

بررسی ایجاد ترک طولی در سخت کاری سطحی فلز پایه MF-10-60-GRZ بوسیله سیم جوش ST44-2

چکیده: در صنعت برای سخت کاری سطحی راهنماها به کمک روش جوشکاری از سیم جوش MF-10-60-GRZ طبق استاندارد DIN8555 استفاده می گردد. در جوش های ایجاد شده توسط این سیم جوش، ترک هایی به نام ترک های آزاد سازی تنش و یا ترک چک دیده می شود. وجود ترک طولی بیش از استاندارد منجر به بازسازی و یا رد شدن قطعه می گردد. هدف این مقاله، بررسی راهکارهای مختلف انجام شده جهت حذف ترک های طولی ایجاد شده در هنگام سخت کاری سطحی است. در این پژوهش از روش های جوشکاری با سیم جوش توپودری خود محافظ و زیرپودری استفاده گردید. نتایج سخت کاری سطحی با روش های مختلف نشان داد که هیچ راه عملی برای لایه نشانی این ماده برای رسیدن به لایه سخت شده ۱۵ میلیمتری وجود ندارد و تنها راه قابل اطمینان این است که در بین لایه های سخت ایجاد شده (که از جنس چدن پرآلیاژ هستند)، از لایه های فولاد نرم کم کربن (فلز جوش رسوب داده شده با استفاده از ER70s-6) استفاده شود.

واژه های راهنما: سخت کاری سطحی، ترک طولی، ترک آزادسازی تنش، تکنیک لایه به لایه، سیم جوش MF-10-60-GRZ

محمد خوران*

استادیار، مهندسی مکانیک،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

نوید صفرپور

مری مدعو، مهندسی مواد،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

عیسی خوران

مری مدعو، مهندسی مواد،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

Mohammad Khoran*

Assistant professor of
Mechanical
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Navid safarpour

Lecturer, Material
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Eisa Khoran

Lecturer, Material
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Investigation of longitudinal cracks in a hardened layer by MF-10-60-GP welding wire on ST44-2

Abstract: In the industry, MF-10-60-GRZ welding wire is used according to DIN8555 standard for surface hardening of the guides with the welding method. Cracks called stress release cracks or check cracks can be observed in the welds that have been created by this welding wire. The existence of a longitudinal crack more than the standard leads to reconstructions or rejection of the part. The purpose of this article is to review the various solutions used to remove longitudinal cracks created during surface hardening. In this research, the methods of Submerged Arc Welding (SAW) and Flux Cored Arc Welding (FCAW) were used. The results of surface hardening with different methods showed that there is no practical way to reach a hardened layer of 15 mm, and the only reliable way is to create the low-carbon steel layers (welded metal deposited using ER70s-6) between the hard layers (high-alloy cast iron).

Keywords: Surface hardening, Longitudinal cracks, Stress relieving cracks, Layer welding technique, MF-10-60-GP welding wire

۱- مقدمه

تشکیل سیلیسیدها (Fe_3Si) باعث کاهش مقاومت به خوردگی خواهد بود [۱۵]. در واقع با توجه به ترکیب شیمیایی اشاره شده برای این مواد می‌توان گفت که این فلزات پرکننده در گروه چدن‌های آلیاژی پرکروم جای دارند [۱۲، ۱۶، ۱۷]. در هنگام بازرسی سطح سخت‌کاری سطحی شده با استفاده از فلز پرکننده گروه ۱۰ آلیاژی تعداد زیادی ترک‌های عرضی در لایه‌های سخت شده دیده می‌شود. این ترک‌های عرضی با نام ترک‌های آزادسازی تنش و یا ترک‌های چک شناخته می‌شوند [۱۸]. وجود این ترک‌های عرضی بطور معمول تاثیری بر روی مقاومت به سایش قطعات نداشته و در مقابل سبب آزادسازی تنش‌های ناشی از انقباض گشته و مانع از ایجاد دیگر عیوب و همینطور قله‌کن شدن فلز جوش می‌گردند. ایده‌های مختلفی برای جلوگیری از ایجاد و یا گسترش ترک بکار گرفته شد، نتایج نشان داد که فرآیند هم‌پنینگ^۵ می‌تواند با کاهش تنش پسماند جوشکاری و ایجاد تعداد زیادی مرز دانه با زاویه کم، به جلوگیری از انتشار ترک کمک کند [۱۹]. از مواردی که در بازرسی لایه‌های سخت‌کاری شده مهم می‌باشد، فاصله یکسان ترک‌های عرضی از یکدیگر، میزان باز شونده‌گی قسمت بالای این ترک‌ها، عدم گسترش ترک‌های عرضی به فلز پایه و همچنین عدم وجود ترک‌های طولی در فلز جوش می‌باشد [۲۰].

علت‌های ایجاد و راهکارهای جلوگیری از ترک توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که موارد اصلی آن در ادامه آورده شده است [۲۱-۲۳].

۱- سرعت سرد شدن بالای جوش

۲- مهار زیاد جوش توسط دیگر اجزا

۳- وجود آلودگی در سیم جوش، فلز پایه و ...

۴- عدم آماده‌سازی مناسب لایه زیری یا فلز پایه قبل از انجام جوشکاری

۵- ترکیب نامناسب آلیاژ مورد استفاده

۶- سایز نامناسب مهره جوش (نسبت بالای عرض به ارتفاع مهره-های جوش)

۷- روش جوشکاری نامناسب (در بعضی از روش‌های جوشکاری باید لزوماً از حالت جوشکاری زیگزاگی، مستقیم و یا هر دو استفاده کرد)

۸- استفاده از جریان بیش از حد زیاد در هنگام جوشکاری.

دمای پیش گرمایش تاثیر بسیار بالایی بر خروجی می‌تواند داشته باشد چرا که سبب کاهش نرخ خنک شونده‌گی فلز جوش

یکی از روش‌های مهم صنعتی در زمینه تولید، تعمیر و نگهداری قطعات تحت سایش، روش سخت‌کاری سطحی با استفاده از روش جوشکاری می‌باشد [۴-۱]. در این فرآیند یک لایه از فلز مورد نظر با خواص سایشی مناسب با استفاده از فرآیندهای مختلف جوشکاری بر روی لایه فلز نشاند می‌شود. از جمله مزیت‌های مهم این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌توان به ارزان بودن، سخت‌کاری موضعی و تعمیر قطعات فرسوده شده اشاره کرد [۲، ۴]. مندز و همکاران [۵] مشخص نمودند که هزینه و بازار عوامل تعیین‌کننده‌ی هستند که بر تصمیمات فنی در مورد انتخاب روش و نوع عملیات مقاوم‌سازی سایشی تأثیر گذارند. پژوهش‌ها نشان داده است که با استفاده از روش‌های مختلفی مانند جوشکاری با الکتروود دستی، جوشکاری زیرپودری^۱، جوشکاری تحت حفاظت گاز محافظ^۲ و جوشکاری با سیم جوش توپودری خود محافظ^۳ و... می‌توان با اطمینان سخت‌کاری سطحی با جوشکاری را انجام داد [۶-۸]. لکه و همکاران [۹] مشخص نمودند که پدیده رقیق‌سازی^۴ در فرآیندهای سخت‌کاری بین آلیاژ رسوب‌شده و فولاد زیرلایه تأثیر قابل توجهی بر عملکرد قطعه دارد. در جوشکاری زیر پودری مشخص شد که نوع پودر در مخلوط، مقدار پودر ورودی و متغیرهای جوشکاری بر ریزساختار و نوع آلیاژهای تشکیل شده تأثیر می‌گذارند [۱۰].

طبق استاندارد DIN8555 می‌توان از ۱۷ خانواده مختلف آلیاژی به عنوان فلز پرکننده برای اعمال لایه سخت بر روی فلزات و آلیاژهای مختلف استفاده کرد [۱۱]. مواد سخت‌شونده رایج معمولاً در گروه‌های فولاد یا مواد آهنی کم آلیاژ، آهن‌های سفید با کروم بالا یا مواد آهنی با آلیاژ بالا، کاربیده‌ها، آلیاژهای پایه نیکل یا آلیاژهای پایه کبالت طبقه‌بندی می‌شوند. گروه آلیاژی ۱۰ در میان فلزات پرکننده اشاره شده در این استاندارد دارای بالاترین مقادیر سختی می‌باشند [۱۲]. طبق این استاندارد خانواده آلیاژی ۱۰، دارای ترکیب شیمیایی شامل آهن، درصد‌های بالای کروم (۲۰-۳۰ درصد) و کربن (۴/۵-۷ درصد) می‌باشد. لایه‌های سخت ایجاد شده توسط این خانواده آلیاژی می‌تواند سختی‌های بالایی در حدود ۶۴ راکول سی را ایجاد کند. دلیل ایجاد این سختی بالا را می‌توان به ایجاد فاز کاربیدی M_7C_3 در ساختارهای چدن‌های پر کروم و کربن ربط داد [۱۳-۱۴] و

⁴ Dilution phenomena

⁵ hammer peening process

¹ Submerged arc welding

² Gas metal arc welding (GMAW)

³ Flux Cored Arc Welding (FCAW)

در این پژوهش و همچنین مشخصه جوش‌های داده شده در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد خام استفاده شده بر حسب درصد وزنی

ER70s-6	MF-10-60GRZ	ST44-2	
۰/۰۷	۴/۲	۰/۲۱	کربن
۱/۵۲	۱/۳۰	۱/۵	منگنز
۰/۸۲	۱/۹۵	-	سیلیسیم
-	۲۳/۵۰	-	کروم
مابقی	مابقی	مابقی	آهن

جدول ۲- پارامترهای جوشکاری در حالت جوشکاری سطحی

قطر سیم جوش (mm)	جریان جوشکاری	
۲,۴	۲۵۰ - ۳۵۰	دستگاه جوش FCAW
۲,۴	۲۵۰ - ۴۰۰	دستگاه جوش SAW

۳- نتیجه و بحث

در هنگام جوشکاری لایه‌های اول جوش با استفاده از سیم جوش MF-10-60-GRZ بر روی فلز پایه St44-2، ترک‌های طولی به وفور یافت شدند. راهکارهایی که برای جلوگیری از ایجاد این عیب مطرح شدند همگی برپایه دلایل ایجاد ترک‌های طولی در جوش بوده‌اند. با توجه موارد و دلایل بیان شده در مورد علت ایجاد ترک می‌توان برای این مرحله راهکارهای زیر را در نظر گرفت.

اولین راهکار برای حذف ترک‌های طولی آماده‌سازی مناسب سطح قطعه و سنگ‌زنی آن قبل از اعمال لایه‌های سخت در نظر گرفته شد، است. این تست مجدد با انجام این عمل تکرار گردید. تغییر محسوسی در وجود ترک‌های طولی در ساختار قطعه مشاهده نشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت مشکل وجود ترک وجود آلودگی در فلز پایه و یا عدم آماده‌سازی آن نبوده است.

یکی دیگر از عواملی که تاثیر زیادی بر خروجی دارد، پیش گرمایش فلز پایه است، لذا دومین راهکار برای کاهش ترک، بررسی دمای پیش‌گرمایش است. دمای پیش‌گرمایش ۴۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ استفاده شد. بدون پیش‌گرمایش (دمای محیط) حدود ۱۰ ترک در سطح قطعه مشاهده گردید. در صورتی که با بیشتر شدن دمای پیش‌گرمایش از تعداد این ترک‌ها کاسته شد. در دو مورد اول یعنی دماهای ۴۰ و ۷۰ ترک‌های طولی مشاهده شدند. در هنگام جوشکاری با پیش‌گرمایش حدود دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد احتمال وجود ترک‌های طولی بسیار کاهش یافته و به حدود ۱ از ۱۰ رسید و با افزایش دمای

و مناطق اطراف آن می‌گردد. اثرات تغییر در سرعت سرد شدن بر روی شرایط خروجی توسط هورنانگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۴].

با توجه به اهمیت ترک‌های طولی بوجود آمده در هنگام جوشکاری و همچنین مطالعه پیشینه پژوهش، عدم وجود مطالعه‌ی فراگیر بر روی فولاد St44-2، لزوم مطالعه ترک‌های طولی ایجاد شده در بحث سخت‌کاری با جوشکاری احساس می‌گردد. لذا در این پژوهش با مطالعه تجربی و استفاده از روش‌های جوشکاری با الکتروود توپودری خود محافظ و زیرپودری به بررسی راهکارهای مختلف، جهت حذف ترک‌های طولی ایجاد شده در هنگام سخت‌کاری سطحی پرداخته شده است. هدف از این پژوهش یافتن روشی نوین برای جلوگیری از ایجاد ترک‌های طولی در سخت‌کاری سطحی بوسیله سیم جوش MF-10-60-GRZ است.

۲- روش انجام کار

در طی این پژوهش سعی شد که با استفاده از تغییر در حرارت ورودی، دمای پیش‌گرمایش، دما و زمان پس‌گرمایش، استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های مختلف جوشکاری از ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های سخت‌کاری سطحی شده جلوگیری شود.

دمای پیش‌گرمایش و بین‌پاسی در این پژوهش ۴۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب شد. برای اعمال پس‌گرمایش از مشعل با شعله خنثی استفاده گردید و مشعل را در مدت‌های ۲، ۳، ۵، ۷ و ۸ دقیقه بر روی سطح قطعه نگهداشته تا دمای لایه‌های جوش داده شده حداکثر تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد برسد. برای اندازه‌گیری دما از ترمومتر لیزری استفاده گردید. جهت بهبود کیفیت سطحی و تمیزکاری از فرآیندهای سنگ‌زنی و برس سیمی استفاده شد. جهت کاهش نرخ سرد شدن لایه‌های جوش داده شده در مواقع لازم از ماسه سیلیسی نیز استفاده گردید.

برای انجام جوشکاری از فرآیندهای جوش زیرپودری و جوش با سیم جوش توپودری خود محافظ استفاده گردید. سیم جوش-های مورد استفاده در طی این آزمون، سیم جوش‌های ER70S-6 ساخت شرکت آما، MF-10-60-GRZ ساخت شرکت ایساب برزیل و فلز پایه مورد استفاده در این تحقیق ST44-2 بود. ترکیب شیمیایی فولاد، سیم جوش مصرف شده بوسیله دستگاه کوانتومتری با دقت ۰/۰۱ درصد اندازه‌گیری و در جدول (۱) آورده شده است. مشخصات دستگاه‌های جوشکاری استفاده شده



شکل ۲- ترک‌های طولی و عرضی بوجود آمده در لایه اول رسوب داده شده با فلز جوش MF-10-60-GRZ بدون انجام عملیات پیش گرمایش

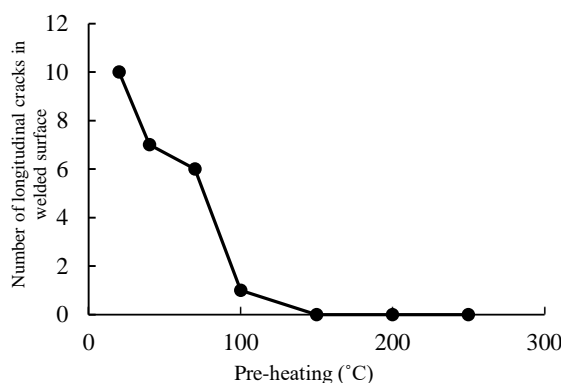


شکل ۳- ترک‌های طولی ایجاد شده بر روی لایه دوم جوشکاری شده توسط فلز جوش MF-10-60-GRZ

برای کاهش تعداد ترک‌ها در لایه دوم، با تجربه از اثر پیش گرمایش که از جوشکاری لایه اول بدست آمد، اولین راهکاری که مورد بررسی قرار گرفت، بحث دما بود. لذا برای از بین بردن ترک‌های طولی در لایه دوم سخت‌کاری شده ابتدا دمای بین پاسی افزایش یافته و زمان مابین اعمال لایه دوم و اول تا حد امکان کم شد. در این آزمون دمای بین پاسی از ۳۰ درجه سانتیگراد تا ۳۴۰ درجه سانتیگراد تغییر داده شد اما در وجود ترک‌های طولی تفاوتی ایجاد نگردید. در واقع با افزایش دمای بین پاسی تعداد ترک‌های موجود در لایه دوم کمتر شدند اما صفر نشدند. در نتیجه راهکارهای دیگری در نظر گرفته شد.

جهت کمتر کردن احتمال ایجاد ترک در لایه دوم تصمیم گرفته شد که لایه اول کاملاً سنگ‌زده شود و صاف گردد تا لایه دوم بر روی یک سطح زیرین صاف، تمیز و عاری از آلودگی قرار گیرد. با انجام این عمل نیز مشاهده شد که خود عملیات سنگ‌زنی فلز جوش MF-10-60-GRZ می‌تواند عاملی برای ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های سخت‌کاری سطحی شده شود. در واقع لایه اولی که جوشکاری و بازرسی شد فاقد هرگونه ترک طولی بود اما بعد از سنگ‌زنی دارای چندین ترک طولی گردید.

پیش گرمایش قطعات قبل از اعمال لایه سخت به حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد و بالاتر دیگر ترک‌های طولی در لایه اول سخت کاری شده مشاهده نشدند. لذا می‌توان بیان نمود هر چه دمای پیش گرمایش بیشتر شود، تعداد ترک‌های ایجاد شده کمتر خواهد شد. با توجه به آزمون تجربی صورت گرفته فرضیه افزایش دمای پیش گرمایش و کاهش تعداد ترک برای این محصول تایید گردید. افزایش دمای پیش گرمایش در واقع سبب کاهش نرخ سردشدگی فلز جوش و مناطق اطراف آن می‌گردد. این امر با کاهش نرخ انتقال حرارت و سرد شدن سریع از ترک‌های انقباضی جلوگیری می‌کند. شکل (۱) نشان دهنده احتمال ایجاد ترک‌های طولی در یک سطح ۷٪*۳۰ سانتیمتری با دماهای مختلف پیش-گرمایش می‌باشد. همانطوری که مشاهده می‌گردد با افزایش دمای پیش گرمایش بصورت نمایی تعداد ترک‌ها کاهش خواهد یافت بصورتی که بعد از دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد ترکی مشاهده نگردید.



شکل ۱- تعداد ترک‌های ایجاد شده در سطح ۷٪*۳۰ سانتیمتری

در شکل (۲) لایه اول سخت‌کاری شده بدون اعمال پیش گرمایش، نشان داده شده است. همانطوری که دیده می‌شود، ترک‌های طولی و عرضی بعد از عملیات سخت کاری سطحی بر روی لایه‌های سخت شده دیده می‌شوند. ترک‌های طولی در این نمونه برای مشاهده بهتر با استفاده از فلش با بزرگنمایی بالاتری مشخص گردیده‌اند.

در ادامه انجام فرایند برای بالا بردن ضخامت نیاز به انجام چند پاس جوشکاری دیگر بر روی لایه‌های جوش داده شده است. در نتیجه به منظور انجام این عمل لایه دوم هم جوش داده شد. بعد از اعمال لایه دوم ترک‌های طولی بیشتری نسبت به قبل مشاهده گردید. شکل ۳ نشان دهنده ترک‌های طولی موجود در لایه دوم جوش داده شده توسط سیم جوش MF-10-60-GRZ می‌باشد.



شکل ۵- ترک های طولی ایجاد شده در نمونه پس گرم شده با مشعل به مدت ۷ دقیقه

کاهش سرعت سرد شدن قطعه کار راهکار دیگری برای کاهش تعداد ترک است. لذا برای این امر با پاشیدن ماسه دقیقاً پس از اعمال لایه دوم تلاش شد تا سرعت کاهش دما کمتر شود. بعد از قرار دادن لایه جوش در زیر ماسه های سیلیسی به مدت ۱۵ دقیقه و بازرسی چشمی آن، ترک های طولی در قطعه کار مشاهده گردید. شکل (۶) تصویر قطعه کاری که در زیر ماسه مدفون شده و سپس تمیز گشته و در نهایت مورد بازرسی قرار گرفته شده است را نمایش می دهد. ترک های ایجاد شده در این شکل نیز جهت نمایش بهتر، با استفاده از فلش مشخص شده اند.

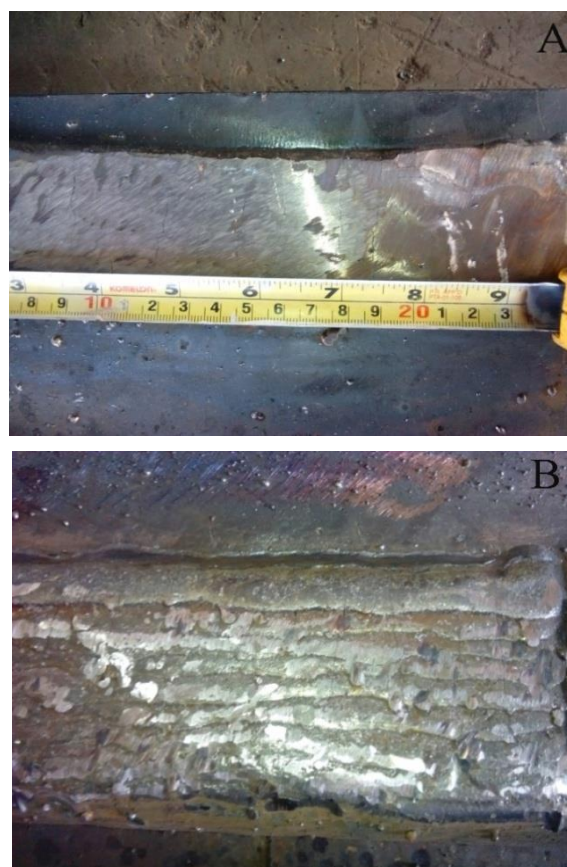


شکل ۶- ترک های طولی ایجاد شده در لایه دوم سرد شده زیر ماسه SiO_2

پیشنهاد دیگری که می تواند مفید باشد، ترکیب دو روش با هم است. لذا به منظور رسیدن به لایه ی دوم سخت کاری شده عاری از ترک استفاده از دو تکنیک همزمان افزایش دمای بین پاسی و استفاده از پس گرمایش بعد از اعمال لایه دوم است. در

شایان ذکر است که سنگ زدن آرام فلز جوش ایجاد ترک های طولی را به دنبال نداشت اما در شرایطی که اپراتور (سنگ کار) با سرعت بیشتری سطح جوش را سنگ بزند، ترک های طولی بیشتری به دلیل فشار بیشتر به قطعه کار، ایجاد می گردد. سنگ زدن فلز جوش رسوب شده از MF-10-60-GRZ فقط در حد حذف جرقه های جوش پیشنهاد شده و مقادیر بیشتر از آن توصیه نمی گردد. در شکل ۴ یک لایه جوش مناسب سنگ خورده و یک لایه نامناسب سنگ خورده به نمایش گذاشته شده است.

سومین راهکار مورد مطالعه برای حذف ترک های طولی، بر مبنای کم کردن سرعت سرد شدن با استفاده از انجام عملیات پس گرمایش بود. برای اعمال پس گرمایش از مشعل گاز بوتان و اکسیژن همراه با شعله خنثی استفاده گردید. بدین منظور در زمان های ۲، ۳، ۵، ۷ و ۸ دقیقه مشعل بر روی سطح جوش لایه دوم قرار گرفت تا دمای لایه دوم سخت کاری شده در حداکثر حالت به حدود ۶۵۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد برسد. این راهکار هم نتوانست عاملی برای حذف ترک های طولی در لایه های دوم سخت کاری باشد. شکل (۵) ترک های طولی را که در قطعات پس گرم شده مشاهده شده را نشان می دهد.



شکل ۴- سنگ زنی لایه جوش داده شده بوسیله سیم جوش MF-10-60-GRZ در شرایط (A) حالت نامناسب، (B) حالت مناسب

با توجه به اطلاعات موجود در کاتالوگ‌های شرکت‌های سازنده سیم جوش‌های سخت‌کاری سطحی، مانند ایساب، لینکولن، استودی و ... راهی عملی مناسبی برای اعمال لایه دوم با استفاده از فلز جوش MF-10-60-GRZ یافت نشد. بنابراین تصمیم گرفته شد که در بین لایه‌های سخت MF10 از لایه‌های نرم ER70S-6 استفاده شود تا از قرار گرفتن لایه‌های MF10 بطور مستقیم بر روی یکدیگر جلوگیری شود تا در نتیجه، ترک‌های طولی حذف گردند. بدین منظور، لایه‌های جوش ابتدا به صورت MF10+ER+MF10+ER+MF10 اعمال شدند. در این حالت مشاهده شد که در هنگام اعمال لایه سوم به بعد، فلز جوش MF10 شروع به کنده‌شدن و قلوه‌کن شدن از فلز پایه می‌کند. تصویر این رخداد در شکل (۱۰) و (۱۱) آورده شده است. لازم به ذکر است در این تصویر ترک طولی مشاهده نشد.



شکل ۸- لایه سخت‌کاری شده بوسیله جوش زیر پودری



شکل ۹- ترک‌های طولی ایجاد شده در لایه سخت‌کاری شده در جوشکاری زیر پودری

رویه شرح داده شده در بالا دو اشکال دارد، (۱) با سیستم ۵ لایه توضیح داده شده، ارتفاع کلی لایه جوش از ۱۵ میلیمتر فراتر خواهد رفت و (۲) در اثر جوشکاری لایه سوم به بعد احتمال قلوه‌کن شدن فلز جوش از فلز پایه مطرح می‌گردد. بحث قلوه‌کن شدن این لایه‌های سخت شده در مقالات محققان دیگر نیز مطرح شده است [۲۵]. به منظور رفع مشکلات ذکر شده تصمیم بر این شد که لایه اول با استفاده از سیم جوش ER70S-6 جوش داده شود و بصورت یکی در میان از سیم جوش MF-10-60-GP استفاده گردد. این روش با چهار لایه تمامی خواسته‌های جوش را برآورده کرده و جوشی بدون ایجاد ترک‌های طولی را به همراه خواهد داشت (شکل ۱۲). با انجام این عمل، تعداد ترک‌های عرضی کاهش یافته و از عمق آن‌ها نیز کاسته شد.

این حالت دمای بین پاسی از ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد تغییر داده شد و زمان اعمال پس‌گرمایش به ۷ دقیقه افزایش یافت. به جز نمونه‌ای که دمای بین پاسی آن ۳۵۰ درجه سانتیگراد بوده و بعد از جوشکاری نیز به مدت ۷ دقیقه با استفاده از مشعل بوتان-اکسیژن گرما داده شد، در سایر نمونه‌های این آزمون ترک‌های طولی مشاهده گردید. تصویر لایه دوم بدون ترک طولی بدست آمده از این آزمون در شکل (۷) آورده شده است. قابل ذکر است که هرچند با بررسی حالت‌های مختلف لایه‌ی دوم بدون ترک به دست آمد، اما این روش قابلیت عملی شدن برای جوشکاری قطعه با ابعاد واقعی که در ریل‌ها وجود دارد را ندارد و بدین منظور می‌بایست به سراغ روش‌های دیگری رفت.

با توجه به اینکه روش مطرح شده تحت شرایط خاصی (با دمای بین پاسی و پس‌گرمایش بالا) منجر به ایجاد جوش بدون ترک طولی می‌شود، به علت حرارت ورودی بالا در جوشکاری زیرپودری و به تبع آن سرعت سرد شدن پایین‌تر نسبت به سایر روش‌ها تصمیم گرفته شد که از سیم جوش مذکور با استفاده از روش جوشکاری زیرپودری استفاده شود. پس از انجام چندین تست با این روش، در مواردی ترک‌های طولی در لایه اول و در چند مورد نیز ترک‌های طولی در لایه دوم مشاهده شدند. شکل (۸) و (۹) نشان دهنده لایه‌های سخت ایجاد شده با استفاده از فرآیند جوش زیرپودری می‌باشد.



شکل ۷- اعمال لایه دوم با استفاده از فلز جوش MF-10-60-GRZ با دمای بین پاسی ۳۵۰ و ۷ دقیقه پس‌گرمایش



شکل ۱۲- جوش چهارلایه ER+MF10+ER+MF10 بدون هیچگونه ترک طولی در نمونه

باید اشاره شود که فرآیند جوشکاری لایه به لایه دارای پیچیدگی‌های ظریفی است. بطور مثال در چندین مورد از نمونه‌های جوش داده شده در لایه سوم که از جنس فلز پرکننده ER70S-6 بود ترک‌های طولی مشاهده شد. دلیل این امر حل شدن مقادیر زیادی از عناصر موجود در چدن پر آلیاژ در فلز جوش ER70S-6 بوده است. برای حل این مشکل حرارت ورودی در هنگام اعمال لایه سوم کاهش داده شد تا میزان امتزاج بین دو لایه کاهش یابد. در مقابل برای جلوگیری از قلوه کن شدن لایه‌های ایجاد شده هنگام جوشکاری لایه اول حرارت ورودی افزایش یافت تا امتزاج بیشتری بین لایه‌های جوش داده شده و فلز پایه ایجاد گردد.

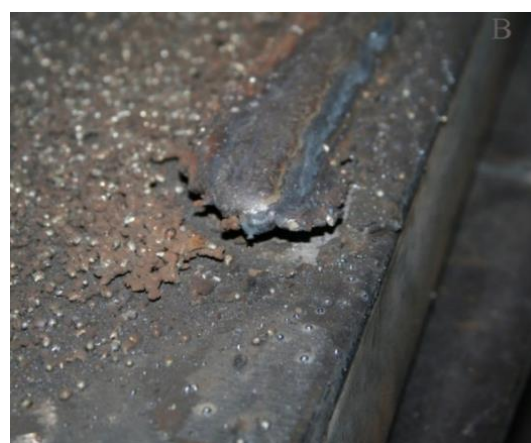
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش شد تا با مطالعه عوامل تاثیر گذار بر ترک طولی ایجاد شده در عملیات سخت کاری با جوشکاری (با سیم جوش سیم جوش MF-10-60-GRZ) به نتایج قابل اطمینان دست یافت که پس از انجام تحقیقات و آزمون‌های مختلف، نتایج زیر حاصل گردید.

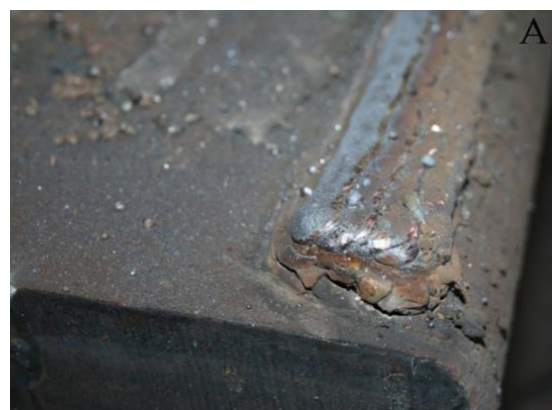
۱- پیش گرمایش ۱۲۰ درجه سانتیگراد برای جلوگیری از ایجاد ترک به دلیل کاهش نرخ خنک شوندگی فلز جوش و مناطق اطراف آن بدلیل کاهش نرخ انتقال حرارت و سرد شدن سریع پیشنهاد می‌گردد.

۲- هیچ یک از روش‌های معمول بیان شده در مقالات برای کاهش ترک‌های طولی در لایه دوم موثر نبود و تنها در شرایط خاص اعمال دمای بین پاسی حدود ۳۵۰ درجه سانتیگراد و پس گرمایشی به مدت ۷-۸ دقیقه توسط مشعل گاز بوتان-اکسیژن بر روی سطح جوش عملی گردید. اما این روش در ابعاد بزرگ و صنعتی قابلیت کاربرد ندارد. چرا که سبب تاب برداشتن قطعه شده و از طرفی صرف زمان و هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد.

۳- کنترل نرخ سرد شدن با استفاده از پوشاندن لایه ایجاد شده در زیر ماسه سیلیسی و همچنین تغییر در فرآیند جوشکاری از



شکل ۱۰- (A) کنده شدن فلز جوش از فلز پایه (لایه اول جوش داده شده از جنس MF10 می‌باشد)، (B) از زاویه‌ای دیگر



شکل ۱۱- (الف) بلند شدن فلز جوش از فلز پایه علت اعمال لایه سوم، (ب) سطح مقطع فلز کنده شده

- <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>, (2011).
- [7] Zikin, A., Hussainova, I., Katsich, C., Badisch, E., Tomastik, C., Advanced chromium carbide-based hardfacings, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 4270–4278, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.039>, (2012).
- [8] Liu, D., Liu, R., Wei, Y., Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 207, pp. 579-586, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.078>, (2012).
- [9] Lemke, J.N., Rovatti, L., Colombo, M., Vedani, M., Interrelation between macroscopic, microscopic and chemical dilution in hardfacing alloys, *Materials and Design*, Vol. 91, pp. 368-377, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.117>, (2016).
- [10] Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., Subramanian, C., Hardfacing using ferro-alloy powdermixtures by submerged arc welding, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 260, pp. 220-229, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076>, (2014).
- [11] DIN 8555, Committee, DIN. 2005.
- [12] Henderson, J.L., Bulloch, J.H., Alloy Classification of Hardfacing Materials, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 47, pp. 127-158, DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(91\)90096-K](https://doi.org/10.1016/0308-0161(91)90096-K), (1991).
- [13] Zhou, Y.F., Yang, Y.L., Jiang, Y.W., Yang, J., Ren, X.J., Yanga, Q.X., Fe–24 wt.%Cr–4.1 wt.%C hardfacing alloy: Microstructure and carbide refinement mechanisms with ceria additive, *Materials Characterization*, Vol. 72, pp. 77-86, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.07.004>, (2012).
- [14] Qi, X., Jia, Z., Yang, Q., Yang, Y., Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 5510-5514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>, (2011).
- [15] Azimi, G., Shamanian, M., Effects of silicon content on the microstructure and corrosion behavior of Fe–Cr–C hardfacing alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 505, pp. 598-603, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.084>, (2010).
- FCAW به SAW تاثیر بر جلوگیری از ایجاد ترک‌های طولی در لایه‌های جوش داده شده نداشت.
- ۴- استفاده از یک لایه نرم توسط سیم جوش ER70S-6 در بین لایه‌های سخت سیم جوش MF-10-60-GRZ بدلیل توان هضم تنش‌های پسماند، شرایط آلیاژ سازی و ... بسیار در کاهش ترک موثر بود. بهترین نتیجه زمانی ایجاد شد که ابتدا از لایه ER70S-6 بر روی فلز پایه استفاده گردید تا با در نظر گرفتن میزان امتزاج بین دو لایه، بحث حل شدن مقادیر زیادی از عناصر موجود در چدن پر آلیاژ در فلز جوش ER70S-6 منتفی گردد و کل فلز جوش رسوب داده شده قلوه کن نگردد.
- ### ۵- مراجع
- [1] Venkatesha, B., Sriker, K., Prabhakar, V.S.V., Wear characteristics of hardfacing alloys: state-of-the-art, *Procedia Materials Science*, Vol. 10, pp. 527-532, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.002>, (2015).
- [2] Hou, X., Zhao, B., Yang, J., Xing, X., Zhou, Y., Yang, Y., Yang, Q., Fe–0.4 wt.%C–6.5 wt.%Cr hardfacing coating: Microstructures and wear resistance with La₂O₃ additive, *Applied Surface Science*, Vol. 317, pp. 312-318, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.118>, (2014).
- [3] Buchely, M.F., Gutierrez, J.C., Le´on, L.M., Toro, A., The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, Vol. 259, pp. 52-61, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.002>, (2005).
- [4] Correa, E.O., Alcântara, N.G., Valeriano, L.C., Barbedo, N.D., Chaves, R.R., The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 276, pp. 479-484, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>, (2015).
- [5] Mendez, P.F., Barnesa, N., Bell, K., Borle, S.D., Gajapathic, S.S., Guest, S.D., Izadi, H., Gol, A.K., Wooda, G., Welding processes for wear resistant overlays, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 189, pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>, (2013).
- [6] Qi, X., Jia, Z., Yang, Q., Yang, Y., Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing meta., *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 5510-5514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.06.027>, (2011).

- [21] Ferrous Welding Metallurgy, American welding society. 5th Edition, (2004).
- [22] Shahabi, M., Welding defect, 1387, (in Persian),
- [23] Kou. S., Welding Metallurgy. 2th Edition, A John willey & sons inc publication, DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2003.197>, (2003).
- [24] Hornung, J., Zikin, A., Pichelbauer, K., Kalin, M., Kirchgäßner, M., Influence of cooling speed on the microstructure and wear behaviour of hypereutectic Fe–Cr–C hardfacings, Materials Science & Engineering A, Vol. 576, pp. 243-251, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.029>, (2013).
- [25] Xiao, Y., Yefei, Z., Jian, Y., Xiaolei, X., Xuejun, R., Yulin, Y., Qingxiang, Y., Refinement of nano-Y₂O₃ on microstructure of hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing coatings, Journal of rare earths, Vol. 33, pp. 671-678, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60469-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60469-5), (2015).
- [16] Chatterjee, S., Pal, T.K., Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, pp. 61-69, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.025>, (2006).
- [17] Chang, C.M., Chen, Y.C., Wu, W., Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe–Cr–C hardfacing alloy, Tribology International, Vol. 43, pp. 929-934, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.045>, (2010).
- [18] Yang, J., Tian, J., Hao, F., Dan, T., Ren, X., Yang, Y., Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe–Cr–C alloy hardfacing metals with different La₂O₃ additives, Applied Surface Science, Vol. 289, pp. 437-444, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.186>, (2014).
- [19] Tsai, K.C., Jeng, S.L., Huang, J.Y., Prevention of delayed cracking of iron based hardfacing welds, Engineering Failure Analysis, Vol. 48, pp. 210-217, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.025>, (2015).
- [20] Fan, C., Chen, M.C., Chang, C.M., Wu, W., Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys, Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp. 908-912, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.010>, (2006).