

ششمین کنفرانس

تجهیزات دوار در صنایع نفت و نیرو

Rotating
Equipment 2015
conference

6th Conference on
Rotating Equipment in Oil & Power Industries



کواهی ارائه مقاله

شماره کواهی: ۶۸۰۰۱۷

بدینوسیله کواهی می شود مقاله

مربری قابلیت اطمینان و حساسیت آزمون غیرمخرب ذرات منطایی در کشف عیوب سطحی قطعات جوشی

نویسنده اول: ابوالفضل ذوالفقاری، نویسنده دوم: فرهاد کلاغان، نویسنده سوم: اسدالله ساجدی امین

در بخش ارائه پوستر ششمین کنفرانس تجهیزات دوار در صنایع نفت و نیرو مورخ ۳۰ دی ۱۳۹۳ پذیرفته شده است.

موفقیت روز افزون شمارا در عرصه های علمی و اجرایی کشور عزیزمان آرزو مندیم.

کوروش حمیدی

دیر اجرایی کنفرانس

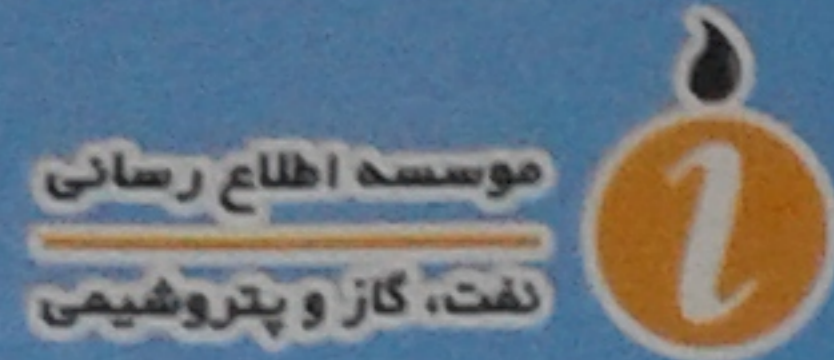


حسن رحیم زاده

دیر علمی کنفرانس



۳۰ دی و ۱ بهمن ۱۳۹۳
مرکز همایش های بین المللی شهید بهشتی، تهران
20-21 Jan., 2015
Beheshti Intl. Conference Center, Tehran, Iran



موسسه اطلاع رسانی
نفت، گاز و پتروشیمی

بررسی قابلیت اطمینان و حساسیت آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی در کشف عیوب سطحی قطعات جوشی

ارائه دهنده: ابوالفضل ذوالفقاری

ابوالفضل ذوالفقاری ، فرهاد کلاهان ، اسداله ساجدی امین

گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله ایمیل مسئول مقاله (ab.zolfaghari@stu-mail.um.ac.ir)

چکیده

امروزه آزمون‌های غیرمخرب به طور وسیعی در صنایع به منظور تشخیص نقص در قطعات بدون تخریب و تأثیر بر کارایی آنها به کار گرفته می‌شود که تشخیص درست عیوب سبب اجرای بهتر فرآیند تعمیرات آنها می‌شود. از جمله مهم‌ترین این آزمون‌ها می‌توان به آزمون ذرات مغناطیسی اشاره کرد. در این روش از ذراتی که قابلیت مغناطیس شدن دارند در حضور میدان مغناطیسی به منظور کشف عیوب سطحی و زیرسطحی قطعات استفاده می‌شود. اساس این آزمون بر بهره‌گیری از تغییرات موضعی ایجاد شده در گذردهی مغناطیسی در اثر وجود عیوب نسبت به مناطق سالم است. از خصوصیات مهم هر آزمون غیرمخرب که می‌تواند بر انتخاب درست آزمون و همچنین به کارگیری درست نتایج حاصل از آزمون تأثیر قابل توجهی داشته باشد حساسیت و قابلیت اطمینان آن در تشخیص عیوب است. در این مقاله تلاش شده است قابلیت اطمینان و حساسیت این آزمون در شناسایی عیوب سطحی اتصالات جوشی به کمک تعدادی آزمون و تحلیل آماری نتایج حاصل شده بدست آید.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، ذرات مغناطیسی، احتمال کشف، حساسیت، جوشکاری

^۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳- مدرس آزمون‌های غیرمخرب مراکز آموزش فنی حرفه‌ای مشهد

Reliability and sensitivity evaluation of magnetic particles nondestructive testing in surface defect detection for welded components

Paper Presenter: Abolfazl Zolfaghari

Abolfazl Zolfaghari¹, FarhadKolahan², AsadolahSajedi Amin³

Department of Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,
Iran

Corresponding Email : kolahan@um.ac.ir

Abstract

Nowadays, Nondestructive testing is widely used for defect detection in components without any effects on the performance which correct revealing will caused to better operation of the repair procedure. One of well-known the methodsis magnetic particlestesting (MT). In this the technique, ferromagnetic particles in the presence of magnetic field is used to find surface and subsurface flaws of components. It is based on differences transmission magnetic flux between flawed locations and non-flawed regions. Reliability and sensitivity are two parameters of a nondestructive testing which have a big impact on proper selection of the technique and using the obtained results. In this paper, it has been attempted to obtained reliability and sensitivity ofthis technique in surface defect detection of welded components by conducting some experiments and statistical analysis of the results.

Key Words: Nondestructive testing, Magnetic particles, Probability of detection, sensitivity, Welding

¹Msc Student of Mechanical engineering department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

²Associate Professor of Mechanical engineering department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

³Trainer of nondestructive testing courses in Fani-Herfeyi Centers of Mashhad.

مقدمه

آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی خصوصیات ویژه ای در تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی قطعات فرومغناطیس از جمله هزینه پایین، امکان اجرا توسط آزمونگر نیمه ماهر، عدم نیاز به دستگاه‌های پیچیده و اقدامات احتیاطی دارد. به دلیل همین ویژگی‌ها، در فرآیندهای تولید، نگهداری و تعمیرات قطعات مورد استفاده در صنایع گوناگون از جمله نیروگاهی، نفت و گاز کاربردهای گسترده‌ای یافته است. (راج، جایاکومار، تاواسیموتو، ۲۰۰۷). این آزمون به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که انتخاب نحوه اجرای آن به عوامل مختلفی بستگی دارد. مهم‌ترین آنها جنس، هندسه و شرایط فیزیکی قطعات است. نیازمندی‌های بازرسی و شرایط سطحی قطعه را می‌توان از دیگر عوامل موثر در انتخاب روش اجرا دانست. (میکس ۲۰۰۵).

یکی از معیارهای مناسب به منظور ارزیابی و انتخاب آزمون‌های غیرمخرب در تعیین مشخصات عیوب با ویژگی‌های مختلف، میزان قابلیت اعتماد به نتایج حاصل از آنهاست. معیار مذکور به شکل احتمال تشخیص عیب بیان می‌گردد و نشان دهنده نسبتی از عیوب است که آزمون قادر بوده است آنها را تشخیص دهد. بالاتر بودن احتمال تشخیص برای یک آزمون نشان دهنده بالاتر بودن اعتبار نتایج آن و در نتیجه بیشتر بودن قابلیت اعتماد آن است. (شاکری، ۱۳۸۵؛ مصلی، ۱۳۸۶). علاوه بر انتخاب آزمون مناسب، تعیین احتمال تشخیص عیب آزمون‌های غیرمخرب به صورت کمی، از اهمیت فراوانی در تعیین توالی مناسب دوره‌های تعمیر و نگهداری قطعات، تخمین عمر باقی مانده قطعات و افزایش ایمنی آنها در برابر شکست به خصوص در بارگذاری‌های خستگی برخوردار است. (تنگ، هیو، آنتونیو ۲۰۰۵) به همین دلیل موسسات و مراکز تحقیقات خصوصی و دولتی گوناگون سعی کرده‌اند تا با اجرای پروژه‌های فراوان، قابلیت اطمینان آزمون‌های غیرمخرب را برای موارد مورد نیاز تعیین کنند. از نمونه این مراکز می‌توان به NTIAC¹ اشاره کرد. این مرکز با اجرای تحقیقاتی در زمینه قابلیت اطمینان آزمون‌های غیرمخرب، کتابی مرجع شامل بیش از ۴۰۰ نمودار احتمال کشف آزمون‌های غیرمخرب رایج را برای مواردی محدود ارائه داده است. (رومل و مارتزکانین ۱۹۹۷)

از محققینی که در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان آزمون‌های غیرمخرب تحقیقاتی داشته‌اند می‌توان به (کاروالهو، ربلو، سیلوا، سگریلو، ۲۰۰۶) اشاره کرد. آنان به ارزیابی قابلیت اطمینان آزمون فراصوتی در تشخیص عیوب عدم ذوب^۲ و عدم نفوذ جوش^۳ برای لوله‌های جوشکاری

¹ Nondestructive Testing Information Analysis Center

² Lack of fusion (LOF)

³ Lack of Penetration (LOP)

شده پرداختند. آزمون فراصوتی به دو روش دستی و خودکار انجام گرفت. روش دستی به وسیله ۵ اپراتور که از تکنیک پالس-اکو استفاده می‌کردند اجرا شد، در حالی که در روش خودکار تکنیک زمان پرواز پراش^۱ (ToFD) مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس یافته‌های آنان، وابستگی قابلیت اطمینان آزمون به عوامل انسانی در روش دستی بسیار پررنگ تر بود. علاوه بر این، در حالی که احتمال کشف این دو دسته از عیوب برای آزمون دستی به ترتیب ۶۳٪ و ۷۷٪ است، برای روش اتوماتیک ۱۰۰٪ به دست آمده است. در ادامه به چند نمونه از تحقیقاتی که در سالیان اخیر در این زمینه انجام شده اشاره می‌شود. مروری اجمالی بر مهم‌ترین تحقیقاتی که در زمینه احتمال کشف آزمون ذرات مغناطیسی برای شرایط و مواد مختلف انجام شده اند توسط (بورک و دیتچبرن ۲۰۱۳) انجام شده است.

(لیولی و الجوندی ۲۰۰۳) به محاسبه احتمال کشف عیوب ناشی از خستگی در سیکل کم (low cycle fatigue flaw) در پانل‌هایی از جنس اینکونل ۷۱۸ توسط آزمون مایع نافذ فلورسنتی پرداختند. طبق نتایج آزمایشات آنان، مایع نافذ فلورسنتی فوق حساس قادر است عیوبی با اندازه بزرگتر از ۰.۰۹ اینچ را با احتمال کشف ۹۰ درصد با در نظر گرفتن محدوده اطمینان ۹۵ درصد تشخیص دهد. ارزیابی قابلیت اطمینان آزمون‌های مایع نافذ فلورسنتی و جریان گردابی در کشف عیوب خستگی دیسک‌های کمپرسور نیز انجام گرفته است. (سیمسیر و آنکارا، ۲۰۰۷) آنان دریافته‌اند که آزمون جریان گردابی از احتمال کشف و حساسیت بالاتری نسبت به آزمون مایع نافذ فلورسنتی در این مورد برخوردار است. (ناس، بالاسوبرامانیان، کریشناامورسی، نارایانا، ۲۰۱۰) به ارزیابی قابلیت اطمینان آزمون غیرمخرب فراصوتی به روش زمان پرواز پراش پرداختند و در ادامه منحنی‌های احتمال کشف^۲ (POD) مربوط به این آزمونه صورت آزمایشگاهی بدست آوردند. در پایان، اثر زاویه انتشار امواج از پراب و فاصله دو پراب از یکدیگر بر منحنی POD را مورد ارزیابی قرار دادند. (علی، بالینت، تمپل، لیورز، ۲۰۱۲) نیز روشی جدید به منظور تعیین قابلیت اطمینان در تفسیر عیوب تشخیص داده شده توسط آزمون غیرمخرب فراصوتی به روش دستیارانه دادند.

در زمینه تعیین قابلیت اطمینان آزمون‌های غیرمخرب، به دلیل گستردگی روش‌ها و مواد، علی‌رغم تحقیقاتی که تا کنون انجام گرفته است، این تحقیقات همچنان ادامه دارند. یکی از این موارد، آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی در تعیین عیوب سطحی اتصالات جوش کاری شده فولادی است که علی‌رغم اهمیت فراوان موضوع، تحقیقات جامعی در این زمینه انجام نگرفته است. در این مقاله، قابلیت اطمینان و حساسیت

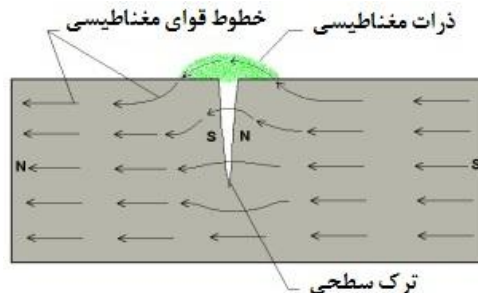
¹Time of Flight Diffraction

²Probability of Detection

آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی به روش استفاده از یوک (Yoke) در تعیین عیوب سطحی اتصالات جوشی قطعاتی از جنس فولاد CK45، به صورت کمی بدست آمده و مورد بررسی قرار گرفته است. از بسته نرم افزاری mh 1823 (انیس، ۲۰۱۳) که تحت نرم افزار تحلیل آماری Rنوشته شده و مختص تعیین قابلیت اطمینان آزمون های غیرمخرب است، به منظور تحلیل داده های حاصل از آزمایش و ترسیم نمودار قابلیت اطمینان این آزمون بر حسب طول عیب استفاده شده است. بر اساس تحلیل داده های بدست آمده از آزمایشات، برای اندازه عیوب در بازه ۰.۵ تا ۵ میلی متر، در حالی که حداکثر طول عیب از دست رفته ۲.۵ میلی متر است، کوچکترین عیب کشف شده ۱.۶ میلی متر است. این آزمون توانایی تشخیص عیوب با اندازه ۲.۵۹ میلی متر را با احتمال ۹۰ درصد دارد. این اندازه برای احتمال تشخیص ۵۰ درصد برابر ۱.۹۴ میلی متر خواهد بود.

آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی

بازرسی به روش مغناطیسی کردن ذرات به عنوان روشی جهت تشخیص عیوب سطحی و برخی عیوب زیر سطحی در مواد فرومغناطیس به کار گرفته می شود. اساس این روش بر ایجاد نشتی میدان قوی مغناطیسی در سطح و بالای قطعه توسط عیوب در قطعه فرومغناطیس مغناطیده شده است که سبب تراکم ذرات مغناطیسی در آن محل می شود. تجمع آنها محل، اندازه و شکل ناپیوستگی را تعیین می کند. (ریاحی و فرجی، ۱۳۸۴) بهتر است توجه داشت که آن دسته از ناپیوستگی های مغناطیسی که (تقریبا) عمود بر جهت میدان باشند، توانایی تولید نشتی بالا و در نتیجه قابلیت مشاهده توسط تجمع ذرات را دارند. هر چه اندازه زاویه بین راستای عیوب و میدان کاهش یابد از وضوح نشانه های ظاهر شده بواسطه تجمع ذرات کاسته می شود. ذرات مغناطیسی می توانند به صورت ذرات خشک و یا تر معلق در مایع باشند که بر سطح قطعه اعمال شوند. خاصیت مغناطیسی در قطعه را می توان به وسیله آهنربای دائم، آهنربای الکتریکی یا با گذراندن جریان قوی از درون یا پیرامون آن القا کرد. شکل ۱ این موضوع را نشان می دهد که نشتی میدان سبب تمرکز ذرات در ناپیوستگی ها می شود.



شکل - نشت میدان حاصل از ناپیوستگی و تجمع ذرات (هنرور)

- روش اجرای آزمون ذرات مغناطیسی شامل مراحل زیر است:
 - آماده سازی سطح: اگر چه اثرات مغناطیسی از مواد غیرمغناطیس عبور می کند ولی آلودگی هایی مثل روغن مانع حرکت ذرات می شوند و یا پوسته و زنگ زدگی نشانه های گمراه کننده ایجاد می کنند، به همین دلیل، نیاز به از بین بردن آنها از روی سطح قطعات است. وقتی سطح به طور کامل تمیز و دارای صافی قابل قبولی باشد، بهترین نتایج حاصل خواهند شد. استفاده از ذرات مغناطیسی به صورت تر به دلیل آن که مایع حامل ذرات معمولا از مواد حلال پایه نفتی است می تواند به عنوان تمیزکننده نیز عمل نماید.
 - مغناطیس کردن قطعه: قطعه توسط میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله جریان الکتریکی یا مغناطیس دائمی به صورت طولی یا حلقوی مغناطیسی می شود.
 - اعمال ذرات مغناطیسی: ذرات در انواع، اندازه ها و رنگ های مختلفی موجود می باشند. این مواد تقریبا از هر ماده فرومغناطیسی می توانند ساخته شوند. مهم ترین ویژگی این ذرات، داشتن تراوش مغناطیسی بالاست. این خاصیت سبب می شود که به راحتی تحت تاثیر میدان های مغناطیسی، دارای خاصیت مغناطیسی شوند. این ذرات می توانند به دو صورت تر و یا خشک بر روی سطح قطعه مورد نظر اعمال گردند. معمولا قبل از اعمال ذرات مغناطیسی به سطح به دلیل ایجاد تمایز رنگ کافی بین زمینه و رنگ ذرات پودر محل بازرسی به وسیله پوششی سفید رنگ پوشش داده می شود. این امر سبب شناسایی آسان تر عیوب و در نتیجه افزایش دقت بازرسی می شود.



شکل - نشانه های ظاهر شده بر روی قطعه در آزمون ذرات مغناطیسی

- انجام بازرسی: در صورت وجود عیوب سطحی یا زیر سطحی، این گونه عیوب توسط الگوهایی که از خود بر سطح قطعه توسط ذرات مغناطیسی بر جای می‌گذارند قابل تشخیص خواهند بود. نمونه ای از نشانه های ظاهر شده در شکل ۲ نشان داده شده است.
- مغناطیس زدایی: میزان مغناطیس به جای مانده پس از بازرسی به وسیله ذرات مغناطیسی در مواد فرومغناطیس به مشخصه های فیزیکی آنها بستگی دارد. غالباً لازم است که قطعه را پس از بازرسی با ذرات مغناطیسی، مغناطیس زدایی کرد که چندین دلیل برای این کار وجود دارد. ممکن است از قطعه در محلی استفاده شود که میدان مغناطیسی باقیمانده در عملکرد آن قطعه و یا در دقت ابزار اندازه گیری حساس در مقابل میدان های مغناطیسی، اختلال ایجاد کند. دلیل دیگر امکان جذب ذرات ساینده به قطعات همچون سطح یاتاقان، شیار بلبرینگ ها و چرخ دنده هاست که سبب تسریع در ساییدگی قطعه می‌شوند. همچنین اگر قطعه مغناطیس شده ماشین کاری شود، براده ها ممکن است به سطح ماشین کاری شده بچسبند و اثر نامطلوبی بر صافی سطح، اندازه ها و عمر ابزار بگذارند و یا در حین هر نوع عملیات جوش قوس الکتریکی بعدی، پسماند مغناطیسی موجود سبب انحراف مسیر قوس و در نتیجه کاهش کیفیت و حتی ایجاد عیوب در آن گردد.
- تمیز کردن قطعه: قطعات باید به طور کامل تمیز شوند تا اطمینان حاصل شود که هیچ ذره مغناطیسی باقی نمانده است. در اغلب این موارد این کار توسط شستشو با حلال مناسب انجام می‌شود. بعد از این کار، رنگ و پوشش های سطحی باید دوباره اعمال شوند و برای جلوگیری از خوردگی، قطعه باید روغن کاری شده و یا تحت فرآیندهایی خاص قرار گیرد.

تحلیل آماری داده های آزمون های غیرمخرب

ماهیت آزمون های غیرمخرب به گونه ای است که با اندکی انحراف همواره همراه است به همین دلیل بهترین راه کاری که برای توصیف نتایج آنها پیشنهاد شده است احتمال کشف (POD) و حساسیت است. احتمال کشف به قابلیت اطمینان نیز معروف است و مشخص کننده آن است که آزمون با چه احتمالی می تواند عیبی را در قطعه یابی شناسایی کند و اغلب به صورت منحنی بر حسب طول عیب ترسیم می شود. حساسیت نیز قابلیت تشخیص عیوب است و نشان دهنده آن است که آزمون توانسته عیوبی تا چه حد کوچک را تشخیص دهد و یا بزرگترین عیبی که آزمون آن را از دست داده است چه اندازه ای داشته است.

رایج ترین شیوه ترسیم منحنی POD توسط یک بار آزمون برای هر عیب است. در این روش چندین قطعه که شامل محدوده ای از طول عیب هاست یک بار آزموده می شوند و حد بالا و پایین اندازه عیوبی که مورد نظر است به تعدادی بازه تقسیم می شود و احتمال تشخیص برای هر زیر بازه با مشخص بودن تعداد عیوب کشف شده و از دست رفته تعیین می شود. در پایان، نتایج به منظور تعیین منحنی POD به صورت تابعی از طول عیب با در نظر گرفتن محدود اطمینان به کار گرفته می شوند. باید توجه داشت که به دلیل آن که داده ها به صورت گسسته جمع آوری می شوند به منظور تولید یک منحنی پیوسته باید برون یابی شوند. از میان توابع توزیع گوناگونی که به منظور تقریب زدن منحنی POD پیشنهاد شده اند، توزیع log-logistic به عنوان یکی از مناسب ترین توابع پیشنهاد شده است. فرم تابعی این توزیع در زیر آمده است:

$$P_i = \frac{\exp(S_0 + S_1 \ln(r_i))}{1 + \exp(S_0 + S_1 \ln(r_i))} \quad (1)$$

در این رابطه، P_i احتمال تشخیص، r_i طول عیب، S_1 پارامتر مکان و S_0 پارامتر شیب هستند. (برن و هوی ۱۹۸۳)

آماده سازی قطعات و اجرای آزمون

به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان و حساسیت آزمون غیرمخرب ذرات مغناطیسی، تعداد ۲۰ نمونه اتصال جوشی از فولاد CK45 ایجاد گردید. این فولاد جزو فولادهای با کربن متوسط محسوب می شود که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. اتصالات مذکور توسط فرآیند جوشکاری (MAG (Metal Active Gas با تغییر در متغیرهای کنترلی فرآیند ایجاد گردیدند. خصوصیات هندسی اتصال و فرآیند جوشکاری در جدول ۲ آمده است.

- مشخصات ترکیب شیمیایی فلز پایه و الکتروود

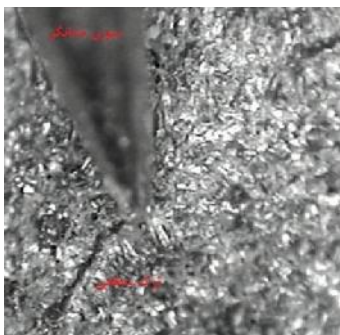
ماده	%Cr	%S	%P	%Mn	%Si	%C
------	-----	----	----	-----	-----	----

۰.۴۶	۰.۴	۰.۷	۰.۰۳۵	۰.۰۳۵	۰.۳	فولاد با کربن متوسط (CK45)
------	-----	-----	-------	-------	-----	----------------------------

- مشخصات هندسی اتصال و فرآیند جوشکاری

آب - هوا	محیط خنک کننده	۱۰۰	طول خط جوش (mm)	۶	ضخامت قطعه (mm)
۸ و ۶ و ۱۰	نرخ تغذیه الکتروود (m/min)	۲۰	فاصله مشعل تا قطعه کار (mm)	۱	ضخامت الکتروود (mm)
۲۹۰ و ۱۴۵	سرعت جوشکاری (cm/min)	۳۰-۲۰	ولتاژ (V)	-۱۲ ۳۰	شدت جریان (A)

پس از پاک سازی سطح کلیه قطعات توسط برس سیمی، به منظور از بین بردن اکسید ها و ذرات چربی سطح جوش و اطراف آن از محلول ویژه این کار که به صورت اسپری توسط شرکت Magnaflux تولید می شود، استفاده شد. نام این محصول (SKC-S Cleaner/Remover) است که برای پاک سازی سطوح قبل از اجرای آزمون مایع نافذ بهره گرفته می شود. سپس سطح آنها توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 50x عکس برداری و به دقت مورد بررسی قرار گرفتند تا تعداد و طول عیوب سطحی ایجاد شده در سطح جوش و اطراف آن مورد ارزیابی قرار گیرند. شکل ۵ نمونه ای از این گونه تصاویر را نشان می دهد.



شکل - تصویر ماکروسکوپی گرفته شده از سطح جوش نشان دهنده عیب سطحی

برای اجرای آزمون ذرات مغناطیسی، سطح جوش و اطراف آن توسط پوشش سفید رنگ (ARDROX(8901 که از تولیدات شرکت Chemetall می باشد، پوشش داده شد. پس از خشک شدن پوشش، به کمک یوک PICO-MAGMY-100 که از محصولات شرکت NAWOO، میدان مغناطیسی بر سطح قطعه ایجاد گردید. ذرات مغناطیسی به صورت اسپری (ARDROX(800/3 ساخت شرکت Chemetall به سطح اعمال گردید. در این آزمون به دلیل آن که هدف تنها ارزیابی آزمون از لحاظ توانایی کشف عیوب سطحی است از جریان متناوب (AC) بهره گرفته شد.

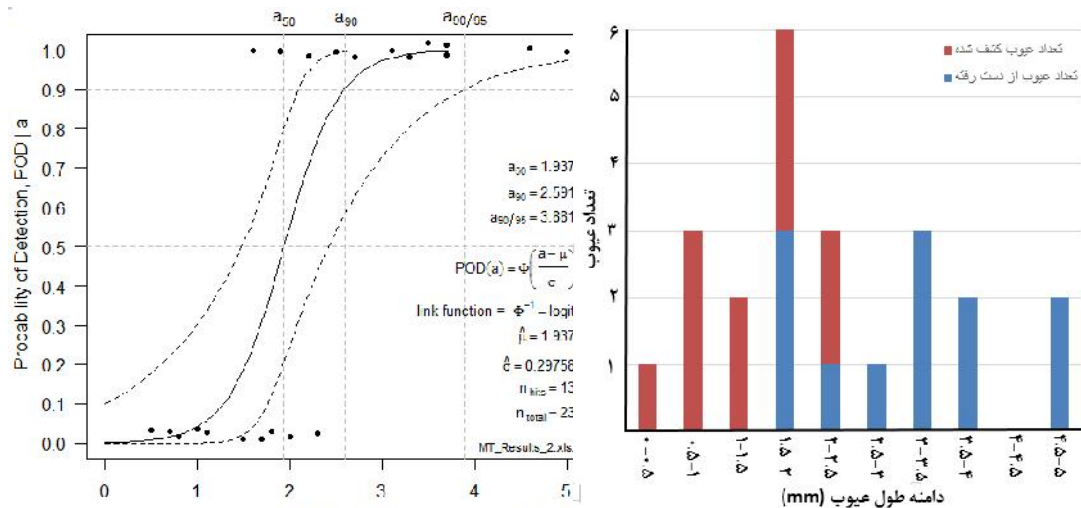
نتایج و تحلیل

نتایج حاصل از ارزیابی‌های میکروسکوپی کلیه نمونه‌ها که مشخصات واقعی عیوب سطحی را مشخص می‌کند در برابر آزمون غیر مخرب به صورت خلاصه در جدول ۳ آمده است. بر اساس آن، تعداد عیوب کشف شده ۱۳ عدد که معادل ۵۶.۵۲ درصد از کل عیوب و تعداد عیوب از دست رفته ۱۱ عدد معادل ۴۳.۴۸ درصد از کل عیوب است. بزرگترین اندازه عیب از دست رفته ۲.۵ میلی‌متر، در حالی که کوچکترین عیب کشف شده ۱.۶ میلی‌متر است.

- نتایج آزمون غیرمخرب مایع نافذ بر روی نمونه‌ها

۲.۵	بزرگترین عیب از دست رفته (mm)	۲۳	تعداد کل عیوب
۱.۶	کوچکترین عیب کشف شده (mm)	۱۳ (%۵۶.۵۲)	تعداد عیوب کشف شده (%)
۱.۹۴	a_{50} (mm)	۱۰ (%۴۳.۴۸)	تعداد عیوب از دست رفته (%)
۲.۵۹	a_{90} (mm)	۵ - ۰.۵	دامنه طول عیوب کشف شده (mm)

به منظور ارزیابی بیشتر، داده‌های گزارش شده به صورت نمودارهای هیستوگرام که نشان دهنده تعداد عیوب کشف شده و از دست رفته به صورت تابعی از طول عیب می‌باشد در شکل ۶ آمده است. به کمک این نمودار می‌توان احتمال کشف عیوب سطحی آزمون مایع نافذ مرئی را برای اتصالات با مشخصات اشاره شده در هر یک از بازه‌های طولی از طریق تقسیم تعداد عیوب کشف شده در هر بازه به کل عیوب موجود در آن بازه به دست آورد. مطابق این نمودار، تا بازه ۱-۱.۵ هیچ عیبی کشف نشده است و خارج از آن کمترین احتمال کشف مربوط به بازه ۲-۲.۵ است. به منظور تهیه نمودار POD برای این شرایط از بسته نرم افزار mh1823 استفاده شده است که در آن احتمال کشف عیب به صورت نموداری بر حسب طول عیب با در نظر گرفتن محدوده‌های اطمینان ۹۵% در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این نمودار، در حالی که آزمون قادر است عیوب با اندازه ۲.۵۹ و ۱.۹۴ میلی‌متر را به ترتیب با احتمال ۹۰ درصد (a_{90}) و ۵۰ درصد (a_{50}) تشخیص دهد.



شکل - نمودار هیستوگرام تعداد عیوب کشف شده بر حسب طول عیب دست رفته در بازه های طولی

نتیجه گیری

به منظور محاسبه حساسیت و قابلیت اطمینان آزمون غیرمخرب مایع نافذ برای اتصالات جوشی، تعدادی آزمون بر روی قطعاتی از جنس CK45 که توسط فرآیند جوشکاری MAG به یکدیگر متصل شده اند، انجام گرفت. ارزیابی های آماری نتایج حاصله نشان دادند که کوچکترین عیب کشف شده ۱.۶ میلی متر و بزرگترین عیب از دست رفته ۲.۵ میلی متر است. در حالی که آزمون قادر است عیبی با اندازه ۲.۵۹ میلی متر را با احتمال ۹۰ درصد تشخیص دهد، این اندازه برای احتمال ۵۰ درصد برابر ۱.۹۴ میلی متر است. در بازه طولی ۰.۵ تا ۵ میلی متر نرخ متوسط کشف عیوب ۵۶.۵۲٪ و نرخ متوسط از دست رفتن عیوب ۴۳.۴۸٪ است.

Raj, B., Jayakumar, T., Thavasimuthu, T.M., "Practical non-destructive testing", Third edition, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2007.

Mix, P.E., "Introduction to nondestructive testing - a training guide", Second edition, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2005.

بری هال ، ورنون جان، "آزمونهای غیرمخرب"، ترجمه مسعود رضا شاکری، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۵.

راج، سوبرامانیان، جایاکومار، "اصول و کاربرد تستهای غیرمخرب(NDT) در جوشکاری"، ترجمه مجید مصلی، طراح، تهران ۱۳۸۶.

Tong, T.C., Hou, J., Antoniou, R.A., "Probabilistic damage tolerance assessment: the relative merits of DARWIN, NERF AND PROF", Air Vehicle Division of Defence Science and Technology Organisation, Victoria, Australia, 2005.

Rummel, W.D., Matzkanin, G.A., "Nondestructive evaluation (NDE) capabilities data book". Third Edition, Nondestructive Testing Information Analysis Center (NTIAC), Austin, Texas 1997.

Carvalho, A.A., Rebello, J.M.A., Silva, R.R., Sagrilo, L.V.S., "Reliability of the manual and automated ultrasonic technique in the detection of pipe weld defects", Insight, Vol. 48, No. 11, Pp. 1-16, 2006.

Lively, J.A., Aljundi, T.L., "Fluorescent penetrant inspection probability of detection demonstrations performed for space propulsion", Review of quantitative nondestructive evaluation, edited by: Thompson, D. O., Chimenti, D. E., 2003, Vol. 22, Pp. 1891-1898.

Simsir, M., Ankara, A., "Comparison of two non-destructive inspection techniques on the basis of sensitivity and reliability", Materials and Design, 2007, Vol. 28, Pp. 1433-1439.

Nath, S.K., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V., Narayana, B.H., "Reliability assessment of manual ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) inspection for complex geometry components", NDT&E International, 2010, Vol. 43, Pp. 152-162.

Ali, A., Balint, D., Temple, A., Leavers, P., "The reliability of defect sentencing in manual ultrasonic inspection", NDT&E International, 2012, Vol. 51, Pp. 101-110.

Burke, S. K., Ditchburn, R. J., "Review of literature on probability of detection for magnetic particle nondestructive testing", Maritime Platforms Division of Defence Science and Technology Organisation, Victoria, Australia, 2013.

Annis, P. E. C., R package mh1823, version 4.0.1, 2013. <http://StatisticalEngineering.com/mh1823/>

ریاحی، محمد و فرجی، محمد، "معرفی اصول آزمون های غیرمخرب"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۴.

هنرور، فرهنگ، "جزوه درسی آزمون های غیرمخرب پیشرفته"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران، ۱۳۹۲.

Berens A.P., Hovey P. W., "Statistical methods for estimation crack detection probabilities, probabilistic fracture mechanics and fatigue methods: applications for structural design and maintenance", ASTM STP 798, 1983.