DOI: 10.30494/JNDT.2021.277129.1064 Received: March 14, 2021 - Accepted: October 18, 2021

Evaluation of the Tensile Strength of Spot Welding in DP590 Steel Sheets Using Ultrasonic Wave Attenuation

Hassan Ezadi[1*], Abbas Moghanizadeh[2], S. Barforoushan[1], A. Sharifpour[1]

1- Research and Development Department, Iran Khodro Industrial Group, Tehran, Iran
2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isafahan, Iran
*Mehdiizadi250@gmail.com

Abstract

Spot welding is a type of resistance welding that is used to weld sheets. In this method, the pressure of the electrodes and the heat generated by electrical current lead to welding two or more sheets. Although the use of ultrasonic waves is one of the most common methods for assessing the accuracy of spot welding, in this study, the mechanical properties of the weld, such as the tensile strength of the spot weld, is studied with ultrasonic waves attenuation. For this purpose, spot welding is created in sheets of DP590 by changing the electric current parameter in the range of 11 to 14 kA. Then the ultrasonic waves with the frequency of 20 MHz passed through the spot weld and then the attenuation of the ultrasonic waves is measured. After that, by using the tensile-shear test, the strength of the spot welding is measured. The microstructure of the welds has also been studied by electron microscopy. The results show that there is a direct relationship between ultrasonic wave attenuation and tensile-shear strength.Soby increasing ultrasonic wave attenuation, spot welding strength decreases, which can be attributed to the change in spot welding microstructure.

Keywords: Spot welding, Tensile strength, Ultrasonic waves, Ultrasonic wave attenuation.

www.SID.ir

DOI: 10.30494/JNDT.2021.277129.1064

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

ارزیابی استحکام جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد استحکام بالای پیشرفته دوفازی DP590 با استفاده از استهلاک امواج فراصوتی

حسن ایزدی[1*]، عباس مغنی زاده[2]، سهراب برفروشان[1]، امیر شریف پور[1]

۱- شرکت ایران خودرو، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*Mehdiizadi250@gmail.com

چکیده

جوشکاری نقطه‌ای، یکی از انواع جوشکاری مقاومتی است که از آن به منظور جوشکاری ورق‌ها استفاده می‌شود. در این روش، برای اتصال دو یا چند ورق از فشار الکترودها و گرمای حاصل از عبور جریان الکتریکی استفاده می‌شود. اگرچه استفاده از امواج فراصوتی یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی سالم بودن جوش نقطه‌ای است، در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از امواج فراصوتی، علاوه بر ارزیابی سالم یا معیوب بودن جوش، ویژگی‌های مکانیکی جوش، مانند استحکام کششی جوش نقطه‌ای، با امواج فراصوتی مطالعه شود. برای این منظور، جوش های نقطه‌ای در ورق‌هایی از جنس DP590 با تغییر پارامتر جریان الکتریکی در محدوده KA 11-14 ایجاد شده است. سپس امواج فراصوتی با فرکانس ۲۰ MHz از داخل جوش نقطه‌ای عبور کرده و در ادامه استهلاک امواج فراصوتی عبوری از جوش نقطه‌ای اندازه‌گیری شده است. همچنین با استفاده از آزمون کششی- برشی، استحکام جوش‌ها نیز اندازه‌گیری شده است. به‌علاوه، ریز ساختار جوش‌ها نیز با میکروسکوپ الکترونی مطالعه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند بین استهلاک امواج فراصوتی و استحکام کششی-برشی، رابطه مستقیم وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش استهلاک امواج فراصوتی، استحکام جوش نقطه‌ای کاهش پیدا می‌کند که علت این امر را می‌توان به تغییر ساختار جوش و درشت دانه شدن آن در منطقه جوش نسبت داد.

کلمات کلیدی: جوش نقطه‌ای، استحکام کششی، امواج فراصوتی، استهلاک امواج فراصوتی.

۱- مقدمه

جوش نقطه‌ای یک فرایند جوش مقاومتی است که در اثر حرارت حاصل از عبور جریان الکتریکی از محل اتصال فلزات و فشار حاصل از فشردن دو یا چند قطعه فلز توسط الکترودها ایجاد می‌شود. در این روش در ولتاژ مشخص، زمان کم، عبور جریان الکتریکی بالا از چند ورق باعث ایجاد حرارت در موضع اتصال و ذوب موضعی فلزها شده که نیروی اعمال شده بر ورق‌ها باعث حفظ جریان مدار و فشردن ورق‌های حرارت دیده به یکدیگر می‌شود[۱]. طبق قانون اهم هنگامی که جریان الکتریکی از یک مقاومت عبور کند تولید گرما میکند [2] و این جریان حرارت لازم برای ذوب منطقه بین دو ورق را فراهم می‌کند ولی بعلت کوتاه بودن زمان برقرای جریان و مسیر کوتاه عبور جریان، جریان زیادی برای توسعه گرمای لازم برای ذوب نیاز است [3]. برای بازرسی جوش نقطه‌ای روش‌های متعددی وجود دارد که مانند روش آزمون اسکنه و چکش[1]، یا آزمون استحکام کششی مخرب می‌باشد یا روش‌هایی مانند استفاده از اشعه ایکس و یا گرمانگاری تنها بصورت کیفی جوش را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. استفاده از امواج فراصوتی نیز یکی دیگر از روش‌های مرسوم برای ارزیابی جوش نقطه‌ای می باشد[4].

در پژوهشی کیفیت جوش نقطه‌ای با استفاده از امواج فراصوتی مطالعه شده و با مقایسه نتایج تست غیرمخرب و مخرب با یکدیگر، جوش نقطه‌ای را به سه گروه قابل قبول، جوش چسبیده و قطر کم دکمه جوش تقسیم کرده‌اند که بالغ بر ۹۵ درصد نتایج آزمون فراصوتی با نتایج مخرب

[1] Hammer-Chisel Test

www.SID.ir

مطابقت داشته است[۵]. یولبریچ[1] از روش آزمون فراصوتی برای ارزیابی جوش نقطه‌ای استفاده کرده و هزینه آن‌را با سایر روش‌های مخرب نیز مطالعه کرده است[6]. همچنین از امواج فراصوتی برای ارزیابی کمی اندازه و شکل قطعات جوش مقاومت در فولاد ضد زنگ با استفاده از دامنه پالس-اکو اولتراسونیک استفاده شده است و نشان داده شد که قابلیت اطمینان و همچنین دقت معادله تجربی با مقایسه نتایج محاسبه شده بر اساس پاسخ اولتراسونیک با نتایج به دست آمده توسط اشعه ایکس (پرتونگاری) و آزمایش مخرب تأیید شده است[۷]. بعلاوه محققان یک تکنیک را برای ارزیابی غیر مخرب جوش‌های نقطه‌ای با استفاده از تکنیک انتقال موج سطحی ایجاد کردند و نشان دادند که قطر دکمه جوش را می‌توان با اندازه‌گیری عرض ناحیه‌ای که امواج ارسالی ضعیف شده مشاهده می‌شود، ارزیابی کرد. همچنین یک سیستم اندازه‌گیری با استفاده از مبدل‌های آرایه‌ای توسط محققان پیشنهاد داده است. نتایج اندازه‌گیری با استفاده از این سیستم به خوبی با قطره‌ای قطعه اندازه گیری شده توسط مشاهدات مقطعی مطابقت دارد[8]. بعلاوه در تحقیق دیگری، سیستم جستجوی یکپارچه به عنوان یک رویکرد جدید برای ارزیابی مقاومت در برابر کشش و خستگی اتصالات جوش داده شده با امواج فراصوتی توسعه داده شد. به همین منظور، نمونه های سه صفحه‌ای مقاومت نقطه‌ای جوش از انواع مختلف فولاد کم کربن ساخته شده است. پس از آن، آزمایشات اولتراسونیک انجام شد و داده-های پالس اکو از هر نمونه با استفاده از روش پردازش تصویر استخراج شد. این تحقیق، رویکرد جدید برای ارزیابی قدرت استاتیکی و طول عمر خستگی اتصالات سه ورقه ای بر اساس نتایج فراصوتی با استفاده از شبیه سازی شبکه عصبی مصنوعی ارایه داده است[۲]. همچنین محققان برای تخمین سختی جوش نقطه‌ای از استهلاک امواج فراصوتی استفاده کرده‌اند. در این روش جوش های نقطه‌ای با سختی های مختلف ایجاد شده و نشان داده شد که بین سختی جوش نقطه‌ای و استهلاک امواج فراصوتی رابطه وجود دارد[4]. در این پژوهش تلاش شده است تا استحکام جوش نقطه‌ای با استفاده از روش غیرمخرب امواج فراصوتی مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور ابتدا جوش در ورق های از جنس DP590 ایجاد و سپس توسط پروپ جوش نقطه‌ای تست گردیده و در نهایت استحکام کششی نمونه‌ها سنجیده شده است که به جزییات در قسمت بعدی پرداخته شده است.

۲-تجهیزات و روش آزمایش‌ها

۲-۱- ماده اولیه

برای انجام آزمایشات از ورق‌های فولادی DP590 استفاده شده است که دارای کاربرد زیادی در صنایع خودروسازی می‌باشد. ضخامت ورق ها ۱/۷۵ mm می باشد. ترکیب شیمیایی، نمونه‌ایی از ورق‌ها مورد آنالیز قرار گرفته که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق DP590 مورد استفاده در آزمایشات

Steel type	C	Fe	Mn	P	S
DP590	۰/۰۸	۹۷	۱/۲۴	۰/۰۱۸	۰/۰۰۵

۲-۲- متغیر های دستگاه جوش

نقطه جوش با استفاده از یک دستگاه جوشکاری مقاومتی ترانس سرخود با جریان AC و ۵۰KVA انجام شد. جوش با استفاده از الکترود Artrode-11 تقویت و پراکنده شده با پودر آلومینا در سره مسی مخروطی شکل ناقص، تحت زاویه ۴۵ درجه و با قطر ۸mm انجام شد. در تمامی آزمایشات، نیروی الکترود در ۴ kN و زمان جوش ۰/۳۳ s ثابت نگه داشته شد. جریان جوشکاری از 11KA تا ۱۴ KAتغییر یافت.

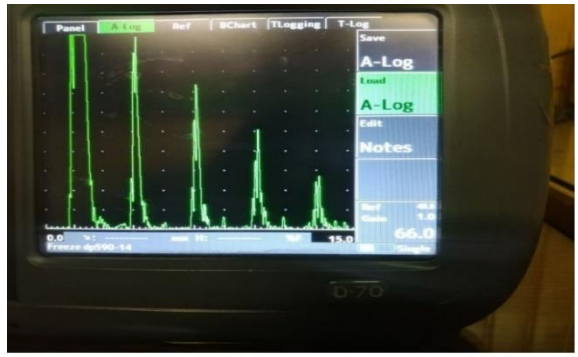
۲-۳- تجهیزات آزمون فراصوتی مورد استفاده در آزمایش

در این آزمایش، آزمون های فراصوتی با استفاده از دستگاه عیب یاب فراصوتی Sitescan ساخت شرکت Sonatest انگلستان استفاده شده است (شکل ۱). همچنین تراگذار(پروب) مخصوص آزمون فراصوتی نقطه‌جوش با قطر ۴mm و فرکانس ۲۰MHz ساخت شرکت کروت‌کرامر آلمان استفاده گردید (شکل ۲).

[1] Ulbrich

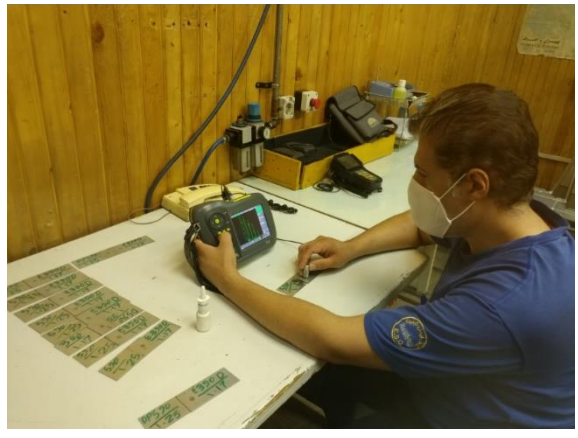
www.SID.ir

الف



ب

شکل ۱- الف: تراگذار (پروب) مخصوص آزمون فراصوتی نقطه‌جوش با قطر ۴میلی‌متر و فرکانس ۲۰MHz؛ ب: دستگاه عیب یاب فراصوتی استهلاک امواج

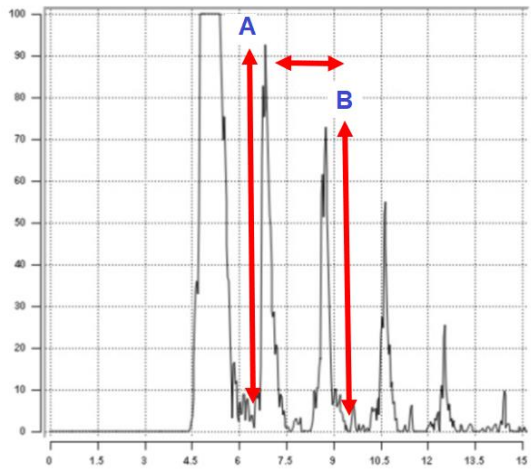


شکل۲- ارزیابی استحکام نقاط جوش مقاومتی نقطه ای توسط اپراتور با استفاده از دستگاه عیب یاب فراصوتی

از معادله۱ برای محاسبه استهلاک امواج فراصوتی استفاده شده است[۹] (استهلاک امواج فراصوتی مطابق شکل ۳ اندازه گیری شده است).

$$\alpha = -\frac{1}{x}20log\frac{A_X}{A_0} \qquad (۱)$$

A_0 دامنه اولیه موج فراصوت است $(x = 0)$ و A_x دامنه پس از طی مسافت x است.



شکل۳- اندازه‌گیری طول دومین وسومین پژواک و فاصله عمودی بین آنها برای محاسبه استهلاک

۲-۴-آزمون کشش– برش

نمونه های تست کشش–برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند. به منظور بررسی رفتار شکست و خواص مکانیکی نمونه های جوش داده شده، تست شبه استاتیکی کششی- برشی با سرعت ۲mm/min با یک دستگاه یونیورسال Zwick انجام شد (شکل ۴). نمونه‌ها در ابعاد ۴۵×۱۰۵mmدر شابلون مخصوصی چیده شد و یک جوش نقطه ای در مرکز محدوده ورقدر فاصله ۴۵mm از لبه انجام شد (شکل ۵).

شکل ۴- دستگاه تست کشش- برش مورد استفاده در آزمایش

www.SID.ir

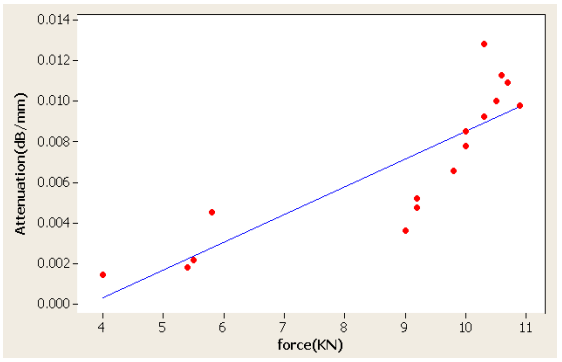
شکل ۵– حالت‌های شکست جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP590. الف)گسیختگی در محل جوش، ب) گسیختگی در ورق

۳-تحلیل نتایج

این مطالعه، به بررسی تاثیر خصوصیات فیزیکی جوش نقطه‌ای بر امواج فراصوتی و همچنین پارامترهای موثر بر جوش نقطه‌ای می پردازد.

۳-۱- رابطه استحکام جوش و امواج فراصوتی

در این پژوهش، به بررسی روشی برای تخمین استحکام جوش نقطه‌ای با استفاده از امواج فراصوتی پرداخته شده است. ایده اصلی این روش بر اساس رابطه استهلاک امواج فراصوتی و استحکام جوش نقطه‌ای می‌باشد. ضخامت دکمه جوش بر استحکام جوش تاثیر مستقیم دارد و از طرفی بر خصوصیات امواج فراصوتی نظیر استهلاک امواج فراصوتی نیز تاثیر گذار می‌باشد. بسته به ضخامت دکمهٔ جوش، میزان استهلاک موج متفاوت بوده و تعداد پژواک های دیوارهٔ پشتی فرق می‌کند. با افزایش ضخامت دکمهٔ جوش میزان استهلاک افزایش یافته و تعداد پژواکهای دیوارهٔ پشتی کاهش می‌یابد.ضخامت دکمه جوش تاثیر زیادی بر استهلاک امواج فراصوتی دارد که علت آن تغییر عمق نفوذ دکمه جوش می‌باشد. بنابراین با افزایش ضخامت دکمه جوش میزان استهلاک نیز افزایش می‌یابد. رابطه بین استهلاک امواج فراصوتی و نیروی کششی-برشی ثبت شده از آزمایشات در شکل ۶ آورده شده است. از نتایج آزمایش‌ها (شکل ۶) می‌توان استنتاج نمود که رابطه مستقیمی بین خصوصیاتی امواج فراصوتی نظیر استهلاک و استحکام جوش نقطه ای وجود داردو نتایج آزمایشات انجام شده بیانگر این مطلب می‌باشد. به آسانی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش استهلاک امواج فراصوتی، استحکام جوش نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است برای ایجاد استحکام‌های مختلف در چوش نقطه‌ای، جریان جوشکاری از kA ۱۴-۱۱ تغییر یافت.



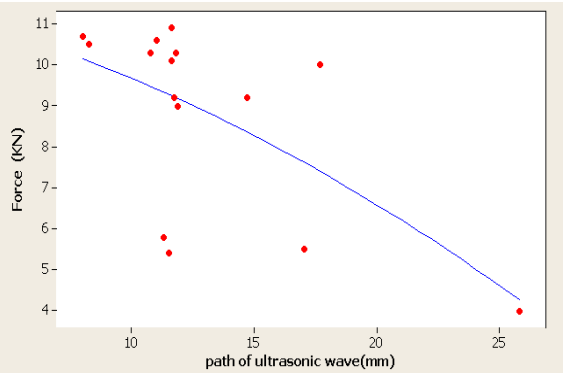
شکل۶- رابطه بین استهلاک امواج فراصوتی و استحکام جوش نقطه‌ای

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، هنگامی که أمواج فراصوتی در دکمه جوش بیشتر مستهلک شوند، استحکام جوش نیز بیشتر شده است. علت این پدیده را میتوان به تغییرات ریز ساختار داخل جوش نسبت داد که در ادامه بحث خواهد شد. در واقع در دکمه جوش که فرایندهای متالورژیکی بیشتر رخ می‌دهد، ریز ساختار تغیر کرده و از یک ساختار ریزدانه در فلز پایه به سمت دشت دانه در مرکز جوش خواهد بود و ساختارهای درشت دانه نیز بیشتر باعث مستهلک شدن امواج فراصوتی می‌گردند بنابراین در دکمه جوش، شاهد افزایش استهلاک أمواج فراصوتی خواهیم بود. از طرف دیگر، در دکمه جوش ساختار فلز پایه از فریت ریز دانه به ساختار مارتنزیت یا پرلیت درشت دانه استحاله شده که باعث افزایش استحکام دکمه جوش خواهد شد. البته هنگامی که از بالاترین جریان الکتریکی برای ایجاد جوش استفاده می‌گردد، سبب می‌گردد که ساختار بی‌نظمی در جوش ایجاد شده و حتی خلل و فرجی نیز ایجاد شود که باعث افزایش استهلاک أمواج فراصوتی شده در حالیکه کمتر باعث افزایش استحکام دکمه جوش می‌گردد. بنابراین میتوان انتظار داشت بتوان به کمک محاسبه استهلاک امواج فراصوتی، استحکام جوش را بدون تخریب آن تخمین زد.

یکی دیگر از اطلاعات دریافتی از امواج فراصوتی، طول مسیر طی شده امواج فراصوتی در داخل جوش می‌باشد. امواج فراصوتی قبل از اینکه مستهلک شوند، بارها بین دیواره بالایی و پایینی جوش، بازتاب می‌شوند (تا در نهایت

www.SID.ir

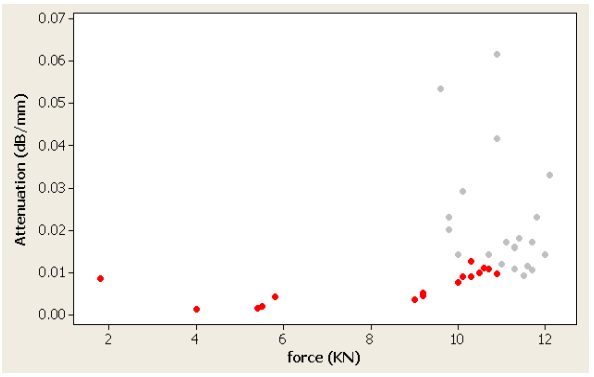
مستهلک شوند). در واقع طول مسیر حرکت امواج فراصوتی نیز بیانگر خصوصیات ماده و ریزساختار آن می باشد. از انجایی که تغییر ریزساختار ماده، بر میزان استهلاک امواج فراصوتی تاثیرگذار خواهد بود. بنابراین هنگامی که ریز ساختار ماده، دانه‌ریز باشد، امواج فراصوتی قبل از استهلاک، مسافت بیشتری را طی خواهند کرد، و اگر ماده درشت دانه باشد امواج فراصوتی قبل از مستهلک شدن مسافت کمتری را طی خواهند کرد. بنابراین از میزان مسافتی که یک موج فراصوتی قبل از استهلاک، در داخل جوش طی کرده است نیز میتوان به تغیرات ریز ساختار پی برد. رابطه بین این پارامتر و استحکام جوش در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷- رابطه بین استحکام جوش نقطه‌ای و مسافت طی شده توسط امواج فراصوتی

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است با افزایش میزان مسافت طی شده توسط امواج فراصوتی در داخل جوش، استحکام جوش نقطه ای کاهش می یابد که علت آنرا میتوان به تغییر ریز ساختار در ناحیه جوش نسبت داد که در ادامه به ان پرداخته خواهد شد.

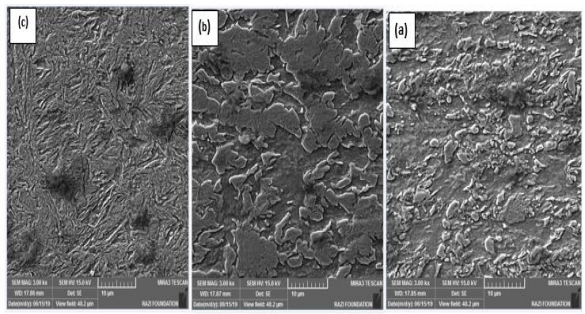
همچنین حالت گسیختگی دکمه جوش‌های سالم، در آزمون مخرب کشش- برش، که گسیختگی از ورق ایجاد شده، دارای ضریب استهلاک بیشتری نسبت به جوش های ناسالم می باشد که گسیخته شدن در دکمه جوش‌ها، از فصل مشترک ورق ها و از جوش رخ داده، می‌باشند. نتایج مقایسه میزان استهلاک امواج فراصوتی جوش‌های سالم و ناسالم درشکل ۸ آورده شده است .



شکل ۸- رابطه بین استحکام جوش نقطه‌ای جوش‌های سالم (نقاط طوسی رنگ)، جوش های ناسالم(نقاط قرمز رنگ)

۳-۲- مشخصات ریز ساختار دکمه جوش

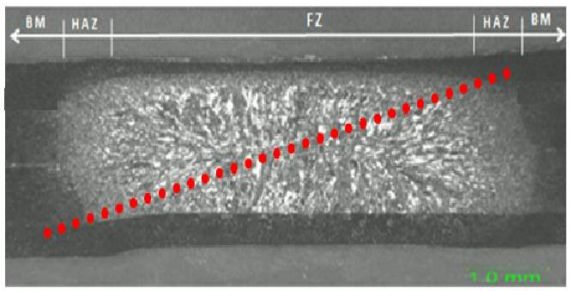
یکی از دلایل استهلاک امواج فراصوتی در اجسام، ریز ساختار ماده می باشد. در جوش ها، ریز ساختار در منطقه جوش تغییر پیدا میکند و حتی در منطقه متاثر از حرارت نیز شاهد تغییراتی در ریز ساختار هستیم. بنابراین برای مطالعه دقیق تر علت تغییر استهلاک امواج فراصوتی، مطالعه ریز ساختار جوش و منطقه متاثر از حرارت می تواند مفید باشد. تغییرات سختی در سطح مقطع عرضی اتصال را می‌توان از لحاظ ریزساختار نیز آنالیز کرد. ریزساختار فلز پایه همانطور که در تصویر ۹(a)مشاهده می شود، شامل مارتنزیت تمپرشده در زمینه فریتی است و سختی مربوطه حدود ۲۵۲HV می‌باشد. ریزساختار منطقه ذوب تصویر ۹(b) به طور عمده از مارتنزیت تمپر شده با سختی متوسط ۴۱۰HV تشکیل می‌دهند. تشکیل مارتنزیت در منطقه ذوب به‌دلیل نرخ سرمایش بالا در طی فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با حضور آب سرد در الکترود مسی و در اثر کوئنچ شدن، در سیکل جوشکاری کوتاه نسبت داده می‌شود [۱].



شکل ۹- ریزساختار مناطق مختلف جوش مقاومتی نقطه ای فولاد DP590 (a)فلز پایه،(b)ریزساختار منطقه HAZ ، (c)ریزساختار دکمه جوش

www.SID.ir

همچنین تصویر(۱۰) پروفیل ریز سختی سنجی اتصالات در داخل دکمه جوش، برای جوش های ساخته شده با استفاده از جریان جوشکاری ۱۲/۵ کیلو آمپر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- پروفیل ریز سختی سنجی اتصالات در داخل دکمه جوش مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP590

همچنین بیشتر بودن میزان سختی دکمه جوش به دلیل میزان بیشتر مارتنزیت در سختی می‌باشد. سختی HAZ با توجه به تشکیل فازهای غیر تعادلی بالاتر از BM میباشد. ناهمگنی ریزساختار HAZ بیشتر از منطقه ذوب توسط پروفیل سختی تایید شده است.

همانطور که بالاتر نیز توضیح داده شد، تغییر ریز ساختار دکمه جوش، یکی از مهم‌ترین علل تاثیر بر استهلاک امواج فراصوتی و استحکام جوش می‌باشد. در واقع تبدیل ساختار دانه ریز فلز پایه به ساختار دانه درشت در منطقه جوش باعث خواهد شد که امواج فراصوتی بیشتر مستهلک شوند و از طرف دیگر، تغییر ساختار همزمان باعث افزایش استحکام جوش نیز خواهد شد. در واقع ریزساختار بطور همزمان بر أمواج فراصوتی و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی جوش تاثیر گذار می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ارزیابی و تخمین استحکام جوش نقطه‌ای با استفاده از استهلاک امواج فراصوتی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از انجام این پروژه بررسی امکان جایگزینی روش غیرمخرب فراصوتی به جای روش مخرب در بازرسی کیفی نقاط جوش در شرکت خودروسازی ایران‌خودرو و تعمیم آن به دیگر مجموعه‌های تولیدی در این شرکت و صنایع مختلف تولیدی کشور بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که روش فراصوتی، نه تنها توانایی بالایی از خود در کشف و شناسایی انواع عیوب جوش نقطه‌ای دارد، بلکه با استفاده از اطلاعات دریافتی از امواج فراصوتی می‌توان استحکام جوش نقطه‌ای را تخمین زد. آزمایش‌ها نشان دادند که رابطه‌ای مستقیم بین استهلاک امواج فراصوتی و استحکام جوش نقطه ای برقرار است به گونه ای که با افزایش استهلاک امواج فراصوتی استحکام جوش نقطه‌ای افزایش پیدا کرده است و علت این امر را می‌توان به ریز ساختارمنطقه جوش نسبت داد. در صورت استفاده از این روش به عنوان جایگزین و یا مکمل روش مخرب می‌توان با عدم تخریب مجموعه‌ها و قرار دادن این مجموعه‌ها در چرخهٔ تولید از صرف هزینه‌های اضافی در کنترل کیفیت نقاط جوش جلوگیری کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد از هوش مصنوعی مانند شبکه های عصبی برای تخمین استحکام جوش نقطه با کمک أمواج فراصوتی استفاده کرد تا هزینه‌های آزمایش‌ها نیز کاهش پیدا کند. بعلاوه پژوهش در مورد پیش‌بینی تغییر خواص مکانیکی جوش مانند سختی نیز میتواند مفید واقع گردد.

۵- منابع

[1] Chao, Y.J.,"Ultimate strength and failure mechanism of resistance spot weld subjected to tensile, shear, or combined tensile/shear loads", *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 125, No. 2, pp. 125-132, 2003.

[2] Pouranvari, M., Asgari, H., Mosavizadch, S., Marashi, P. and Goodarzi, M.,"Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12, No. 3, pp. 217-225, 2007.

[3] Tsai, C., Papritan, J., Dickinson, D. and Jammal, O.,"Modelingof resistance spot weld nugget growth", *Welding Journal(USA)*, Vol. 71, No. 2, pp. 47, 1992.

[4] Moghanizadeh, A.,"Evaluation of the physical properties of spot welding using ultrasonic testing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 1-4, pp. 535-545, 2016.

[5] Moghanizadeh, A. *Ultrasonic assessment of tension shear strength in resistance spot welding*. in *Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2015*. 2015. International Society for Optics andPhotonics.

[6] Ulbrich, D., Kowalczyk, J., Jósko, M. and Selech, J.,"The analysis of spot welding joints of steel sheets with closed profile by ultrasonic method", *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 4, No. pp. 8-14, 2015.

[7] Safi, A., Akanda, M.S., Sadique, J. and Alam, M.S.,"Nondestructive evaluation of spot weld in stainless steel using ultrasonic immersion method", *Procedia Engineering*, Vol. 90, No. pp. 110-115, 2014.

[8] Takada, H. and Hirose, T.,"An ultrasonic method for testing spot-welds", *Technical Report*, Vol. No. pp. 2007.

[9] Arguelles, A.P. and Turner, J.A.J.T.J.o.t.A.S.o.A.,"Ultrasonic attenuation of polycrystalline materials with a distribution of grain sizes", Vol. 141, No. 6, pp. 4347-4353, 2017.

www.SID.ir