

بهینه سازی پارامترهای جوشکاری فولاد کم کربن EN 10130 به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی

اکبرعلیمحمدی^۱، مسعود کثیری^۲، مسعود افزند^{۳*}، حسین نوروزی فروشانی^۴

* نویسنده مسئول: masoud.afzand@pmc.iaun.ac.ir

چکیده

فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی یک روش نو و جدید جوشکاری حالت جامد است که در اثر اصطکاک بین پین و شولدر و قطعه کار، تولید حرارت می کند. این حرارت باعث ایجاد یک منطقه خمیری شکل می شود. نیروی فشار از طرف شولدر و چرخش پین و ادغام لبه های اتصال سبب انجام جوشکاری می شود. در این پژوهش ابتدا به بررسی جوش پذیری ورق فولادی EN10130 با ضخامت ۱/۵ میلی متر پرداخته شد و پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیش روی ابزار، قطر پین و شولدر، توسط ۵۸ عدد آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. پس از ایجاد جوش هایی بدون عیب، بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برای سرعت دورانی و بازه ۳۰ تا ۱۶۰ میلی متر بر دقیقه برای سرعت خطی بترتیب به عنوان سطوح بالا و پایین مناسبی برای این پارامترها انتخاب شده اند. برای دستیابی به بیشترین استحکام کششی، تعداد ۲۹ آزمایش با توجه به سطوح معین شده پارامترها، از روش باکس بنکن طراحی شده، سپس متدولوژی سطح پاسخ برای بهینه سازی پارامترها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بهینه سازی و شرایط آزمایشگاهی همخوانی خوبی داشتند که این نتیجه، نشان دهنده کفایت مدل طراحی آزمایش ها و نتایج پیش بینی بهینه سازی است. آزمایش های ریز سختی سنجی، متالوگرافی و تست کشش نرمال صورت گرفته روی ۳ سری از ورق های تولید شده با مناسب ترین استحکام کششی و ازدیاد طول، منطقه متأثر از حرارت ورق های سمت پیشرونده را ضعیف تر از بقیه موضع جوش معرفی کردند.

واژه های کلیدی

جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، فولاد کم کربن، طراحی آزمایش.

تاریخ ارسال: ۹۴/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۱/۲۴

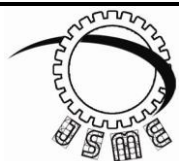
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۸

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی-تکنیک تهران)، ایران.



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Optimization of the Parameters of Low-carbon Steel (EN10130) Welding using Friction Stir Welding Method

Akbar Alimohammady¹, Masoud Kasiri², Masoud Afrand^{3,*}, Hossein Noruzi Forooshani⁴

* Corresponding Author: masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir

Abstract:

Friction-stir welding process is a novel method of solid state welding, which produces heat due to friction between the pin, the shoulder and the workpiece. This heat causes a paste area. Shoulder pressure and pin spin cause edges integration and lead to welding. In this study, firstly, the feasibility of welding of steel sheet (EN10130) with a thickness of 1.5mm has been tested by 58 experiments. After making perfect welds, the ranges of 500-1000 RPM and 30-160 mm/min were selected as the suitable upper and lower levels, respectively, for rotational speed and linear speed. To achieve a maximum tensile strength, 29 tests were designed by using the Box-Benken method considering specified levels of the parameters. Then, the response surface methodology was used for optimization of the parameters. Results showed that the optimal outputs and experimental data were in good agreement, which indicate the adequacy of the design of experiments and optimization predict results. Micro-hardness tests, metallography and normal tensile test were carried out on three series of plates produced with the most appropriate tensile strength and elongation. Results showed that heat-affected zone weakened the sheet of advancing side compared to other welding zones.

Key words:

Friction stir welding method,
Low-carbon steel,
Design of experiment.

1- MSc, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

3- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

4- MSc, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran.

۱- مقدمه

این فرایند سه ناحیه (دکمه^۴ جوش و دو ناحیه متاثر از حرارت^۵) بوجود می آید. HAZ₁ شامل فریت چند وجهی همراه با حداکثر افت سختی است و HAZ₂ شامل مارتزیت تمپر شده همراه با سختی نسبتاً بیشتر از HAZ₁ بود. چو^۶ و همکاران، [۸] فولاد فریتی ۴۰۹ را توسط روش FSW با موفقیت اتصال دادند. آنها در یافتند که در منطقه اغتشاش^۷ یافته ساختار کاملاً ریز دانه و دارای سختی بالا است که این امر به دلیل تبلور مجدد ناشی از تغییر شکل برشی و حرارت بالا است.

در تحقیق حاضر، پارامترهای فرایند جوشکاری FSW بر روی ورق فولادی EN 10130 نورد شده، توسط نرم افزار DOE طراحی آزمایش شده و نتایج طراحی آزمایش با نتایج عملی بدست آمده مقایسه می شود. سپس ریز ساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوشکاری شده مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- روش کار

۲-۱- فلز پایه

در این پژوهش عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی روی ورق فولادی نورد شده EN10130 به ضخامت ۱/۵ میلیمتر با پارامترهای متفاوت انجام شد. ترکیب شیمیایی ورق مورد استفاده در جدول (۱) آمده است. ورق ها با استفاده از دستگاه گیوتین به ابعاد ۱۶۰×۸۰×۱/۵ میلی متر برش زده شدند. نمونه ها بعد از برش لبه آنها به وسیله سوهان پلیسه گیری و تمیز شدند و در ادامه دو ورق بصورت لب به لب در داخل قیدی محکم ثابت شدند. فرایند جوشکاری در جهت طولی نمونه ها با استفاده از یک ماشین فرز سه محور در سرعت دورانی و پیشروی و قطرهای مختلف شانه و بین انجام شد.

در این تحقیق ابزاری از جنس کاربید تنگستن با بین استوانه ای شکل استفاده شد. این ابزار دارای طول بین ۱/۳

امروزه با توجه به پیشرفت های مختلف در صنایع (از جمله صنعت جوشکاری) و نیازهای جدید و روز افزون بشر موجب شده تا محققان و صنعتگران به سمت استفاده از روشهای جدید تولید برای دستیابی هرچه سریعتر به محصولات مورد نیاز پیش روند. در میان فرایندهای نوین جوشکاری، فرایند اصطکاکی-اغتشاشی (FSW)^۱، برای اتصال ورق های پر کاربرد فولادی و آلومینیومی در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲،۱]. اصلی ترین مشکل ورق های اتصال یافته توسط روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، که صنعت با آن مواجه است، میزان افت خواص مکانیکی، از جمله استحکام نسبت به فلز پایه می باشد، که علت آن دلایل اصلی همچون عدم انتخاب سرعت چرخش مناسب ابزار، سرعت نامناسب پیشروی ابزار، قطر نامناسب پین و شانه ابزار و دلایل فرعی همچون، انتخاب نامناسب زاویه انحراف^۲، پیش گرم، جهت چرخ ابزار (ساعت گرد یا پاد ساعت گرد)، سیستم قید و بند، هندسه ابزار و غیره است [۴،۳ و ۵].

جعفرزادگان و همکاران [۶] فولاد های St37 و فولاد زنگ نزن 304 را به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، با سرعت پیشروی ثابت و با سرعت چرخش های ۴۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه جوشکاری کردند. آنها دریافتند نمونه ای که با سرعت چرخش کمتری جوشکاری شده، نسبت به نمونه ای که با سرعت چرخش بیشتر جوشکاری شده دارای درصد ازدیاد طول بیشتر و استحکام کمتری است. همچنین در سطح مقطع نمونه ای که با سرعت چرخش بیشتری جوشکاری شده ذرات کاربید تنگستن مشاهده شد، که باعث کاهش انعطاف پذیری جوش شد. گویش^۳ و همکاران [۷] فولاد کم کربن مارتزیتی M190 را به روش اصطکاکی-اغتشاشی با موفقیت جوش دادند. آنها دریافتند که در اثر اصطکاک بین ابزار و ورق های فولادی پیک دمایی به ۱۰۸۰-۱۰۹۰ درجه سانتی گراد می رسد که طی

⁴ Nugget

⁵ Heat Affected Zone (HAZ)

⁶ Cho

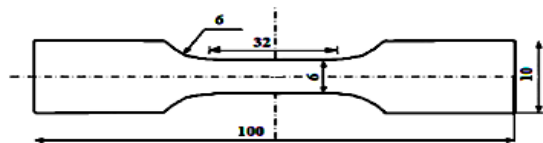
⁷ Stir Zone (SZ)

¹ Friction Stir Welding (FSW)

² Tilt angle

³ Ghosh

تن استفاده شد. شکل (۲) نقشه ابعادی نمونه های کشش را نشان می دهد.



شکل (۲) ابعاد نمونه کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 (ابعاد بر حسب میلیمتر)

۲-۴- آزمایش سختی سنجی

ریز سختی ویکرز روی سطح مقطع نمونه ها (عمود بر مسیر جوشکاری) و عمق ۱/۵ میلی متری زیر سطح انجام و میزان بار دستگاه ۱۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه تنظیم شد [۱۲ و ۱۳]. فواصل انجام آزمون روی هر نمونه ۱/۵ میلی متر انتخاب شده است.

۲-۵- طراحی آزمایش^۱ (DOE)

متدولوژی سطح پاسخ در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون [۱۴]، جهت بهبود فرایندهای شیمیایی ارائه شد. مونتهگومری در سال ۲۰۰۵ [۱۵]، متدولوژی سطح پاسخ را اینگونه تعریف می کند "متدولوژی سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیاتی است که کاربرد آن برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی است که یک متغیر پاسخ^۲ (خروجی) مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر مستقل دیگر قرار داشته باشد و ما بخواهیم این متغیر پاسخ را به مقدار بهینه‌ی خود برسانیم". واژه ی سطح پاسخ نشان می دهد که تغییرات متغیر پاسخ در قبال متغیرهای کنترلی باید مد نظر گرفته شود. برای این منظور ابتدا سطوح بالا و پایین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی از جمله قطر پین، قطر شانه، سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار بررسی و تعیین شدند. این بازه در شکل (۳) نمایش داده شده است. همچنین بازه مناسب برای انتخاب قطر پین و شولدر از مرجع [۱۶] و تجارب آزمایشگاهی استفاده شده است. در کلیه آزمون های نشان داده شده در شکل (۳)،

میلی متر و قطر های شانه و پین های مختلف است. همچنین شانه ابزار یک زاویه ۸ درجه به سمت داخل داشت تا مواد به واسطه چرخش پین وارد محفظه حاصل از این زاویه شده و در هنگام عبور ابزار با نیروی زیاد به سمت پایین فورج شود. شکل (۱) هندسه ابزار کاربرد تنگستن حاوی پین استوانه ای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد EN 10130 [۹]

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Mo%
۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۳	۰/۰۱
Cu%	V%	W%	Co%	Al%	Sn%	Pb%
۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۵۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳



شکل (۱) ابزار کاربرد تنگستن، حاوی پین مخروطی مورد استفاده در تحقیق

۲-۲- متالوگرافی و مطالعه ریزساختاری

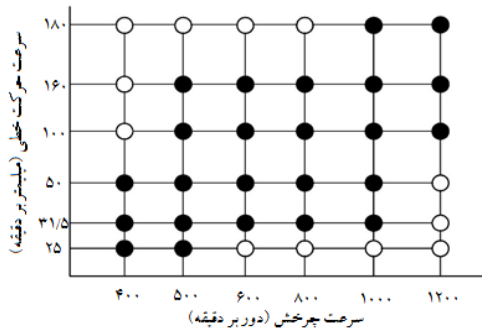
بعد از انجام جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، ورق ها در جهت عمود بر راستای فرایند بریده شدند. نمونه های تهیه شده پس از سنباده کاری توسط محلول نایتال ۲ درصد در مدت زمان ۲۰ ثانیه حکاکی شدند [۱۰]. مطالعه ریزساختاری نمونه های تهیه شده در بزرگنمایی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به نرم افزار تحلیل تصاویر صورت گرفت.

۲-۳- آزمون کشش

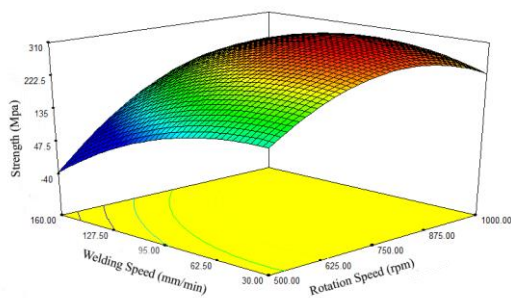
نمونه های آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 [۱۱] توسط دستگاه وایر کات برش خورده و آماده سازی شدند. برای این آزمون از یک دستگاه کشش با ظرفیت ده

¹ Design Of Experiments

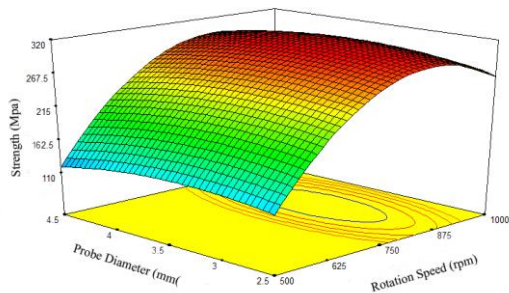
² Response Variable



شکل (۳) آزمون های انجام شده برای تعیین سطوح بالا و پایین سرعت حرکت خطی و دورانی ابزار



شکل (۴) اثر پارامترهای متغیر سرعت دورانی ابزار و سرعت حرکت خطی ابزار بر روی استحکام کششی ورق های جوش خورده



شکل (۵) اثر پارامترهای متغیر سرعت دورانی ابزار و قطر پین ابزار بر روی استحکام کششی ورق های جوش خورده

زاویه انحراف ثابت و برابر ۲ درجه، عمق نفوذ پین ثابت و برابر ۱/۳ میلی متر، قطر شانه ابزار ثابت و برابر ۱۳ و قطر پین ثابت و برابر ۳ میلی متر در نظر گرفته شده اند. نقاط مشکی بیانگر اتصال سالم و نقاط سفید بیانگر اتصال معیوب است. در ادامه برای بررسی این پارامترهای قابل کنترل، آزمایش هایی از طریق باکس و بنکن^۱ تحت رویه مونتهگومری، طراحی آزمایش شدند و سپس تابع هدف بصورت مدل ریاضی تعریف شده و در نهایت این مدل توسط متدولوژی سطح پاسخ^۲ بهینه سازی می شود. هدف از این بهینه سازی برای دستیابی به ورق جوش خورده با بیشترین استحکام کششی می باشد. در این آزمایش استحکام کششی، سطح پاسخ تعریف شده است که تاثیر سرعت چرخش، سرعت پیشروی، قطر پین و قطر شانه بر روی استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۴) اثر دو پارامتر سرعت چرخش و سرعت پیشروی بر روی استحکام جوش مشاهده می شود. با توجه به شکل (۴) در سرعت های چرخش بین 700 rpm تا 875 rpm و در سرعت پیشروی 60 mm/min تا 90 mm/min بیشترین استحکام حاصل می شود و در خارج از محدوده فوق استحکام کششی افت پیدا می کند. همچنین شکل (۵) اثر همزمان سرعت چرخش ابزار و قطر پین را بر روی استحکام کششی نشان می دهد. همانطور که مشخص است سرعت چرخش در محدوده 700 rpm تا 875 rpm و قطر پین در محدوده 3 mm تا 4 mm بیشترین استحکام کششی را دارد. همانطور که در شکل مشخص است نسبت تغییرات سرعت چرخش به قطر پین بیشتر است و تاثیر بیشتری بر روی استحکام جوش دارد. به عبارتی دیگر با تغییر سرعت چرخش ابزار، استحکام کششی اتصال بیشتر تغییر می کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- متالوگرافی و مطالعه ریز ساختاری

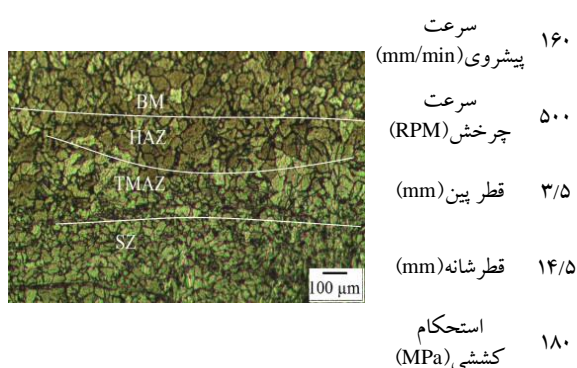
بررسی نتایج حاصل از آزمون کشش و ریزسختی نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی بدون در نظر گرفتن تحولات ریز ساختاری به وجود آمده میسر

¹ Box and Benken

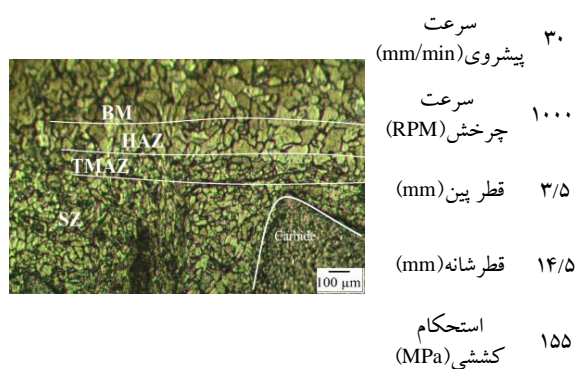
² Response Surface Methodology (RSM)

موجب تبلور مجدد شدید می شود. نتیجه این پدیده کاهش چگالی نابجایی ها، رشد و افزایش اندازه دانه خواهد بود که در نهایت سختی و استحکام را به دنبال دارد [۱۷].

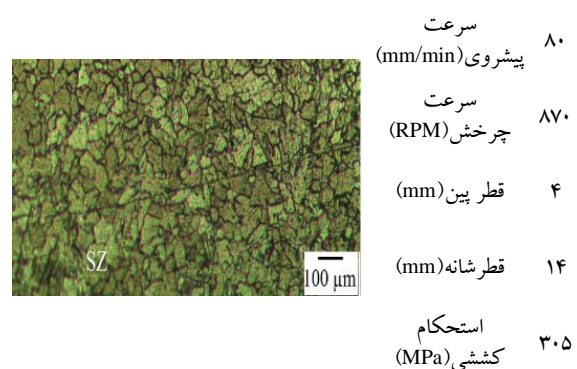
نمونه (a)



نمونه (b)



نمونه (c)

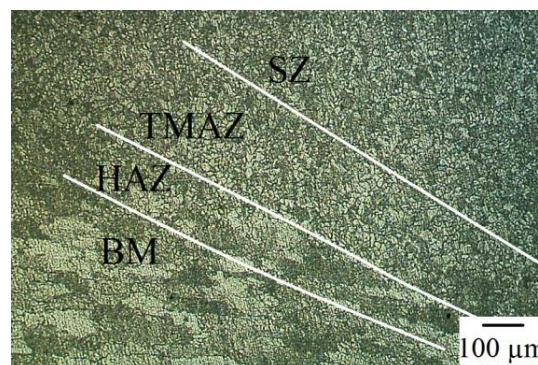


شکل (۷) مقایسه سه نمونه جوشکاری شده با پارامترهای مختلف و ریزساختار آنها

۲-۳- خواص کششی

در شکل (۷) همچنین نتایج استحکام کششی نمونه های حاصل از فرایند FSW در سرعت دورانی و پیشروی های مختلف و قطرهای پین و شانه های مختلف آمده است. همانگونه که مشاهده می شود بالاترین استحکام کششی

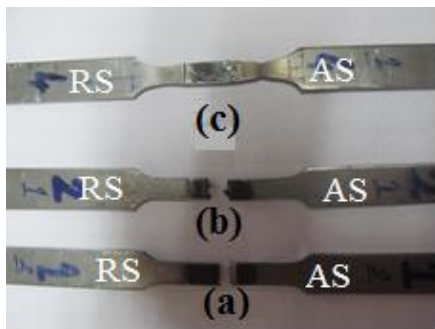
نیست. لذا در ابتدا به بررسی تاثیر جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی بر ریزساختار اتصال فولاد EN10130 پرداخته می شود. شکل (۶) ریز ساختار نمونه جوشکاری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی را نشان می دهد. در این شکل، سه ناحیه (۱) ناحیه اغتشاشی، (۲) متاثر ترمومکانیکی^۱ و (۳) متاثر از حرارت دیده می شود. در ناحیه اغتشاشی اندازه دانه در مقایسه با فلز پایه به شدت ریز و همگن شده اند. این پدیده ناشی از تاثیر تبلور مجدد است که به دنبال تغییر شکل پلاستیکی شدید در این منطقه رخ داده است. دانه ها در ناحیه TMAZ مشابه فرایند های شکل دهی سرد، دارای جهت گیری خاصی هستند که در مرز بین SZ و ناحیه HAZ به شکل طولی کشیده شده اند.



شکل (۶) ریزساختار مختلف نواحی جوش در نمونه جوشکاری شده توسط پارامترهای بهینه شامل BM, HAZ, TMAZ, SZ

ریزساختار فولاد EN10130 و منطقه اغتشاش یافته نمونه های جوشکاری شده با پارامترهای مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش یافته کاهش یافته است، بطوری که اندازه دانه در ساختار اولیه ورق حدودا ۲۰۰ میکرومتر است. این در حالیست که اندازه دانه در منطقه اغتشاش یافته بطور میانگین به ۲۰ میکرومتر می رسد. با توجه به اینکه در حین انجام FSW ماده دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می شود، این عمل باعث افزایش عیوب کریستالی خواهد شد. اصطکاک بین ابزار و قطعه کارها باعث افزایش دما در ناحیه اغتشاش می شود که این پدیده

^۱ Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)



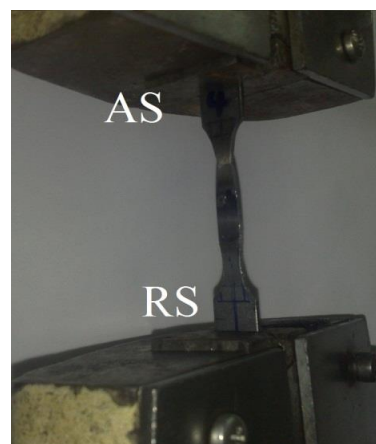
شکل (۹) مقایسه سه نمونه جوشکاری شده با پارامترهای مختلف و محل شکست آن‌ها

۳-۳- ریزسختی

منحنی توزیع سختی روی مقطع نمونه های جوشکاری شده در شکل (۱۰) نشان داده شده لازم به ذکر است که میانگین سختی اندازه گیری شده ورق فولادی برابر ۹۱/۵ و یکرز بوده است. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می شود که سختی در هر سه نمونه جوشکاری شده نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است که علت آن تحولات ریزساختاری صورت گرفته در حین فرایند جوشکاری می باشد که سبب کاهش شدید اندازه دانه در ناحیه جوش شده است. در اتصال ایجاد شده در نمونه (a) به روش FSW حداقل محدوده سختی (88-90 HV) در منطقه HAZ در قسمت AS اندازه گیری شد که با موقعیت شکست اتصال در آزمون کشش مطابقت دارد. همچنین در نمونه (b) حداقل محدوده سختی (90-93 HV) در منطقه BM در قسمت AS تعیین شد که با محل شکست نمونه در آزمون کشش همخوانی ندارد. در نمونه (c) که پارامترهای فرایند FSW توسط نرم افزار DOE از روش باکس بنکن تحت رویه مونتگومری، طراحی آزمایش شده اند و حالت بهینه بدست آمده است، حداقل محدوده سختی (90-93 HV) در منطقه فلز پایه^۴ در قسمت پیش رونده^۵ تعیین شد که با محل شکست نمونه در آزمون کشش همخوانی دارد (شکل (۹)).

معادل ۳۰۵ مگاپاسکال است که در سرعت های دورانی و پیشروی به ترتیب ۸۷۰ دور بر دقیقه و ۸۰ میلیمتر بر دقیقه و قطر پین و شان به ترتیب ۴ و ۱۴ میلیمتر حاصل شد. لازم به ذکر است که استحکام کششی فلز پایه ۲۹۰ مگاپاسکال است. با توجه به شکل (۷) و با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده می شود که استحکام کششی نمونه (a) ۶۲٪ فلز پایه و استحکام کششی نمونه (b) ۵۳٪ فلز پایه است. در حالی که استحکام کششی نمونه (c) که با طراحی آزمایش پارامترهای آن بهینه سازی شده است، ۱۰۵٪ فلز پایه است. این نتایج نشان می دهد که اولاً اتصال از طریق جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی از استحکام بالایی برخوردار است. ثانیاً طراحی آزمایش پارامترهای جوشکاری FSW توسط نرم افزار DOE از طریق باکس و بنکن تحت رویه مونتگومری^۱ نتیجه مطلوبی را ایجاد می کند.

موقعیت شکست اتصال در نمونه های (a) و (b) دقیقاً در جوش است و موقعیت شروع گلوئی و شکست در نمونه (c) در فلز پایه است. این موضوع در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است که سطح پسرونده^۲ و پیشرونده^۳ به ترتیب با RS و AS مشخص شده اند. از مقایسه نتایج شکل (۹) و (۸) با شکل (۷) مشاهده می شود مقدار استحکام کششی ذکر شده با محل شکست هم خوانی کامل دارد.



شکل (۸) نمونه کشش (c)، جوشکاری شده با پارامترهای بهینه

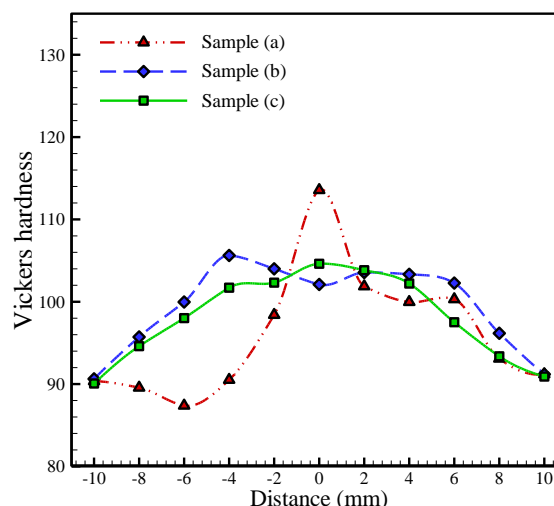
^۴ Base Metal (BM)
^۵ Advancing Side (AS)

^۱ Montgomery
^۲ Retreating side
^۳ Advancing side

جوش حاصل از کیفیت مناسبی برخوردار نیست. در این شرایط حالت بهینه ای وجود دارد که توسط طراحی آزمایش بدست آمد.

۵- فهرست علائم

BM	فلز پایه
DOE	طراحی آزمایش
FSW	جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی
HAZ	منطقه متأثر حرارتی
SZ	منطقه اغتشاشی
TMAZ	منطقه متأثر ترمومکانیکی



شکل (۱۰) نتایج نمونه های ریزسختی

مراجع:

- [1] Burak M., Meran C., The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels, *Materials and Design*, 33, 2012, pp. 376–383.
- [۲] محمدی زهرانی ا، طاهری م، زمردیان ا، ارزیابی قابلیت شکل پذیری ورق های فولادی کم کربن St14 در تولید بدنه خودرو، مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد واحد شهر مجلسی، شماره ۱، ۱۳۸۶، ص ۸۳–۸۹ (مقاله نشریه).
- [۳] غفارپور م، بررسی فرم پذیری ورق های جوش خورده- ترکیبی آلیاژهای نامتجانس آلومینیوم جوشکاری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی (FSW)، دانشگاه امیر کبیر، ۱۳۹۰.
- [4] Sabooni S., Karimzadeh F., Enayati M.H., Ngan A.H.W., Friction-stir welding of ultrafine grained austenitic 304L stainless steel produced by martensitic thermomechanical processing, *Materials & Design*, 76, 2015, pp. 130–140.
- [5] Husain Md.M., Sarkar R., Pal T.K., Prabhu N., Ghosh M., Friction Stir Welding of Steel: Heat Input, Microstructure, and Mechanical Property Co-relation, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 2015, pp. 3673-3683.
- [6] Jafarzadegan M., Feng A.H., Abdolazadeh A., Saeid T., Shen J., Asadi H., Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel, *Materials characterization*, 74, 2012, 28-41.
- [7] Ghosh M., Kumar K., Mishra R.S., Friction stir lap welded advanced high strength steels: Microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, 528, 2011, pp. 8111– 8119

۴- نتیجه گیری

- در این پژوهش بهینه سازی پارامترهای جوشکاری فولاد کم کربن EN10130 به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی انجام شد و نتایج به شرح زیر به دست آمد:
- در اثر جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی فولاد اولیه که دارای دانه های بزرگ و خشن به طول متوسط ۲۰۰ میکرومتر، که ناشی از کار گرم بود، به ریزساختاری شامل دانه های ریز و هم محور تبدیل شد.
 - با بهینه سازی پارامترها، توسط نرم افزار DOE استحکام کششی جوش به بیش از استحکام فلز پایه می رسد.
 - در شرایطی که سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار بیش از اندازه انتخاب شود، حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار بالاست، در نتیجه ذرات کاربید تنگستن وارد حوضچه جوش می شود و میزان سختی فلز جوش بالا می رود و میزان انعطاف پذیری جوش کاهش می یابد.
 - با کاهش سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار، حرارت ورودی کاهش پیدا می کند و اتصالی با کیفیت مناسب حاصل نمی شود. از طرفی هم با افزایش سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار حرارت ورودی بیش از اندازه افزایش پیدا می کند. بنابراین

- [8] Cho H.H., Han H.N., Hong S.T., Park J.H., Kwon Y.J., Kim S.H., Russell J., Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 528, 2011, pp. 2889–2894.
- [9] A. Falahi, A. Eghbali, "Evaluating the Parameters Affecting the Distribution of Thickness in Cup Deep drawing of ST14 Sheet", Mech. Dep. Amirkabir University of Technology, ISBN: 978-1-61804-115-9.
- [10] Chung Y.D., Fujii H., Ueji R., Tsuji N., Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, *Scripta Materialia*, 63, 2010, pp. 223–226.
- [11] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material", E8, Vol. 03.01, 2004.
- [12] Ahn B.W., Choi D.H., Kim D.J., Jung S.B., Microstructures and properties of friction stir welded 409L stainless steel using a Si3N4 tool, *Materials Science and Engineering A*, 532, 2012, pp. 476–479.
- [13] Fujii H., Cui L., Tsuji N., Maeda M., Nogi K., Friction stir welding of carbon steels", *Materials Science and Engineering A*, 42, 2006, pp. 50–57.
- [14] G.E.P. Box, K.B. Wilson, "On The Experimental Attainment of Optimum Conditions" *J. of the Royal Statistical Society. Series B* 13. pp. 1–45, 1951.
- [15] D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments" Sixth Edition. *John Wiley & Sons. Inc. ISBN. 0-471-48735-X*. 2005.
- [16] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J. Needham, M. Murch, P. Templesmith, C. Dawes, "Friction stir butt welding", *International Patent Application. No. PCT/GB92/02203*. December. 1991.
- [۱۷] نوروزی س، شاکری م، کریمی ن، مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم به روش روش اصطکاکی-اغتشاشی در هوا و زیر آب، سیزدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی، تهران، ۱۳۹۲، ۱۴۶-۱۵۲.

