



بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هم جنس

آلیاژ فولاد کربنی CK45

کاظم زوجی، کارشناس متالورژی، ^۱k.zavichi@gmail.com
نوید مشتاقی یزدانی، دکتری مکترونیک، ^۲navid.moshtaghi@ut.ac.ir
حامد بابایی، کارشناس ارشد متالورژی، ^۳h.babaie@gmail.com

چکیده

در این مقاله با بررسی و مطالعات دقیق بر روی عوامل تاثیر گذار بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حذف عوامل با تاثیر ناچیز، تعیین سطوح مناسب برای هر عامل تاثیر گذار به منظور دستیابی به یک سطح بهینه که در آن جوش مورد نظر دارای خواص مکانیکی مناسب کاربرد مذکور باشد و در نهایت با استفاده از روش تاگوچی به منظور بهینه سازی طراحی آزمایش و کاهش تعداد آزمایشات و هزینه، آزمایشات مناسب برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هم جنس CK45 طراحی گردید. پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی موفق، اعوجاج در قطعات جوشکاری شده، استحکام کششی جوش و ریزساختار منطقه جوش مورد بررسی قرار گرفت و از تجمیع نتایج بدست آمده، پارامتر بهینه برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی هم جنس آلیاژ فوق، تعیین گردید

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، CK45، پارامتر بهینه

۱- مقدمه

فولاد CK45 فولادی غیرآلیاژی است که در ساخت ابزارآلاتی مانند بوش، شفت، چرخ دنده و ... به کار میرود. فولادهای زنگ نزن آستنیتی نماینده بزرگترین گروههای متداول از فولادهای زنگ نزن بوده و در تناژهای بالاتر از هر گروه دیگر تولید می شوند. آنها دارای مقاومت به خوردگی خوب در اکثر محیطها می باشند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای استحکام هایی برابر با فولادهای نرم بوده و نمی توان آنها را به روش استحاله ای سخت نمود. خواص ضربه ای خوب این آلیاژها در درجه حرارت پایین، آنها را در کاربردهای برودتی مفید ساخته است. جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که بوسیله انجمن جوشکاری انگلستان در سال ۱۹۹۱ ارائه شد و به دلیل دمای کمتر فرآیند نسبت به جوشکاری های ذوبی رایج، یک روش بالقوه است [۱]. این روش برای آلیاژهای آلومینیوم و فلزاتی که جوشکاری ذوبی آن ها مشکل و یا غیر ممکن است به طور فزاینده ای استفاده می شود. در اتصال فلزات به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی پارامترهای زیادی از جمله سرعت چرخشی، سرعت

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ دانشگاه تهران

^۳ دانشگاه حکیم سبزواری



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن

۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز

2nd International Conference & 6th National Conference on

Materials, Metallurgy, Mining

Feb 15, 2023



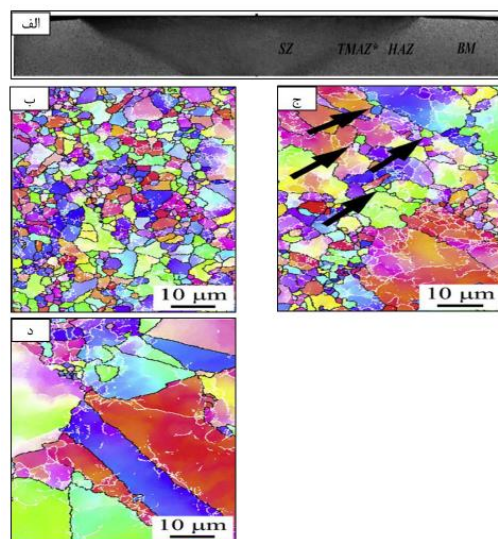
خطی، هندسه پین، ابعاد پین و شانه ابزار و ... بر ریز ساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش تاثیر گذار می باشد. برای دست یابی به خواص مکانیکی مناسب، کلیه پارامتر ها باید در مقدار بهینه خود مورد استفاده قرار گیرند. زیرا مقدار نامناسب پارامتر ها باعث بروز مشکلاتی نظیر تشکیل عیوب؛ انحلال ذرات رسوب، رشد دانه و در نهایت کاهش خواص مکانیکی اتصال خواهد شد [۲]. از این رو به منظور بر طرف نمودن این محدودیت ها تحقیقات بسیاری بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همجنس و غیر هم جنس آلیاژهای آهنی، فولادهای کم کربن، با کربن متوسط و درصد کربن بالا، فولادهای دو فازی و فولادهای ضد زنگ صورت گرفته است. بنابراین استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای این دسته از آلیاژها نسبتاً جدید است و به دلیل عیوب ساختاری کمتر این روش نسبت به روش های ذوبی و مقرون به صرفه بودن فرآیند جوشکاری و کاهش نیاز به عملیات های حرارتی و مکانیکی پس از جوشکاری در این روش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها توجه زیادی را به خود جلب نموده است. از سویی دیگر قابلیت اعمال کرنش های بالا، حرارت بالای حاصل از اصطکاک در حین فرآیند و در نتیجه سیلان و حالت خمیری ایجاد شده ناشی از ماهیت این فرآیند، منجر به وقوع تبلور مجدد و استحاله های فازی می شود که متعاقباً منجر به ایجاد ساختاری ریزدانه با خواص مکانیکی مطلوب و تنظیم پایداری آستنیت می گردد که در نهایت تمامی این عوامل باعث دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب تری از جوش می گردد. در جوشکاری ذوبی به علت دمای بسیار بالا و ذوب فلز در ناحیه جوش، جدایش و یا حتی تبخیر مواد آلیاژی صورت می گیرد و با توجه به تأثیر شدید این موضوع بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژها، استفاده از جوشکاری مقاومتی، تخریب خواص و حتی حذف مزیت رقابتی این آلیاژها را در پی خواهد داشت. از همین رو بررسی جوشکاریهای حالت جامد به خصوص فرایند اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این دسته از فولادها بسیار حائز اهمیت است [۳-۴]. جهت انجام جوشکاری، این ورق ها به صورت جفت و هم سطح بر روی میز دستگاه فرز قرار گرفته و توسط فیکسچرهای ثابت می شوند. در مجموع می توان گفت که میزان گرمای تولید شده بر اثر دوران ابزار یک حالت بهینه دارد. یعنی اگر گرمای تولید شده بر اثر دوران ابزار به اندازه کافی نباشد امکان تولید اتصال جوشی مناسب به علت کم بودن دمای مواد جریان پیدا کرده کم خواهد شد؛ بنابراین جوش ایجاد شده از نظر خواص استحکامی افت می کند [۵-۷]. با افزایش سرعت پیشروی میزان انتقال حرارت ناحیه جوش به قطعه کار کاهش یافته، بنابراین اثر فرایند جوشکاری در ناحیه کوچکتري از کناره های جوش مشاهده خواهد شد. از طرف دیگر سرعت فرایند بالا رفته و اعوجاج ایجاد شده کاهش خواهد یافت [۷-۸]. تغییر در زاویه ابزار نیز تاثیر بسزایی در مدل اغتشاش ماده دارد و شیوه اغتشاش در ناحیه مرکز جوش را دستخوش تغییر قرار می دهد. از تغییر در زاویه ابزار هنگامی استفاده می شود که تنظیم پارامترهای سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار امکان اغتشاش مناسب در ماده و آلیاژ مورد نظر را نمی دهد. لذا با تغییر در زاویه ابزار و در نتیجه تغییر در میزان تنش وارد شده به ماده در قسمت های پیشرو و پسرو و در نهایت تغییر میزان اغتشاش، می توان کمبود اغتشاش مناسب را جبران نمود. در میان ویژگی های هندسی مختلف یک ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، قطر شولدر ابزار از مهم ترین پارامترهای ابزار می باشد. بخش عمده حرارت تولید شده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط شولدر ابزار تولید می شود [۹-۱۰]. پیشانی ابزار باعث القای سیلان مواد پلاستیک شده می شود و از فرار مواد پلاستیک شده از قطعه کار در حین جوشکاری جلوگیری می کند. هر چه قطعه کار استحکام بیشتری داشته باشد، شولدر ابزار بزرگتری برای تولید حرارت به منظور نرم شدن کافی قطعه کار و سهولت سیلان ماده در اطراف پین ابزار نیازمند است. همچنین قطر شولدر بزرگتر نیازمند توان دستگاه بالاتر است. به منظور دستیابی به عمر طولانی ابزار، شولدر ابزار باید باعث نرم شوندگی کافی شود و سیلان مواد قطعه کار را درحالی که نیازمند توان و گشتاور پایینی است، تسهیل کند. عمر ابزار به وسیله تنش سیلان و دمای تغییر شکل ماده در نزدیک ابزار تحت تأثیر قرار می گیرد. قطر شولدر بهینه با افزایش سرعت دورانی ابزار کاهش می یابد. برای سرعت های دورانی بالاتر، قطر شولدر کوچکتري برای تأمین حرارت کافی به منظور نرم کردن ماده و سیلان کافی مورد نیاز است. اما می توان از قطر شولدر



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



بزرگتری (برای همان منظور) در سرعت‌های دورانی پایین‌تر استفاده کرد. هرچه قطر شولدر ابزار در مقایسه با قطر شولدر بهینه افزایش می‌یابد، سرعت نسبی ابزار و قطعه کار افزایش می‌یابد، که منجر به لغزش بیشتر می‌شود. با افزایش لغزش، چسبندگی بین ابزار و قطعه کار کمتر می‌شود. توان لازم برای انجام دادن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش قطر شولدر ابزار به علت افزایش در مقدار کار اصطکاکی لغزشی، افزایش می‌یابد. همچنین شکل هندسی ابزار نیز در چگونگی الگوی جریان ماده و اغتشاش تاثیر بسزایی در خواص جوش بدست آمده دارد [۹-۱۲]. در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها به دلیل اعمال نرخ کرنشهای شدید در دمای بالا، استحاله‌های فازی، تبلور مجدد و در کنار آن رشد دانه به شدت رخ می‌دهد و تحولات ریزساختاری بسیار پیچیده‌ای را در نمونه فراوری شده ایجاد می‌کند [۱۳]. به صورت کلی ناحیه‌ی فراوری شده را می‌توان به چهار ناحیه‌ی اغتشاش یافته، ناحیه متاثر از عملیات حرارتی- مکانیکی، ناحیه متاثر از حرارت و فلز پایه تقسیم کرد. در شکل ۱-الف درشت ساختار این نواحی نشان داده شده است. در ناحیه اغتشاش یافته، بیشترین دما و نرخ کرنش به ماده اعمال می‌شود که منجر به وقوع رخداد تغییرات ریزساختاری پیچیده‌ای مانند تبلور مجدد شدید و استحاله‌های فازی در این ناحیه می‌شود (شکل ۱-ب) [۱۴-۱۵]. در نتیجه وقوع این رخدادها و ریزدانه‌ی شدید، معمولاً در درشت ساختار، این ناحیه تیره‌تر از بقیه نواحی مشاهده می‌شود. در مجاورت این ناحیه، ناحیه متاثر از عملیات حرارتی- مکانیکی وجود دارد که در آن مقدار کرنش اعمالی و دمای قطعه کار کمتر از ناحیه اغتشاش یافته است و تحولات ریزساختاری نام برده به شدت کمتری نسبت به ناحیه اغتشاش یافته رخ می‌دهد. در این ناحیه هر دو عامل دما و کرنش به صورت گرادینانی با فاصله از منطقه اغتشاش یافته کاهش پیدا می‌کند که در نتیجه در آن ناحیه‌ی بالایی (نزدیک به ناحیه اغتشاش یافته)، منطقه دانه‌های تبلور مجدد یافته به صورت جزیی و در ناحیه پایینی (ناحیه دور تر از ناحیه اغتشاش یافته)، دانه‌های تغییر شکل یافته در ساختار مشاهده می‌شود (شکل ۱-ج). با فاصله گرفتن از ناحیه متاثر از عملیات حرارتی- مکانیکی، اثر کرنش اعمالی حذف می‌شود، گرچه گرادینان حرارتی همچنان باقی می‌ماند. وجود این گرادینان، منجر به ایجاد رشد دانه و همچنین افزایش کسر دوقلوبی‌های آنیلی در ناحیه متاثر از دما می‌شود. در نتیجه در اندازه دانه‌های بزرگتر از ساختار فلز پایه مشاهده می‌شود (شکل ۱-د) [۱۶-۱۷].



شکل ۱- تصویر ریزساختاری یک فولاد پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



سعید و همکارانش [۱۸]، تاثیر سرعت پیشروی ابزار را بر منطقه اتصال و خواص جوش یک فولاد دوفازی ضد زنگ مورد بررسی قرار دادند. بر طبق تحقیقات آن‌ها، با ثابت در نظر گرفتن دیگر متغیرهای فرآیند، سرعت پیشروی ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه منجر به جوشکاری موفق گردیده و سرعت پیشروی ابزار ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه باعث ایجاد فرورفتگی در منطقه اتصال شده است. در تحقیق دیگری فوجی [۱۹] و همکارانش با به بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سه فولاد IF، S12C و S35C پرداختند. آن‌ها برای جوشکاری از ورق‌هایی با ضخامت ۱.۶ میلی‌متر استفاده کردند و پس از انجام جوشکاری با انجام سختی-سنجی از منطقه جوش، به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری بر سختی جوش پرداختند. آن‌ها برای این کار سرعت چرخش ابزار را در ۴۰۰ دور بر دقیقه ثابت نگه داشته و سرعت پیشروی ابزار را بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تغییر دادند. آن‌ها همچنین از زاویه ابزار با سطح ورق ۳ درجه برای اغتشاش بهتر استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که تفاوت ترکیب شیمیایی فولادها و لذا تغییرات ریزساختاری متفاوت آن‌ها حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به تفاوت در روند تغییرات سختی جوش با تغییر پارامترهای جوشکاری می‌گردد. لذا دو فولاد IF و S12C با افزایش سرعت پیشروی ابزار سختی جوش افزایش پیدا می‌کند اما در فولاد S35C سختی فولاد با افزایش سرعت پیشروی ابزار در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. سعید [۱۸] و همکارانش با بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق فولاد دوفازی ضد زنگ SAF220 با ضخامت ۲ میلی‌متر به اثر تغییر سرعت پیشروی ابزار از ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تا ۲۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در سرعت چرخش ابزار ثابت ۶۰۰ دور بر دقیقه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی ابزار در نمونه از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، استحکام کششی جوش و سختی جوش افزایش یافته و در سرعت پیشروی ۲۵۰ میلی‌متر بر دقیقه به علت ایجاد عیب تونلی در جوش استحکام و سختی به شدت افت کرده است. هدف از انجام این پروژه یافتن شرایطی بهینه از پارامترهای موثر برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق فولادی CK45 به CK45 می‌باشد تا در آن به بالاترین میزان استحکام جوش و کم‌ترین عیوب دست‌یافت

۲- روش تحقیق

اولین گام در این پروژه طراحی یک آزمایش بهینه است که در آن با در نظر گرفتن سطوح مناسب برای هر پارامتر موثر در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و استفاده از یک روش مناسب با اطمینان بالا برای طراحی آزمایش، تعداد آزمایش‌ها را به حداقل برساند و به نتیجه رسیدن را تسریع کند. لذا با توجه به مطالعات جامع صورت گرفته، سه پارامتر سرعت چرخش ابزار، سرعت پیشروی ابزار و مدت زمان نگهداری ابزار در نمونه به عنوان سه پارامتر تاثیرگذار بر این فرآیند در نظر گرفته شد. برای دو پارامتر اول ۴ سطح و برای پارامتر مدت زمان نگهداری ابزار در نمونه ۲ سطح انتخاب گردید. این سطوح عبارتند از ۴ سرعت ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه برای پارامتر سرعت چرخش ابزار، ۴ سرعت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای سرعت پیشروی ابزار و ۲ مدت زمان نگهداری ۵ و ۱۵ ثانیه برای زمان نگهداری ابزار در نمونه. پارامترهای دیگر در این فرآیند همچون شکل هندسی ابزار و زاویه ابزار با سطح نمونه و غیره تاثیر بسزایی در فرآیند جوشکاری نداشته و لذا برای جلوگیری از پیچیدگی آزمایشات و تحلیل نتایج، ابزار با شکل هندسی ساده با پین استوانه‌ای شکل به طول ۱.۵ میلی‌متر، قطر پین ۴ میلی‌متر و قطر شانه ابزار ۲۰ میلی‌متر بر طبق دستگاه مورد استفاده انتخاب گردید. هرچند که به غیر از طول پین که برابر با ۱.۵ میلی‌متر می‌باشد، باقی شرایط ابزار همچون قطر پین و قطر شانه ابزار می‌تواند بر حسب دستگاه مورد استفاده برای جوشکاری تغییر کند و تاثیر بسزایی در فرآیند جوشکاری ندارد. جنس ابزار نیز با توجه به جوشکاری ورق فولادی، کاربرد تنگستن انتخاب گردید.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
 ۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



در نهایت با مشخص شدن شرایط و پارامترهای جوشکاری، برای بهینه‌سازی طراحی آزمایش از روش تاگوچی استفاده شد. با توجه به اینکه ۲ پارامتر موثر با ۴ سطح و ۱ پارامتر موثر با ۲ سطح مختلف برای فرآیند جوشکاری انتخاب شد، در حالت عادی تعداد آزمایش‌ها برابر با ۳۲ خواهد بود اما با استفاده از روش تاگوچی و استفاده از آرایه متعامد L16 تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را از ۳۲ عدد به ۱۶ عدد کاهش دادیم. برای طراحی این آزمایش‌ها از نرم افزار minitab استفاده گردید. پارامترها و شرایط جوشکاری در جدول ۱ و ۱۶ آزمایش طراحی شده توسط روش تاگوچی در جدول ۲ آمده است. ترکیب شیمیایی ورق‌های CK45 تهیه شده در جدول ۳ قابل مشاهده است

جدول ۱- پارامترها و شرایط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

اندازه ابزار			پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی		
سرعت چرخش ابزار (R)	سرعت پیشروی ابزار (T)	مدت زمان نگهداری ابزار در نمونه (t)	طول پین	قطر پین	قطر شانه
۸۰۰ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه	۲۰۰ تا ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه	۵ تا ۱۵ ثانیه	۱.۵ میلی‌متر	متغیر بسته به دستگاه انجام تست	متغیر بسته به دستگاه انجام تست

جدول ۲- شرایط آزمایش طراحی شده توسط روش تاگوچی با آرایه متعامد L16

شرایط آزمایش			شماره آزمایش	شرایط آزمایش			شماره آزمایش
t	T	R		t	T	R	
۱۵	۵۰	۶۰۰	۹	۵	۵۰	۲۰۰	۱
۱۵	۱۰۰	۶۰۰	۱۰	۵	۱۰۰	۲۰۰	۲
۵	۱۵۰	۶۰۰	۱۱	۱۵	۱۵۰	۲۰۰	۳
۵	۲۰۰	۶۰۰	۱۲	۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۴
۱۵	۵۰	۸۰۰	۱۳	۵	۵۰	۴۰۰	۵
۱۵	۱۰۰	۸۰۰	۱۴	۵	۱۰۰	۴۰۰	۶
۵	۱۵۰	۸۰۰	۱۵	۱۵	۱۵۰	۴۰۰	۷
۵	۲۰۰	۸۰۰	۱۶	۱۵	۲۰۰	۴۰۰	۸

جدول ۳- ترکیب شیمیایی ورق‌های CK45.

آلیاژ	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo
CK45	بالانس	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۶۱	۰/۱۹	<۰/۱



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



ورق CK45 تهیه شده با توجه به فیکسچر موجود برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و شرایط دستگاه فرز مورد استفاده، توسط دستگاه لیزر به قطعاتی با ابعاد ۳۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر برشکاری گردید. و سپس هر کدام از قطعات توسط دستگاه وایرکات به ورق‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر برش داده شد. در ابتدا زاویه ابزار با قطعه صفر درجه تنظیم گردد اما پس از جوشکاری به دلیل عدم اغتشاش مناسب در تمامی پارامترها، پارامترهای جوشکاری نسبت به گزارش قبلی اصلاح گردید و زاویه ابزار با قطعه در ۳ درجه تنظیم شد (شکل ۲) تا جوشکاری با موفقیت صورت گیرد.



شکل ۲- تنظیم زاویه فک دستگاه بر روی ۳ درجه

برای بررسی نمونه‌های جوشکاری شده تمامی نمونه‌ها به صورت A-B-C-D نامگذاری شد که در آن A نشان دهنده سرعت دورانی ابزار، B نشان دهنده سرعت پیشروی ابزار، C نشان دهنده مدت زمان نگهداری ابزار در نمونه و D نمایانگر زاویه ابزار می‌باشد. از فولاد St37 به عنوان صفحه پشتیبان استفاده گردید تا هم انتقال حرارت و خواص حرارتی نزدیکی به دو ورق مورد جوشکاری داشته باشد و همچنین از استحکام کافی برخوردار باشد تا حین جوشکاری تنش‌های حرارتی و مکانیکی را تحمل کرده و همچنین حین فروروی ابزار در ورق‌ها لهیده نگردد. از پوشش بسیار نازکی از گریس نسوز نیز فقط در زیر درز بین دو ورق استفاده گردید تا هم نقش روان کننده را بازی نکند و لذا لیز خوردگی ورق‌ها را در حین جوشکاری رخ ندهد و هم از جوش خوردگی ورق‌ها به صفحه پشتیبان جلوگیری نماید. پس از جوشکاری قطعات و تشخیص قطعات سالم و بدون هیچگونه عیب قابل تشخیص با چشم غیر مسلح، به بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر میزان اعوجاج ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در قطعات جوشکاری شده سالم پرداخته شد. سپس اعداد بدست آمده برای زاویه انحراف و فاصله انحراف نسبت به کوچکترین مقدار میانگین موجود نرماله شده و در جدول ۴، گزارش شده است.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی

مهندسی مواد، متالورژی و معدن

۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز

2nd International Conference & 6th National Conference on

Materials, Metallurgy, Mining

Feb 15, 2023

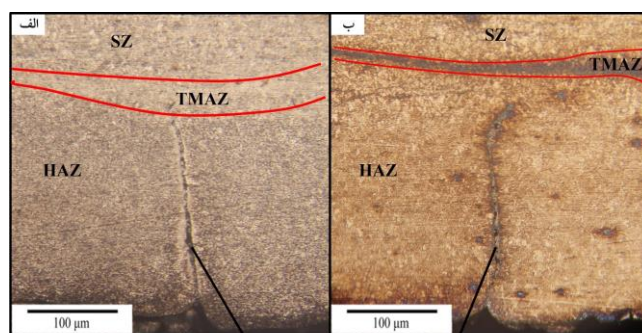


جدول ۴- زوایای انحراف و فاصله انحراف نمونه استخراج شده از قطعات جوشکاری شده سالم در پارامترهای فرآیند مختلف

قطعات	زوایای انحراف دو سر نمونه (درجه)	زاویه انحراف میانگین (درجه)	زاویه انحراف نرماله	فاصله انحراف (میلی متر)	فاصله انحراف میانگین (میلی متر)	فاصله انحراف نرماله
۳-۵-۲۵-۲۰۰	۰/۸۷۵ ۰/۹۲۲	۰/۸۹۹	۱/۷۸	۰/۲۰۶ ۰/۲۱۹	۰/۲۱۲۵	۱/۷۱
۳-۵-۵۰-۲۰۰	۰/۵۸۵ ۰/۵۸۵	۰/۵۸۵	۱/۱۶	۰/۱۵۲ ۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۱/۲۳
۳-۱۵-۱۰۰-۲۰۰	۰/۷۹۴ ۰/۸۴۴	۰/۸۱۹	۱/۶۲	۰/۱۹۹ ۰/۲۱۱	۰/۲۰۵	۱/۶۵
۳-۱۵-۱۵۰-۲۰۰	۱/۱۹۶ ۱/۲۷۲	۱/۲۳۴	۲/۴۴	۰/۳۱۶ ۰/۲۹۶	۰/۳۰۶	۲/۴۷
۳-۵-۲۵-۴۰۰	۰/۸۶۲ ۰/۸۱۰	۰/۸۳۶	۱/۶۶	۰/۲۰۱ ۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۱/۶۲
۳-۵-۵۰-۴۰۰	۰/۵۰۵ ۰/۵۵۵	۰/۵۳۰	۱/۰۵	۰/۱۲۵ ۰/۱۳۳	۰/۱۲۹	۱/۰۴
۳-۱۵-۲۵-۶۰۰	۰/۸۷۲ ۰/۸۹۵	۰/۸۳۳	۱/۶۵	۰/۲۰۵ ۰/۲۲۹	۰/۲۱۷	۱/۷۵
۳-۱۵-۵۰-۶۰۰	۰/۵۱۱ ۰/۴۹۹	۰/۵۰۵	۱	۰/۱۲۷ ۰/۱۲۱	۰/۱۲۴	۱
۳-۱۵-۲۵-۸۰۰	۰/۷۹۸ ۰/۸۰۸	۰/۷۵۳	۱/۴۹	۰/۱۹۴ ۰/۱۷۵	۰/۱۸۶	۱/۵۰

با توجه به اینکه قطعات جوشکاری شده بعضی از پارامترهای فرآیند رفتار کاملاً تردی از خود نشان داده و با توجه به این مسئله که قطعات بایستی نیازمند ترکیب مناسبی از استحکام و داکتیلیته هستند، ریزساختار و نمودار کشش این قطعات مورد بررسی قرار نگرفته و تنها علت رفتار ترد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین بررسی‌های ریزساختاری در این بخش به ۳ نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بر دقیقه معطوف شده است. برای بررسی رفتار کاملاً ترد برخی از قطعات جوشکاری شده در پارامترهای فرآیند مختلف و شباهت این رفتار در تمامی این قطعات، دو قطعه جوشکاری شده یکی در سرعت دورانی ۸۰۰ و دیگری در سرعت دورانی ۴۰۰ دور بر دقیقه انتخاب گردید. شکل ۳، تصویر میکروسکوپ نوری این دو نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داده شده قابل مشاهده است، ریزترکی در این نمونه‌ها دقیقاً در ناحیه HAZ وجود دارد که از سطح پایینی قطعه شروع شده و تا ابتدای ناحیه TMAZ ادامه پیدا کرده است. به این اتفاق ترک خوردگی ناحیه متأثر از حرارت گفته می‌شود. اصطلاحاً به آن ترک سرد نیز گفته می‌شود زیرا این ترک حین سرمایش رخ می‌دهد. از دلایل رخداد این ترک، سرعت سرمایش بالا، تنش‌های پسماند بالا، نفوذ

هیدروژن به قطعه حین جوشکاری و ایجاد تردی هیدروژنی و غیره می‌باشد. شاید یک آلیاژ اثر هر کدام از این دلایل بالا را به تنهایی تحمل کند، اما وقتی تمیعی از دلایل بالا رخ می‌دهد، مقدار تنش از حد تحمل آلیاژ مورد جوشکاری فراتر رفته و ترک خوردگی ناحیه متأثر از حرارت رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان دریافت که دلیل رفتار ترد قطعات جوشکاری شده در برخی از پارامترهای فرآیند ناشی از پدیده ترک خوردن ناحیه متأثر از حرارت می‌باشد. بنابراین جوش این قطعات به دلیل حضور ریزترک در ناحیه HAZ، ناسالم بوده و این پارامترها برای جوشکاری هم‌جنس CK45 به CK45 مناسب نمی‌باشد.



ترک خوردگی ناحیه متأثر از حرارت

شکل ۳- تصویر ریزساختاری از حضور ریز ترک در ناحیه HAZ دو قطعه الف) ۳-۱۵-۲۵-۸۰۰ و ب) ۳-۵-۲۵-۴۰۰

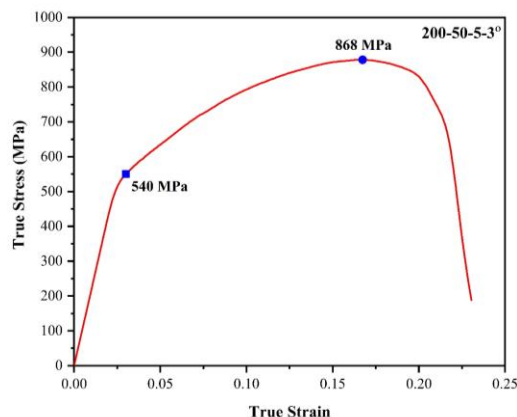
حال به بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر استحکام کششی قطعات جوشکاری شده سالم پرداخته شده است. به این منظور، نمونه کشش مینیاتوری از مرکز قطعات جوشکاری شده استخراج گردید. پس از سنباده‌زنی نمونه‌های کشش مینیاتوری به جهت حذف هرگونه عامل سطحی موثر بر خواص کششی قطعات جوشکاری شده، تست کشش بر روی نمونه‌های کشش انجام شد. نرخ کرنش انتخاب شده برای تست کشش، ماکزیمم نرخ کرنش ممکن (با توجه به محدودیت‌های دستگاه کشش) برابر با ۰/۰۵ بر ثانیه انتخاب گردید. در این نرخ کرنش سرعت دور شدن دو فک دستگاه از یکدیگر برابر با ۲۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌شود که برای یک نمونه کشش مینیاتوری سرعت زیادی محسوب می‌شود. پس از انجام تست کشش داده‌های بدست آمده به صورت نمودارهای تنش-کرنش حقیقی و نرخ کارسختی-کرنش حقیقی توسط نرم‌افزار Origin Pro رسم گردید.

۲-۱- تست کشش قطعه ۳-۵-۲۰۰

شکل ۴، نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ابزار ۵۰ میلی-متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۴ قابل مشاهده است این قطعه خواص کششی بسیار خوبی را از خود به نمایش گذاشته است به طوری که استحکام تسلیم برابر با ۵۴۰ مگاپاسکال، استحکام کششی ۸۶۸ مگاپاسکال بوده و درصد ازدیاد طولی برابر با ۲۳ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان دید که جوشکاری در پارامترهای فوق، نه تنها منجر به افزایش استحکام کششی در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال نسبت به استحکام کششی معمول آلیاژ CK45 شده بلکه این افزایش استحکام، منجر به کاهش درصد ازدیاد طول آن نسبت به ماکزیمم درصد ازدیاد طول معمول آلیاژ CK45 که برابر با (۲۴٪) نشده است.

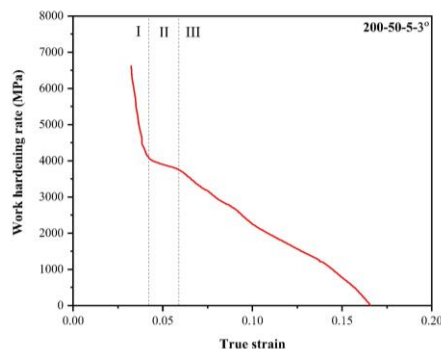


دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۲۰۰-۵۰-۵-۳

برای بررسی بهتر این موضوع، نمودار کارسختی بر حسب کرنش قطعه مذکور رسم شد. شکل ۵، نشان‌دهنده نمودار کارسختی نمونه جوشکاری شده در پارامترهای فرآیند مذکور است. نمودار کارسختی بر حسب کرنش از بعد از ناحیه الاستیک رسم شده است. همانطور که از شکل ۵ قابل مشاهده است، نمودار کارسختی قطعه مذکور به سه ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه یک نشان‌دهنده کاهش نرخ کارسختی با افزایش کرنش است که بیانگر کاهش توانایی ماده در کارسخت شدن می‌باشد. ناحیه دو، نشان‌دهنده تغییر شیب شدید ناگهانی نمودار و یک ناحیه اقیباً خطی است که در آن توانایی ماده در کارسخت شدن با افزایش کرنش تقریباً ثابت باقی‌مماند. در نهایت ناحیه سه، همانند ناحیه یک کاهش نرخ کارسختی با افزایش کرنش را تا کرنش شکست نشان می‌دهد. آنچه که مهم است، اتفاقی است که در ناحیه دو در ریزساختار ماده حین کشش رخ می‌دهد. ناحیه دو بیانگر رخداد یک اتفاق دینامیک در نمونه است. به طور معمول این اتفاق را به وقوع تحول مارتنزیتی حین تغییر فرم پلاستیک مرتبط میدانند و به آن پلاستیسیتی القا شده با کرنش گفته می‌شود. این تحول مارتنزیتی در دانه‌های آستنیتی ناپایدار ریزساختار رخ می‌دهد. این تحول استنیت به مارتنزیت حین کرنش، منجر به افزایش استحکام همزمان با افزایش درصد ازدیاد طول می‌شود.



شکل ۵- نمودار نرخ کار سختی-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۲۰۰-۵۰-۵-۳.

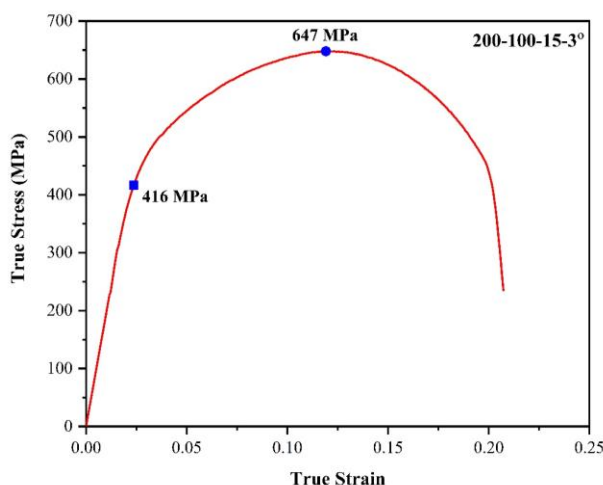


دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



۲-۲- تست کشش قطعه ۳-۱۵-۱۰۰-۲۰۰

شکل ۶، نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ابزار ۱۰۰ میلی-متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۶ قابل مشاهده است این قطعه خواص کششی خوبی را از خود به نمایش گذاشته است به طوری که استحکام تسلیم برابر با ۴۱۶ مگاپاسکال، استحکام کششی ۶۴۷ مگاپاسکال بوده و درصد ازدیاد طولی برابر با ۲۱ درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که سطح استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه نسبت به نمونه قبلی کاهش شدید یافته است. برای بررسی این موضوع نمودار نرخ کارسختی بر حسب کرنش حقیقی نمونه مذکور رسم گردید (شکل ۷).

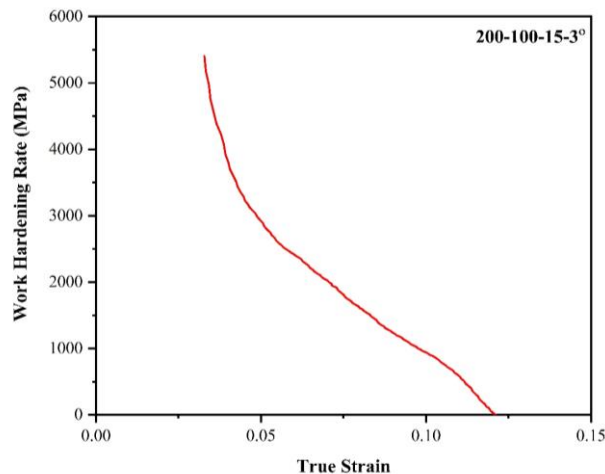


شکل ۶- نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۳-۱۵-۱۰۰-۲۰۰

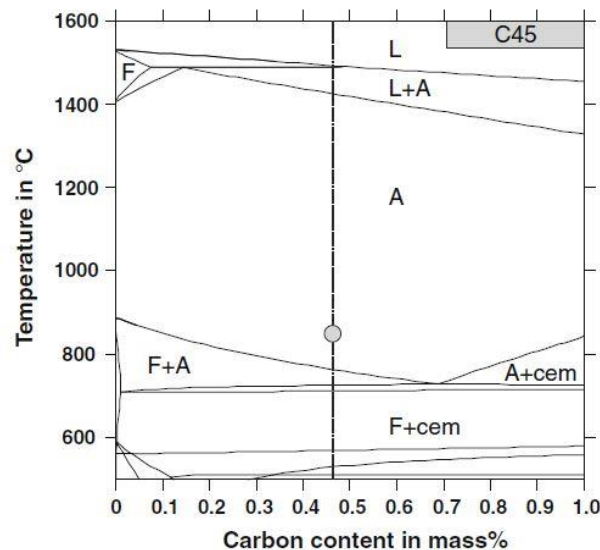
همانطور که از شکل ۷ مشخص است، نمودار کارسختی نمونه مذکور تنها یک ناحیه داشته و نرخ کارسختی با افزایش کرنش با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. لذا حذف ناحیه ۲ در این نمونه نسبت به نمونه قبلی را می‌توان علت کاهش سطح استحکامی و کاهش درصد ازدیاد طول این نمونه دانست. عدم حضور آستنیت باقیمانده در این نمونه و عدم رخداد تحول آستنیت باقیمانده به مارتنزیت حین کرنش در این نمونه را می‌توان به کاهش حرارت ورودی نسبت به نمونه گذشته دانست. آستنیت باقیمانده در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر اثر رسیدن دمای قطعه به دمای حدود ۷۰۰ درجه در ناحیه فریت+آستنیت دیاگرام فازی آلیاژ CK45 (شکل ۸) و سپس سرمایش سریع آن پس از جوشکاری است. به اینصورت بخشی از آستنیت بسته به سرعت سرمایش مارتنزیت می‌شود که این مارتنزیت در حین جوشکاری تمپر شده و به فریت و کاربید تحول می‌یابد و بخشی از آستنیت به صورت ناپایدار در ریزساختار قطعه باقی‌می‌ماند. حال با کاهش حرارت ورودی قطعه اصلاً به دمای حدود ۷۰۰ درجه نرسیده و دما به دمای ناحیه پرلیت در دیاگرام فازی می‌رسد و لذا آستنیت باقی‌مانده‌ای در ریزساختار نمونه تشکیل نمی‌شود.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
 ۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



شکل ۷- نمودار نرخ کار سختی- کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۳-۵-۱۰۰-۲۰۰



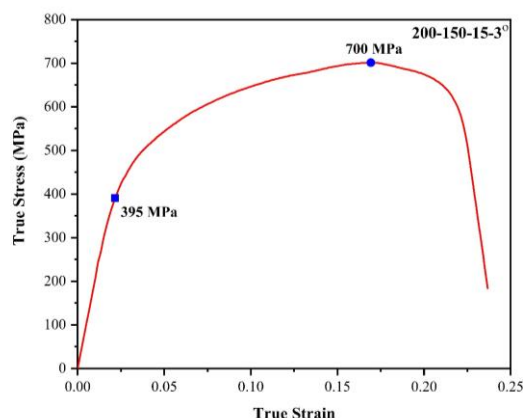
شکل ۸- دیاگرام فازی آلیاژ CK45.

۲-۳- تست کشش قطعه ۳-۱۵-۱۵۰-۲۰۰

شکل ۹، نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ابزار ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۹ قابل مشاهده است این قطعه خواص کششی خوبی تقریباً مشابه نمونه جوشکاری شده در سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه را از خود به نمایش گذاشته است به طوری که استحکام تسلیم برابر با ۳۹۵ مگاپاسکال، استحکام کششی ۷۰۰ مگاپاسکال بوده و درصد ازدیاد طولی برابر با ۲۳ درصد می‌باشد.

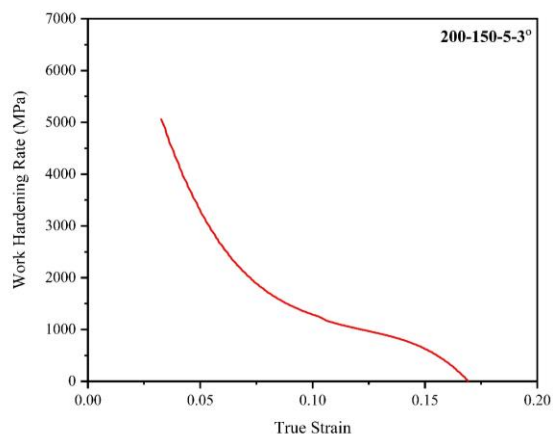


دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



شکل ۹- نمودار تنش-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۲۰۰-۱۵۰-۱۵-۳

برای بررسی بیشتر نمودار نرخ کارسختی بر حسب کرنش حقیقی نمونه مذکور نیز رسم گردید (شکل ۱۰). همانطور که مشاهده می‌شود نمودار کارسختی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای فرآیند مذکور همانند نمودار کارسختی نمونه قبلی بوده و لذا منطقی به نظر می‌رسد که به علت افزایش سرعت پیشروی ابزار در این نمونه با کاهش بیشتر حرارت ورودی در این نمونه نسبت به نمونه قبل، حضور آستنیت باقیمانده در این نمونه نیز منتفی باشد.



شکل ۱۰- نمودار نرخ کار سختی-کرنش حقیقی قطعه جوشکاری شده در پارامترهای ۲۰۰-۱۵۰-۵-۳

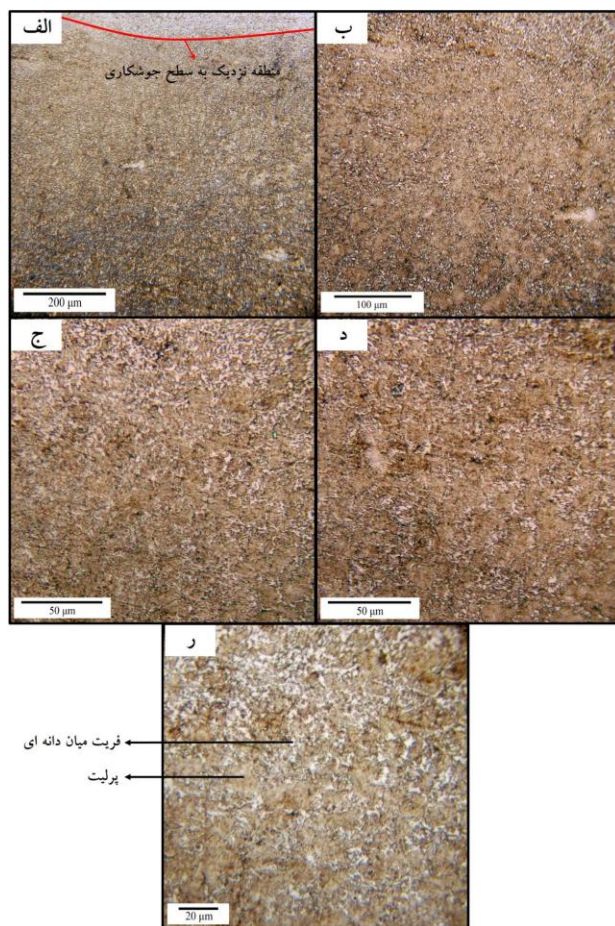
۲-۴- بررسی ریزساختار منطقه جوش قطعه ۲۰۰-۵۰-۵-۳

برای بررسی ریزساختار ابتدا با بزرگنمایی پایین (۴۰ برابر)، سطح مقطع جوش مورد بررسی قرار گرفت تا نواحی مختلف منطقه جوش مشخص گردد (شکل ۱۱). همانطور که از شکل ۱۱ قابل مشاهده است سطح مقطع جوش به سه بخش ناحیه اغتشاش یافته، ناحیه متأثر از دما و کار مکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت، تقسیم می‌شود.



شکل ۱۱- ریزساختار سطح مقطع جوش قطعه ۳-۵-۲۰۰ در بزرگنمایی ۴۰ برابر

سپس برای بررسی بهتر هر ناحیه در بزرگنمایی‌های بالاتر مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۲، تصویر ناحیه SZ را در بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ برابر نشان می‌دهد. شکل ۱۲، به وضوح نشان می‌دهد که ریزساختار منطقه SZ شامل دو فاز پرلیت (لایه‌های فریت و کاربید سمنتیت) و فریت میان‌دانه‌ای (فاز سفید رنگ) می‌باشد. علاوه بر این کاملاً مشخص است که در نزدیکی سطح جوشکاری، میزان فاز فریت به شدت افزایش یافته است.



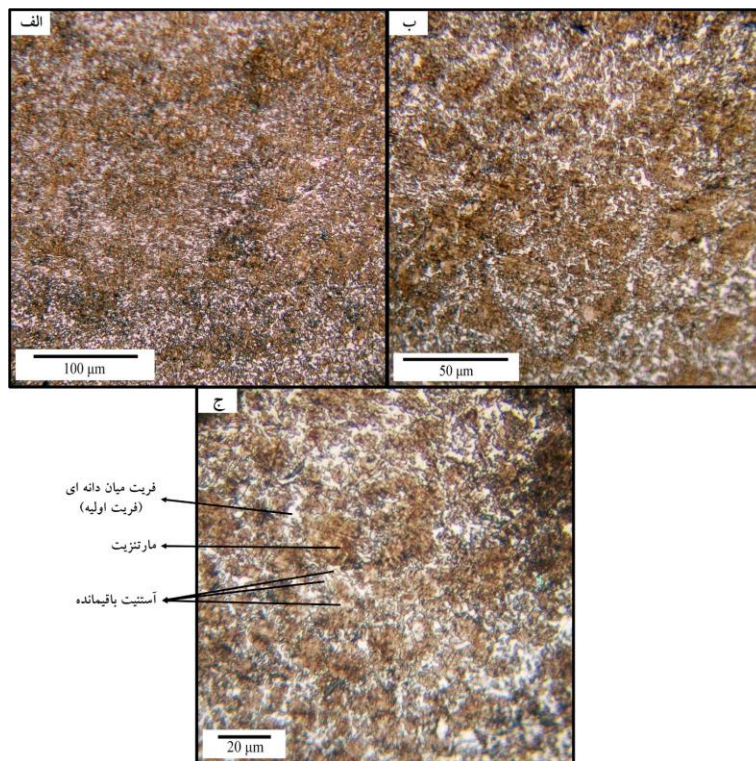
شکل ۱۲- تصویر ریزساختاری ناحیه SZ در قطعه ۳-۵-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰، (ج) ۴۰۰، (د) ۵۰۰ و (ر) ۵۰۰ برابر



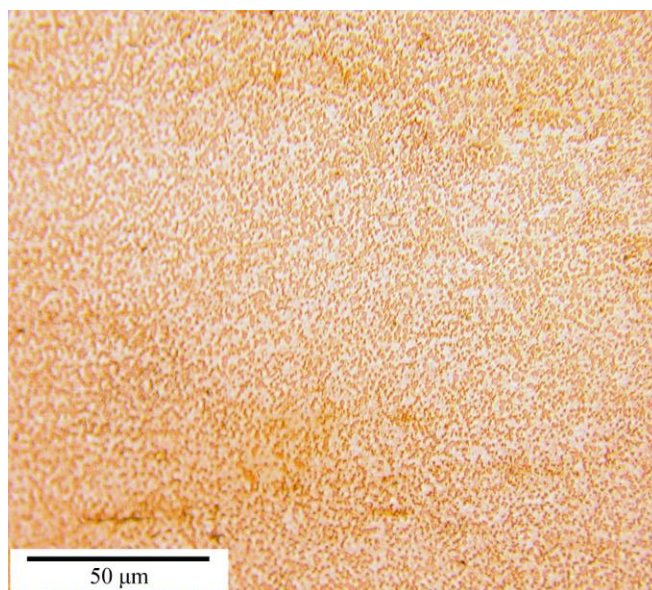
دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



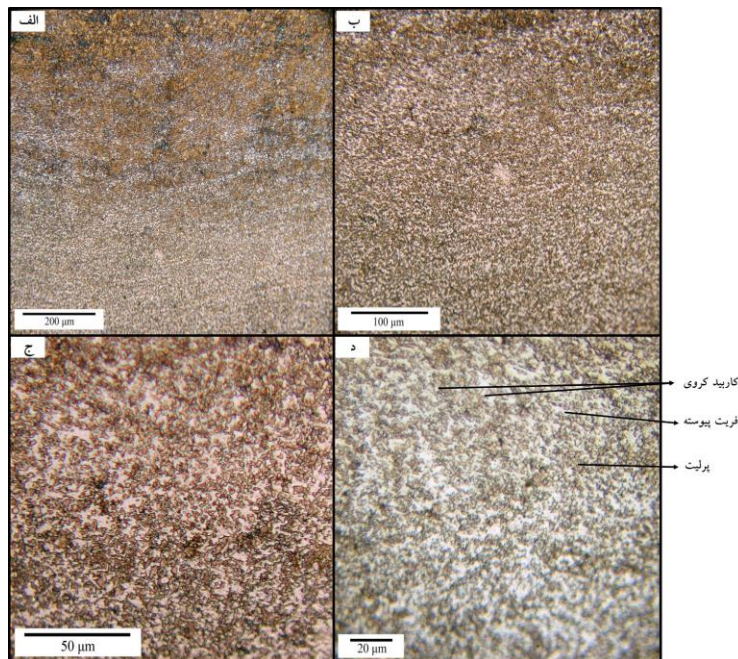
علت تشکیل ساختاری فریتی-پرلیتی در این ناحیه ناشی از رسیدن دمای نمونه در حین جوشکاری به منطقه دوفازی فریت+آستنیت و سپس خنک شدن آن تا زیر خط یوتکتوئید و لذا تشکیل پرلیت و فریت است به دلیل حرارت ورودی بالا و زمان تست زیاد (کم بودن سرعت پیشروی ابزار)، دانه‌های پرلیت درشت بوده اما به دلیل سرعت سرمایش بالا لایه‌های فریت و کاربید سمنتیت موجود در فاز پرلیت بسیار ظریف و غیرقابل تشخیص است. حضور درصد بسیار زیادی از فاز فریت در منطقه نزدیک به سطح جوشکاری و کم شدن درصد فاز فریت با فاصله گرفتن از سطح جوشکاری، فرآیند کربن‌زدایی یا دی‌کربوراسیون است. در حین جوشکاری به دلیل دمای بسیار بالای سطح جوشکاری و همچنین در تماس با محیط بودن سطح جوشکاری، کربن از سطح نمونه خارج شده و درصد کربن سطح بسیار افت می‌کند. لذا طبق دیاگرام فازی، و قانون اهرم در ناحیه دو فازی فریت+آستنیت، با کاهش درصد کربن درصد فاز فریت افزایش یافته و درصد فاز آستنیت کاهش می‌یابد. در نهایت آستنیت با سرد شدن نمونه به زیر خط یوتکتوئید، تبدیل به پرلیت می‌گردد. به همین دلیل در مناطق نزدیک به سطح جوشکاری درصد فاز فریت بیشتری مشاهده می‌شود (شکل ۱۲-الف). شکل ۱۳ تصاویر ریزساختاری منطقه TMAZ، سطح مقطع جوش قطعه مذکور را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر شکل ۱۳ مشخص است ریزساختار این منطقه از سطح مقطع جوش قطعه مذکور، دارای ریزساختاری ۳ فازی است. این فازها شامل فریت اولیه (فاز سفید رنگ)، فاز مارتنزیتی (فاز قهوه‌ای-مشکی) و فاز آستنیت باقیمانده (فازهای کرم رنگ در کنار فاز مارتنزیتی)، می‌باشد. علت تشکیل چنین ریزساختاری این است که در این منطقه به دلیل فاصله از سطح جوشکاری دچار کربن‌زدایی نشده و لذا به دلیل درصد کربن برابر با آلیاژ پایه (حدود ۰/۴۵ درصد)، قابلیت مارتنزیتی شدن در اثر تنش‌های حرارتی را دارد. لذا در این نمونه به دلیل سرعت پیشروی ابزار کم و حرارت ورودی زیاد، دمای این ناحیه به دمای منطقه دوفازی آستنیت+فریت رسیده است. پس از جوشکاری در اثر سرعت سرمایش بالا و تنش‌های حرارتی ایجاد شده، با کاهش سریع دما از ناحیه دوفازی، بخشی از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده و باقی آستنیت به صورت ناپایدار در ریزساختار باقی‌مانده است. لذا ریزساختار شامل فاز فریت اولیه، مارتنزیت و آستنیت باقیمانده ناپایدار می‌باشد. حضور این آستنیت باقی‌مانده ناپایدار منجر به پلاستیسیته القا شده با کرنش در این قطعه حین تست کشش شده و لذا این قطعه ترکیب مناسبی از استحکام و درصد ازدیاد طول را به دست می‌دهد. برای درک بهتر ریزساختار در منطقه HAZ، ابتدا باید ریزساختار اولیه ورق‌های مورد جوشکاری را پیش از جوشکاری مورد بررسی قرار داد. شکل ۱۴، ریزساختار اولیه ورق‌های CK45 را نشان می‌دهد. که ریزساختار ورق‌ها پیش از جوشکاری یک ریزساختار دوفازی شامل یک زمینه پیوسته فریتی و کاربیدهای کاملاً کروی است. این ریزساختار یک ریزساختار معمول بدست آمده در این آلیاژها است که در اثر عملیات حرارتی کروی شدن تشکیل می‌شود. این فرآیند کروی شدن می‌تواند در حین پروسه تولید ورق‌ها نیز رخ دهد. شکل ۱۵، نشان‌دهنده تصاویر ریزساختاری سطح مقطع جوش قطعه مذکور از ناحیه HAZ در بزرگنمایی‌های مختلف است. همانطور که از شکل ۱۵، قابل تشخیص است، ناحیه HAZ، در این قطعه شامل سه فاز پرلیت ریزدانه، زمینه فریتی پیوسته و کاربید کروی است. از آنجا که این ناحیه فقط متأثر از حرارت است، در حین جوشکاری با بالا رفتن دمای این ناحیه در محدوده زیر خط یوتکتوئید در محدوده فاز پرلیت (به دلیل دور بودن این منطقه از سطح جوشکاری، این منطقه دمای پایین‌تری را تجربه می‌کند)، بخشی از کاربیدهای کروی موجود در ریزساختار پیش از جوشکاری شروع به درشت شدن، به هم پیوستن و تشکیل فازی لایه‌ای از کاربید را می‌کنند و در نهایت فاز پرلیت تشکیل می‌شود. لذا در ریزساختار منطقه HAZ، پرلیت ریزدانه ناشی از به هم پیوستن کاربیدهای کروی موجود در ریزساختار اولیه ورق‌ها تشکیل شده و بخشی از کاربیدها هنوز به صورت کروی باقیمانده است.



شکل ۱۳- تصویر ریزساختاری ناحیه TMAZ در قطعه ۳-۵-۵۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۵۰۰ برابر



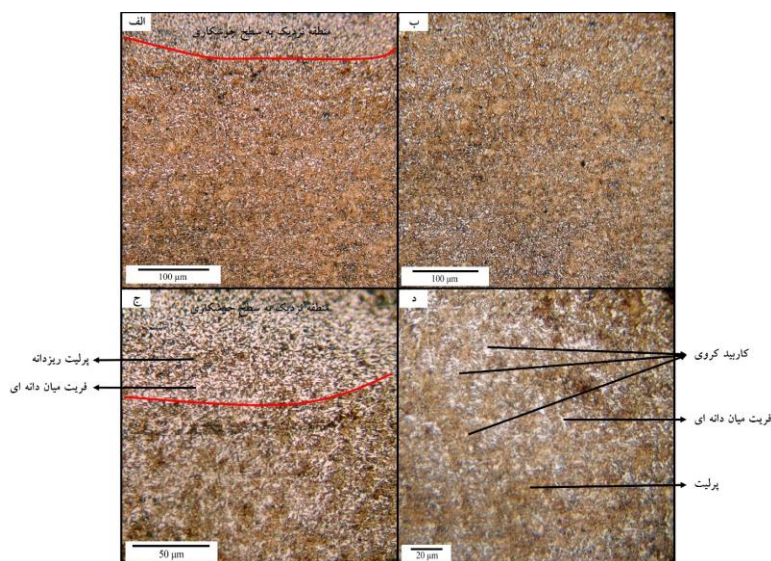
شکل ۱۴- ریزساختار اولیه آلیاژ پیش از جوشکاری



شکل ۱۵- تصویر ریزساختاری ناحیه HAZ در قطعه ۳-۵-۵۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰، (ج) ۴۰۰ و (د) ۵۰۰ برابر

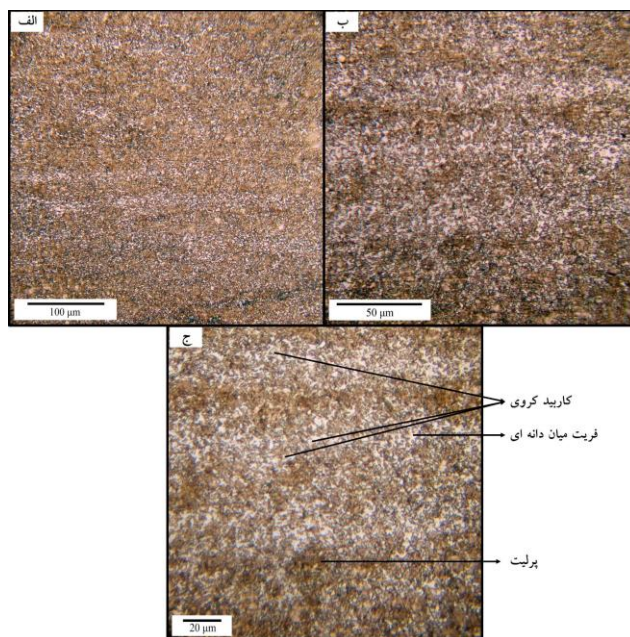
۲-۵- بررسی ریزساختار منطقه جوش قطعه ۳-۵-۱۰۰-۲۰۰

شکل ۱۶، تصویر ناحیه SZ را در بزرگنمایی‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ برابر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴۶، می‌توان حضور سه فاز پرلیت، کاربیدهای کروم و فریت میان دانه‌ای را مشاهده کرد. علت تشکیل چنین ریزساختاری این است که در این قطعه به دلیل سرعت پیشروی بالاتر، و کاهش نسبت P، در مقایسه با نمونه قبلی، حرارت ورودی پایین‌تر و سرعت انجام تست بالاتر است. لذا دما در این قطعه در نزدیکی خط یوتکتوئید قرار گرفته است. قرار گرفتن دما در این ناحیه و نزدیک به خط یوتکتوئید منجر به وقوع فرآیند کروم شدن می‌گردد. کروم شدن از سه طریق رخ می‌دهد. طریقه اول نگهداری قطعه در محدوده دوفازی فریت+آستنیت بالای خط یوتکتوئید و زیر خط سالیدوس است. این دما باید نزدیک به خط یوتکتوئید باشد. نگهداری در این محدوده منجر به ناپایداری کاربیدها و کروم شدن آن می‌گردد. هرچند نگهداری بیش از حد در این دما و یا نگهداری در دماهای بالاتر منجر به انحلال کامل کاربیدها شده و پس از سرمایش ریزساختاری فریتی-پرلیتی به دست خواهد آمد. روش دوم، نگهداری نمونه در زیر خط یوتکتوئید نزدیک به آن است. روش آخر نیز بالا و پایین کردن دما به بالا و زیر خط یوتکتوئید به صورت سینوسی است. در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، کرنش و اغتشاش اعمالی نیز به فرآیند کروم شدن کمک کرده و آن را تسریع می‌کند. این کار به علت خردایش لایه‌های کاربید سمنتیت حین فرآیند صورت می‌گیرد. علاوه بر آن افزایش دانسیته نایجایی‌ها و عیوب زیرساختاری منجر به تشکیل مسیرهای مرجح نفوذ شده و فرآیند کروم شدن را تسریع می‌نماید. به همین علت در این نمونه نسبت به نمونه قبلی کسر بالاتری از کاربیدهای کروم قابل مشاهده است.

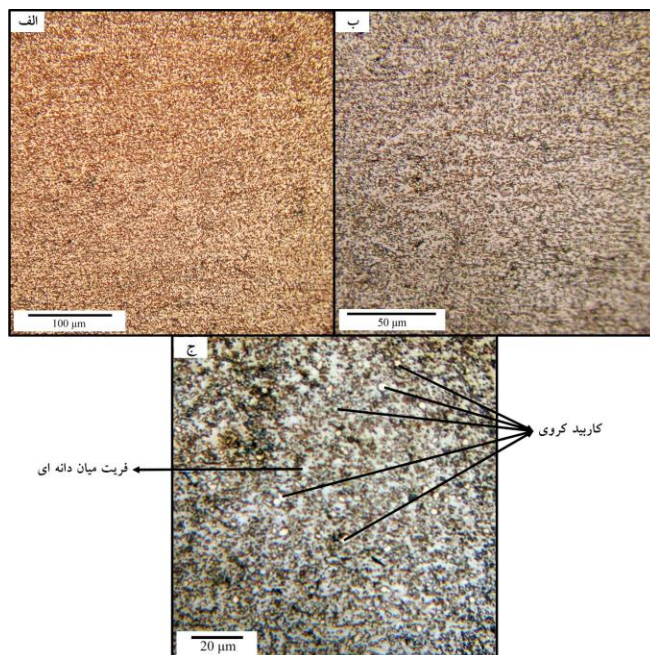


شکل ۴۶- تصویر ریزساختاری ناحیه SZ در قطعه ۳-۵-۱۰۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۲۰۰، (ب) ۲۰۰، (ج) ۴۰۰ و (د) ۵۰۰

شکل ۱۷ تصاویر ریزساختاری منطقه TMAZ، سطح مقطع جوش قطعه مذکور را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر شکل ۱۷ مشخص است ریزساختار این منطقه از سطح مقطع جوش قطعه مذکور، دارای ریزساختاری شامل کسر بالایی از کاربیدهای کروی، فاز فریت اولیه (میان دانه‌ای) و فاز پرلیت می‌باشد. علت تشکیل چنین ساختاری نیز همانند ناحیه SZ می‌باشد. کما اینکه این ناحیه متأثر از کار مکانیکی و دما بوده و انتظار می‌رود مقدار کاربیدهای تشکیل شده در این ناحیه نسبت به SZ بیشتر باشد. علت این امر شکسته شدن لایه‌های کاربید در اثر کار مکانیکی رخ داده در این منطقه باشد. حضور بیشتر کاربیدهای کروی و عدم حضور فاز مارتنزیتی و آستنیت باقیمانده در این قطعه نسبت به قطعه قبلی منجر به کاهش شدید سطح استحکامی در این قطعه شده است. لازم به ذکر است که سختی کاربید کروی نسبت به فاز پرلیت کمتر بوده و افزایش کسر حجمی کاربیدهای کروی در این قطعه نسبت به قطعه قبلی و همچنین کاهش عمق ناحیه SZ و TMAZ و افزایش عمق ناحیه HAZ که دارای حجم زیادی از کاربیدهای کروی است، به شدت بر افت سطح استحکامی نمونه فوق موثر بوده است. شکل ۱۸، نیز نشان‌دهنده تصاویر ریزساختاری سطح مقطع جوش قطعه مذکور از ناحیه HAZ در بزرگنمایی‌های مختلف است. همانطور که، قابل تشخیص است، ناحیه HAZ، در این قطعه شامل دو فاز زمینه فریتی پیوسته و کاربید کروی است. به وضوح کاربیدهای درشت شده در اثر حرارت و کاربیدهای کروی ریز اولیه در شکل ۱۸، قابل مشاهده است. اما دما و زمان کافی برای به هم پیوستن و تشکیل کاربیدهای لایه‌ای و تشکیل فاز پرلیت وجود نداشته است. علت این امر سرعت پیشروی بالاتر در این قطعه نسبت به قطعه قبلی است.



شکل ۱۷- تصویر ریزساختاری ناحیه TMAZ در قطعه ۳-۵-۱۰۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۵۰۰ برابر



شکل ۱۸- تصویر ریزساختاری ناحیه HAZ در قطعه ۳-۵-۱۰۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۵۰۰ برابر

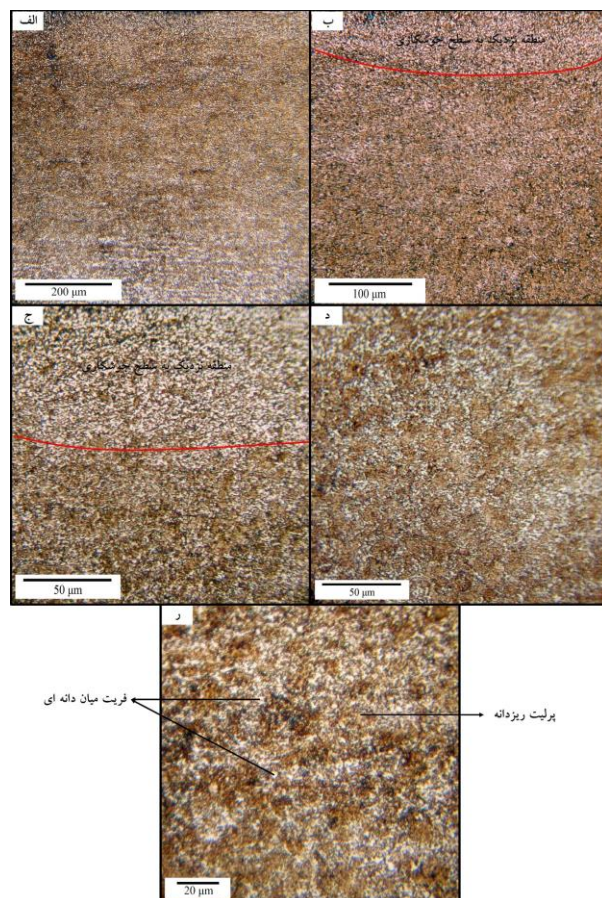


دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023

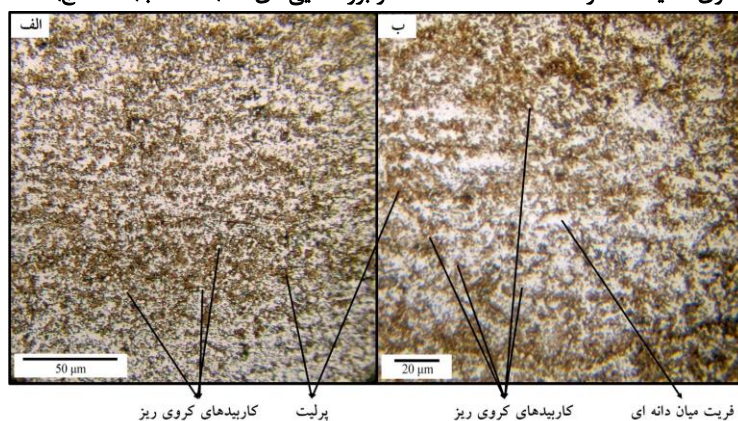


۲-۶- بررسی ریزساختار منطقه جوش قطعه ۳-۵-۱۵۰-۲۰۰

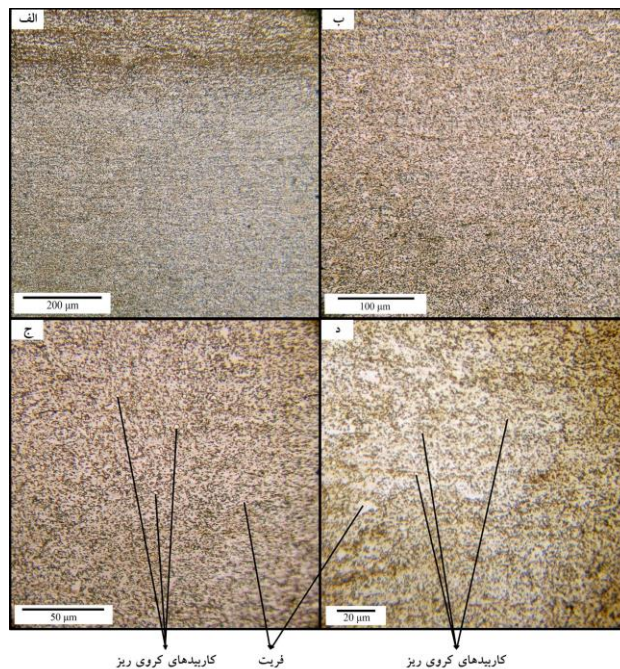
شکل ۱۹، تصویر ناحیه SZ را در بزرگنمایی‌های بالا نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۹، می‌توان حضور دو فاز پرلیت، و فریت میان دانه‌ای را مشاهده کرد. عدم حضور کاربیدهای کروی، به علت کاهش حرارت ورودی و زمان انجام فرآیند ناشی از افزایش سرعت پیشروی ابزار در این قطعه است. لذا کاهش دما و دور شدن از دمای خط یوتکتوئید، منجر به افزایش زمان لازم برای کروی شدن کاربید می‌شود که در این قطعه به دلیل سرعت بالای پیشروی ابزار، چنین زمانی در اختیار نیست. شکل ۲۰، تصویر ناحیه TMAZ سطح مقطع جوش قطعه مذکور را نشان می‌دهد. بررسی ریزساختار این ناحیه نشان می‌دهد که ریزساختار شامل سه فاز فریت اولیه، پرلیت و کسر حجمی بسار بالایی از کاربیدهای کروی ریز است. علت تشکیل چنین ریزساختاری را می‌توان به این مسئله نسبت داد که ناحیه مذکور تحت تاثیر کار مکانیکی و دما می‌باشد. لذا کار مکانیکی شدید ناشی از فرآیند جوشکاری در این ناحیه، منجر به شکسته شدن لایه‌های سمنتیت شده و علاوه بر آن با افزایش دانسیته نابجایی‌ها و عیوب زیرساختاری، منجر به مسیرهای پرسرعت نفوذ شده و این امور در نهایت شکل کسر بالایی از کاربیدهای کروی را رقم زده است. اگرچه در این قطعه حرارت ورودی به دلیل سرعت پیشروی بالای ابزار پایین بوده، اما کار مکانیکی توانسته است کروی شدن کاربیدها را در ناحیه TMAZ، ترغیب نماید. شکل ۲۱، نیز نشان‌دهنده ریزساختار ناحیه HAZ در سطح مقطع جوش قطعه مذکور است. همانطور که از شکل ۲۱، مشخص است، ریزساختار این ناحیه، همانند ریزساختار اولیه آلیاژ پیش از جوشکاری است. ریزساختار این ناحیه شامل زمینه فریتی پیوسته در کنار کاربیدهای بسیار ریز کروی سمنتیت است. علت این مسئله این است که این ناحیه تنها متاثر از حرارت است. در این قطعه حرارت ورودی نیز به دلیل سرعت بالای پیشروی ابزار پایین است. بنابراین تنها این ناحیه با رشد کم کاربیدهای کروی موجود در ریزساختار اولیه آلیاژ همراه است. بنابراین بررسی ریزساختاری این قطعه، نشان داد که به علت عدم حضور فازهای مارتنزیتی، آستنیت باقیمانده و همچنین ازدیاد کسر کاربیدهای کروی که سختی کمتری نسبت به ساختار پرلیتی دارد، استحکام کمتری نسبت به نمونه ۳-۵-۵۰-۲۰۰، خواهد داشت.



شکل ۱۹- تصویر ریزساختاری ناحیه SZ در قطعه ۳-۵-۱۵۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰، (ج) ۴۰۰، (د) ۵۰۰ و (ه) ۵۰۰ برابر



شکل ۲۰- تصویر ریزساختاری ناحیه TMAZ در قطعه ۳-۵-۱۵۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۴۰۰ و (ب) ۵۰۰ برابر



شکل ۲۱- تصویر ریزساختاری ناحیه HAZ در قطعه ۳-۵-۱۵۰-۲۰۰ در بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰، (ج) ۴۰۰ و (د) ۵۰۰ برابر

۳- نتیجه

قطعات جوشکاری شده هم‌جنس در پارمترهای فرآیند ذکر شده توسط بازرسی چشمی، مورد بررسی قرار گرفتند و قطعات ناسالم حذف گردید. سپس اعوجاج ناشی از تنش پسماند باقیمانده در نمونه‌ها در اثر فرآیند جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت و میزان اعوجاج قطعات جوشکاری شده سالم توسط روش هندسی اندازه‌گیری شد. خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده سالم نیز توسط تست کشش مورد بررسی قرار گرفت. از میان قطعات جوشکاری شده تنها سه قطعه خواص مکانیکی مناسبی را از خود به نمایش گذاشتند و باقی قطعات رفتار کاملاً تردی از خود نشان دادند. سپس قطعات مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند که نتایج بررسی ریزساختاری، نتایج بدست آمده از تست کشش را تایید کردند. در نهایت با بررسی ریزساختاری، علت رفتار ترد قطعات دیگر نیز مشخص گردید. در نهایت می‌توان بهینه‌ترین پارامتر فرآیند را تعیین نمود. نتایج بدست آمده از این مقاله به شرح ذیل می‌باشد.

۱- پارامتر فرآیند زمان نگهداری ابزار در نمونه تاثیر چندانی در جوش خوردگی ورق‌ها، خواص مکانیکی آن‌ها و ریزساختار پس از جوشکاری ندارد.

۲- دو پارامتر فرآیند سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار با تاثیر شدید بر حرارت ورودی حین جوشکاری، تنش اعمالی به قطعات، الگوی اغتشاش و تلاطم، تنش پسماند و غیره، ریزساختار و نحوه جوش خوردگی دو ورق به یکدیگر و خواص مکانیکی جوش را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



- ۳- زاویه ابزار تاثیر مهمی در الگوی اغتشاش دارد به صورتی که زاویه ابزار صفر درجه منجر به عدم جوشکاری موفق می شود، درحالیکه زاویه ابزار ۳ درجه منجر به جوشکاری موفق می گردد.
- ۴- سرعت های دورانی بالاتر از ۲۰۰ دور بر دقیقه در سرعت های پیشروی پایین ابزار دچار ترک خوردگی ناحیه متأثر از حرارت و در سرعت های پیشروی بالا دچار عیوب تونلی و ترک خوردگی سطحی می شوند. علت این امر را می توان به بالا بودن حرارت ورودی نسبت به سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و لذا نرخ بالاتر سرمایش در این نمونه ها دانست.
- ۵- سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی متر بر دقیقه نیز منجر به وقوع ترک خوردگی ناحیه متأثر از حرارت می شود.
- ۶- پارامترهای فرآیندی که منجر به خواص مکانیکی مناسب می شوند عبارتند از سرعت دورانی ابزار برابر با ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت های پیشروی ابزار برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه.
- ۷- از بین ۳ پارامتر فرآیند مناسب، پارامتر سرعت دورانی ابزار برابر با ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ دور بر دقیقه دارای بیشترین میزان استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بود. علاوه بر این پارامتر در مقایسه به دو پارامتر دیگر دارای کمترین میزان اعوجاج و تنش پسماند می باشد. علت این ترکیب بسیار مناسب از استحکام و داکتیلیته ناشی از حضور فاز آستنیت باقیمانده در ریزساختار قطعه و لذا رخداد پلاستیسیته القا شده با کرنش (تحول آستنیت به مارتنزیت در اثر کرنش دهی) در حین تست کشش می باشد.
- ۸- دو پارامتر سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی متر بر دقیقه به علت عدم حضور فاز آستنیت باقیمانده در ریزساختار قطعه پس از جوشکاری و همچنین ازدیاد درصد فاز کاربید کروی، منجر به خواص مکانیکی ضعیف تر و استحکام کمتری نسبت به پارامتر سرعت دورانی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلی متر بر دقیقه می شود.
- در پایان می توان نتیجه گرفت که پارامتر فرآیند سرعت دورانی ابزار برابر با ۲۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۵۰ میلی متر بر دقیقه و زاویه ابزار ۳ درجه به دلیل میزان اعوجاج کم و خواص مکانیکی عالی (ترکیب مناسبی از استحکام و داکتیلیته)، بهینه ترین پارامتر فرآیند برای جوشکاری هم جنس آلایژ CK45 می باشد.

مراجع

- [1]Heinz.A, Haszler.A, Keidel.C, Moldenhauer.S, Benedictus.R, Miller.W.S, "Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications", Materials Science and Engineering A, Vol. 280, PP 102–107. 2000
- [2] Mishraa.R.S., Z.Y. Ma, 2005, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering R Vol. 50, pp 1–78.2000
- [3] P. Nelaturu, S. Jana, R. S. Mishra, G. Grant, and B. E. Carlson, "Influence of friction stir processing on the room temperature fatigue cracking mechanisms of A356 aluminum alloy," Mater. Sci. Eng. A, vol. 716, no. December 2017, pp. 165–178, 2018



دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی
مهندسی مواد، متالورژی و معدن
۲۶ بهمن ماه ۱۴۰۱ - دانشگاه شهید چمران اهواز
2nd International Conference & 6th National Conference on
Materials, Metallurgy, Mining
Feb 15, 2023



- [4] Chen, H. Fujii, Y. Sun, Y. Morisada, K. Kondoh, and K. Hashimoto, "Effect of grain size on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded non-combustive magnesium alloys," Mater. Sci. Eng. A, vol. 549, pp. 176–184, 2012
- [5] Liu FC, Hovanski Y, Miles MP, Sorensen CD, Nelson TW. A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties. Journal of Materials Science & Technology. Jan 1;34(1):39-57, 2018
- [6] Zhang Z, Zhang HW. Numerical studies of preheating time effect on temperature and material behaviours in friction stir welding process. Science and Technology of Welding and Joining. Jul 1;12(5):436-48, 2007
- [7] Haghshenas M, Gerlich AP. Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review. Engineering science and technology, an international journal. Feb 1;21(1):130-48, 2018
- [8] McPherson NA, Galloway AM, Cater SR, Hambling SJ. Friction stir welding of thin DH36 steel plate. Science and Technology of Welding and Joining. Jul 1;18(5):441-50. 2013
- [9] Hattingh DG, Blignault C, Van Niekerk TI, James MN. Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool. Journal of materials processing technology. Jul 18;203(1-3):46-57, 2008
- [10] Venkateswarlu D, Mandal NR, Mahapatra MM, Harsh SP. Tool design effects for FSW of AA7039. Welding Journal. Feb 1;92(2):41-7, 2013
- [11] Mehta M, Arora A, De A, DebRoy T. Tool geometry for friction stir welding—optimum shoulder diameter. Metallurgical and Materials Transactions A. Sep 1;42(9):2716-22, 2011
- [12] Rai R, De A, Bhadeshia HK, DebRoy T. friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining May 1;16(4):325-42, . 2011
- [13] M. Mahmoudiniya, A. H. Kokabi, S. Kheirandish, and L. A. I. Kestens, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded ferrite-martensite DP700 steel," Mater. Sci. Eng. A, vol. 737, no. September, pp. 213–222, 2018.
- [14] A. Barabi, A. Zarei-Hanzaki, H. Abedi, A. Anoushe, and J. H. Cho, "The Correlation of Macrostructure, Microstructure, and Texture with Room Temperature Mechanical Properties of a Twinning-Induced Plasticity Automotive Steel after Friction Stir Spot Welding/Processing," Steel Res. Int., vol. 89, no. 11, Nov. 2018.
- [15] S. Noh, R. Kasada, A. Kimura, S. H. C. Park, and S. Hirano, "Microstructure and mechanical properties of friction stir processed ODS ferritic steels," J. Nucl. Mater., vol. 417, no. 1–3, pp. 245–248, 2011.
- [16] M. H. Razmpoosh, A. Zarei-Hanzaki, S. Heshmati-Manesh, S. M. Fatemi-Varzaneh, and A. Marandi, "The Grain Structure and Phase Transformations of TWIP Steel During Friction Stir Processing," J. Mater. Eng. Perform., vol. 24, no. 7, pp. 2826–2835, 2015.
- [17] J. Jeon, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park, and S. Hirano, "Anisotropy of structural response of single crystal austenitic stainless steel to friction stir welding," Acta Mater., vol. 61, no. 9, pp. 3465–3472, 2013.
- [18] Saeid T, Abdollah-Zadeh A, Assadi H, Ghaini FM. Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel. Materials Science and Engineering: A. Nov 25;496(1-2):262, 2008
- [19] Fujii H, Cui L, Tsuji N, Maeda M, Nakata K, Nogi K. Friction stir welding of carbon steels. Materials Science and Engineering: A. Aug 15;429(1-2):50-7, 2006