفت می‌کند. میدان مغناطیسی پر قدرت با نفوذ بالا فقط در فرکانس کم اتفاق می‌افتد. همچنین تعداد دورهای سیم‌پیچ در کوئل دریافت‌کننده سیگنال بارک‌هاوزن در حساسیت و فرکانس پاسخ تأثیر دارد. افزایش تعداد دور سیم‌پیچ‌ها سبب افزایش حساسیت سیستم به تغییرات تنش می‌شود. اگر تعداد دور خیلی کم باشد، دریافت سیگنال بارک‌هاوزن از عمق‌های زیاد امکان‌پذیر نیست. در برخی موارد در روش بارک‌هاوزن فرکانس بالا از فرکانس بالا برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود (فرکانس بالاتر از ۵۰ هرتز). به این ترتیب نرخ مغناطیسی‌شدن در نمونه و در نهایت اندازه ولتاژ اعمالی در کوئل دریافت‌کننده بالاست. همچنین فرکانس سیگنال بارک‌هاوزن، که با فرکانس سیگنال اعمالی رابطه مستقیم دارد، بالا خواهد بود. بنابراین سیگنال بارک‌هاوزن که فرکانس پایینی دارد، به راحتی با کوئل با تعداد دور کم قابل آشکارسازی است. اکثر سیگنال‌های بارک‌هاوزن تولیدشده در نمونه‌ها در محدوده فرکانس پایین (زیر ۵۰ کیلوهرتز) هستند، به همین دلیل اکثر کوئل‌های دریافت‌کننده باید فرکانس پایین باشند و تعداد دورهای زیادی داشته باشند. همچنین برای دریافت سیگنال‌های بارک‌هاوزن از عمق‌های زیاد باید از تعداد دورهای بالا استفاده کرد. در نتیجه کوئل دریافت‌کننده فرکانس پایین از کوئل دریافت‌کننده فرکانس بالا بزرگتر خواهد بود. با استفاده از سیم‌های مسی نازک می‌توان کوئل‌های دور بالا با اندازه کوچک ساخت که حساسیت آنها بالا باشد. پروب با استفاده از سیم‌هایی

دریافتی از نمونه و جز این‌ها تأثیر می‌پذیرد. تاکنون هیچ روشی برای تعیین عمق اندازه‌گیری و اندازه‌گیری تغییرات تنش در عمق مورد نظر ارائه نشده و پژوهش‌ها اغلب به صورت تجربی و مقایسه‌ای می‌باشند [۱۰-۱۱].

۷. نتیجه‌گیری

روش‌های مغناطیسی ارائه‌دهنده رویکردی عملی نسبت به اندازه‌گیری در محل قطعات صنعتی هستند که در روش‌های معمول در دسترس نیست. تکنیک مغناطیسی بارک‌هاوزن روشی سریع و ارزان است که اندازه‌گیری تنش را به صورت غیرمخرب امکان‌پذیر می‌سازد. در این روش از اثر تنش‌های داخلی بر پدیده مگنتواستریکشن استفاده می‌شود. دو ویژگی مهم مواد روی شدت سیگنال بارک‌هاوزن تأثیر می‌گذارند. حضور و توزیع تنش الاستیک و ریزساختار روی انتخاب جهت دامنه‌های مغناطیسی و دومین روی سیگنال‌های بارک‌هاوزن تأثیر می‌گذارد. تأثیر ریزساختار روی سیگنال‌ها با کالیبراسیون قابل جبران است [۱۲]. با توجه به تأثیرپذیری سطح ولتاژ نوفه‌های بارک‌هاوزن از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی قطعه و با توجه به اینکه توزیع تنش‌های پسماند، توزیع سختی و ریزساختار قطعات تولیدی از پارامترهای کنترل کیفیت محصول می‌باشد، با این روش می‌توان مقایسه کمی و کیفی بین تعدادی قطعه و یک مرجع را به‌سادگی با انجام کالیبراسیون تشریح شده اجرا کرد [۱۳-۱۴].

به تقویت‌کننده ولتاژ ارسالی و تقویت‌کننده ولتاژ دریافتی وصل شده است. سیگنال‌های بارک‌هاوزن دریافت‌شده بسیار ضعیف هستند و قابلیت خوانده‌شدن و آنالیزشدن را ندارند و لازم است به منظور افزایش سطح ولتاژ این سیگنال‌ها، تقویت‌کننده ولتاژ در مدار قرار داده شود. سیگنال‌های بارک‌هاوزن بعد از تقویت‌کننده وارد بخش مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شوند و پس از تبدیل به صورت دیجیتال از طریق پورت USB به رایانه ارسال می‌شوند. سیگنال‌های بارک‌هاوزن که به صورت اطلاعات دیجیتال درآمده‌اند، با استفاده از نرم‌افزار لب ویو^۸ از طریق پورت سریال فراخوانی و ذخیره و پردازش می‌شوند.

۶-۲. عمق اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری

فرکانس تولیدی میدان مغناطیسی اعمالی تأثیر زیادی بر نفوذ میدان در قطعه دارد. در سیستم بارک‌هاوزن با فرکانس‌های بالا، قدرت میدان مغناطیسی تولیدشده کم است، به همین دلیل اندازه پروب را می‌توان کوچک انتخاب کرد. دقت در اندازه‌گیری بارک‌هاوزن به اندازه پراب نیز بستگی دارد. در حالتی که فرکانس ولتاژ اعمالی بالاست، اندازه پراب الکترومغناطیسی هم نسبت به حالت فرکانس پایین کوچک و عمق اندازه‌گیری کم است. مطالعات نشان می‌دهد که سیگنال بارک‌هاوزن از موارد دیگری از جمله فرکانس تحریک میدان اعمالی به نمونه، اندازه و شکل نمونه، نوع و شکل پراب الکترومغناطیسی، حساسیت کویل مغناطیسی دریافت‌کننده، انتخاب گستره فرکانسی سیگنال

۸. مأخذ

- [6] D. C. Jiles, Review of magnetic methods for nondestructive evaluation, *NDT International*, Vol. 21, No. 5, pp. 311-319, 2013.
- [7] C. Jagadish, L. Clapham, D. L. Atherton, Effect of bias field and stress on Barkhausen noise in pipeline steels, *NDT International*, Vol. 22, No. 5, pp. 297-301, 1989.
- [8] P. Wang, G. Yunlai, Experimental studies and new feature extractions of MBN for stress measurement on rail tracks, *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 49, No. 8, pp. 4858-4864, 2013.
- [9] Y. Gao, R. Wang, Device for Measuring Residual Stress in Ferromagnetic Materials on Magnetic

- [۱] ا. بحرانی، تئوری تنش پسماند و تاثیرات آن بر فرایندهای صنعتی، مجله مهندسی مکانیک، س. ۱۴، ش. ۴۵، ص. ۶۸-۷۱، اسفند ۱۳۸۴.
- [2] J. Davids, *Determination of Residual Stresses by Magnetic Methods*, HMSO, London, 1981.
- [3] A. Hubert, R. Schafer, *Magnetic Domains*, Springer, pp. 201-212, 2009.
- [4] S. Takahashi, H. Kikuchi, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (X)*, IOS Press, pp. 4-7, 2009.
- [5] D. Hunt, Measurement of stress, US Patent No. 2370845, 1945.

Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, Issue 3, pp. 118-127, 2008.

- [13] C. J. Marcelo, T. C. Chuvas, Characterization of Residual Stresses and Microstructural by Technique of Magnetic Barkhausen Noise of API 5L X80 Steel Heat Treatment, *Materials Science Forum*, Volume 869, pp. 556-561, 2016.
- [14] K. Tugçe, H. Gur, Non-Destructive Determination of Residual Stresses in the Spiral Submerged Arc Welded Steel Pipes, *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, pp. 1-6, 2016.

Method, *Proceedings of the Industrial Electronics and Applications Conference*, pp. 377-381, 2009.

- [10] Y. Masuda, M. Mizutani, Barkhausen noise inspection apparatus and inspection method, US Patent No. 20110199081, 2011.
- [11] Anderoglu, O., Residual stress measurement using X-Ray diffraction, M.S. Thesis, University of Texas A&M, Texas. 2004.
- [12] P. J. Withers, M. Turski L. Edwards, P. J. Bouchard, D. J. Buttle, Recent advances in residual stress measurement, *International*

بی نوشت

-
1. Heinrich Georg Barkhausen (1881–1956)
 2. Davis Hunt
 3. magnetoacoustic emission
 4. magnetic anisotropy and permeability system
 5. residual magnetic field
 6. magnetoelastic methods
 7. magnetic Barkhausen noise
 8. LabVIEW