

Journal of Welding Science and Technology of Iran jwsti.iut.ac.ir



Volume 7, Number 2, 2022

Effect of buffer layer and electrode composition on the mechanical properties of H13 steel repair welds using shielded metal arc welding

A. Ghorbani^(D), B. Beidokhti^{*(D)}

Materials and Metallurgical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received 20 December 2021 ; Accepted 26 January 2022

Abstract

The present study investigated the effect of austenitic stainless steel buffer layer and electrode composition on the properties of H13 tool steel repair welds. After quenching and tempering heat treatment, steel plates were welded and specimens were examined using metallography, hardness and bending tests. The microstructure of all weld metals contained the martensitic matrix with distributed chromium carbide precipitations; while the microstructure of the buffer layer was a mixture of austenite and ferrite with the skeletal morphology. The results showed that hardness of the welded specimens with the buffer layer was higher than that of the specimens without the buffer layer and the difference was more than 240 HV. According to the bending test results, the application of the buffer layer improved the weld toughness and bending properties of the welded specimens and it encouraged the ductile fracture mode in the weldments.

Keywords: Hot work tool steel, Welding, Mechanical properties, Buffer layer.

Corresponding Author: <u>beidokhti@um.ac.ir</u>



امين قربانى ២، بھروز بيدختى ២

گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی، مشهد

دريافت مقاله: 1400/09/29؛ پذيرش مقاله: 1400/11/06

چکیدہ

پژوهش حاضر به بررسی تاثیر آستر چقرمه فولاد زنگ نزن آستنیتی و ترکیب شیمیایی الکترود پوشش دار روی خواص جوش فولاد H13 پرداخته است. پس از انجام عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر، صفحات فولادی جوشکاری شدند و سپس نمونهها تحت آزمونهای متالوگرافی، سختی و خمش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ریزساختار فلزجوش در کلیه نمونهها بهصورت مارتنزیت همراه با فاز رسوبی کاربید کروم پراکنده در ساختار و در لایه آستر مخلوطی از آستنیت و فریت اسکلتی بود. نتایج آزمون سختی سنجی نشان داد که سختی فلزجوش دارای آستر فولاد آستنیتی از فلزجوش بدون آستر بیشتر است که این اختلاف بیش از 240 و یکرز بود. مطابق نتایج آزمون خمش، استفاده از آستر باعث افزایش چقرمگی جوش، تحمل تنش خمشی بالاتر و ایجاد شکستنرم در قطعه شد.

> كلمات كليدى: فولاد ابزار گرم كار، جوشكارى، خواص مكانيكى، آستر. کلمات کليدى: beidokhti@um.ac.ir

> > 1- مق*د*مه

فولادهای ابزار از دسته فولادهای با کیفیت بالا هستند که برای ساخت ابزارهای برش و شکلدهی به کار می روند. این فولادها که معمولاً شامل مقادیر نسبتاً زیادی تنگستن، مولیبدن، وانادیوم و کروم هستند، در شرایط بارگذاری ضربهای با سرعت بالا مانند قالب های فورج به کار می روند. در بعضی موارد دمای بالا هم به شرایط فوق افزوده می شود. فولاد ابزار H13 از نوع گرم کار کروم، مولیبدن و وانادیومدار است و در دسته فولادهای ابزار کروم دار قرار می گیرد. این نوع فولاد به دلایلی از جمله

مقاومت به سایش بالا در دماهای بالا و پایین، چقرمگی و انعطاف پذیری خوب، قابلیت تراشکاری و پولیشکاری عالی، استحکام داغ بالا و مقاوم به خستگی حرارتی، سختی پذیری عالی و اعوجاج پایین در عملیات حرارتی و سختکاری، کاربرد وسیعی در ساخت قالبهای اکستروژن و ریختهگری تحتفشار فلزات غیرآهنی مثل آلومینیوم، منیزیم، روی و مس دارد [1].

معمولاً دمای کاری این فولادها در صنعت بین 700 تا 1000 درجه سانتیگراد است و بهمرور زمان به علت فشار و دمای

کاری بالا دچار عیوبی مانند ترک شده و بهتدریج ازکارافتاده می شوند. به علت هزینه بالای تولید این فولادها و نیز اندازه بزرگ قطعات مورد استفاده در صنعت، تعویض این قطعات مقرون بهصرفه به نظر نمیرسد. بنابراین چاره دیگری برای حل این مشکل اتخاذ می شود که تعمیر قطعه به روش جوشکاری است. به دلیل حجم بالای جوشکاری موردنیاز و ابعاد بزرگ قطعات، روشهای جوشکاری غیر از روشهای دستی عملاً کاربردی ندارند. به علت ترکیب شیمیایی ویژه این فولاد، جوشکاری این فولاد با حساسیت و توجه ویژهای انجام می شود، چراکه به علت کربن نسبتاً زیاد، پس از جوشکاری استعداد بالایی برای شکل گیری ترک و ریزترک وجود دارد. نشان داده شده است که می توان مقاومت این فولادها را دربرابر خستگی حرارتی به کمک لایه نشانی به روش جوشکاری بهبود بخشيد [2] . شاه و همكارانش [3] نيز تحقيق مشابهي را روى بهبود مقاومت خستگی فولاد H13 درروش جوشکاری پیشرفته پرتوى الكتروني انجام داده اند.

مشکل دیگری که در این روش تعمیری وجود دارد، خواص سایشی ضعیف فلزجوش نسبت به فلزپایه است. کاتیر و همکارانش [4] نشان دادند توزیع ذرات کاربید وانادیم میتواند تا چهار برابر سختی لایه روکش داده شده را نسبت به آستر بهبود بخشد به منظور جلوگیری از ایجاد ترک، طرحی پیشنهاد شده است که در آن از یک فلز با چقرمگی بالا به عنوان آستر بین فلزپایه و فلز جوش استفاده شود [5]. این آستر به صورت جوشکاری نشانده می شود. بررسی هایی روی تأثیر آستر بر ریز ساختار و استحکام مکانیکی آن صورت گرفته است که عمدتاً روی اتصال نفوذی تمرکز کرده اند و توجه کمتری به لایه نشانی از طریق جوشکاری شده است[6].

بالاکریشنان و همکارانش [7] نشان دادند که استفاده از الکترود E307 به عنوان آستر میتواند اثر مثبتی در پوشش دهی فولاد 4340 داشته باشد. در مواردی نیز به لایه نشانی بهمنظور سختکاری سطحی برای کاربردهای هوا و فضا توجه شده است [8] . البته بررسی محققان مشخص کرده است که نرم بودن آستر میتواند عمر خستگی سیکل پایین را کاهش دهد [9] .

چندین پژوهش هم به نقش آستر بر ریزساختار و فصل مشترک جوش بين آلياژهاي غيرهمجنس يرداختهاند[11و10] . همچنين طبق گزارش گوالکو و همکارانش [12] ، در رسوب دهی فولاد H13 برای دستیابی به بهترین مقاومت سایشی باید حرارت ورودی و میزان اکسیژن موجود در اتمسفر جوشکاری حداقل باشد. اهمیت آستر از آن جهت پررنگ می شود که عدم کاربرد آن می تواند تأثیر منفی بر لایه رسوب داده شده بگذارد. بورگو و همکارانش [13] گزارش کردهاند که لایههای تعمیر شده فولادهای ابزار به روش جوشکاری لیزر به دلیل تنشهای باقیمانده کششی و وجود عیوب صفحهای رفتار خستگی ضعیفی از خود نشان میدهند. کونگ و همکارانش [14] از اجزای کمکی به منظور بهینهسازی استحکام و مقاومت به خستگی حرارتی استفاده کردند. علیرغم تحقیقات گسترده انجام شده در این زمینه، تنها بخش اندکی از این مطالعات روی قالبهای فورج بوده است. به علاوه نقش آستر در بهبود استحكام فصل مشترك ضمن تأمين ميزان سختى لازم جاي بررسی بیشتری دارد. از اینجهت تحقیق حاضر با هدف یافتن بهترین ترکیب لایه روکشی که دارای کیفیت اتصال مطلوبی به فلزيايه باشد و خواستههاي موردنظر از لحاظ سختي را نيز تأمين كند، انجام شد.

2- روش آزمایش 2-1- مواد اولیه

در بررسی حاضر از سه قطعه فولاد ابزار گرم کار AISI H13 (20×85×100 میلیمتر) بهعنوان فلزپایه، الکترود روکشدار SS E309L (قطر 2/5 میلیمتر) بهعنوان آستر، الکترود AMA 1600V (قطر 4 میلیمتر) و الکترود AMA 1622V (قطر 3/2 میلیمتر) بهعنوان لایه روکشی سخت استفادهشده است. ترکیب شیمیایی فلزپایه و الکترودها در جدول(1) ارائهشده

2-2- عمليات حرارتي نمونهها

با توجه به اینکه در قطعات صنعتی این جوشکاری جهت تعمیرات انجام می شود و بسیاری از قطعات نصب شده امکان

مواد مصرفی	كربن	موليبدن	نيكل	كروم	منگنز	سيليسيم	واناديوم	آهن
H13	0.4	1.3		5.2	0.3	1.0	1.0	ياقيمانده
309L	0.03	0.5	13.5	24.2	1.2	0.6	-	ياقيمانده
1600V	0.5	0.5	-	7.0	0.3	0.4	0.5	ياقيمانده
1622V	0.2	-	-	2.8	0.4	0.5	-	ياقيمانده

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلزپایه و الکترودهای مصرفی برحسب درصد وزنی.

جدول 2-کد نمونهها و الکترودهای مصرفی.							
روکش	آستر	كد نمونه					
1622V	ندارد	NSL22					
1622V	E309L	SL22					
1600V	E309L	SL00					

و در مرحله دوم، نمونه ها از دمای حدود 950 تا حدود 70 درجه سانتی گراد در روغن سرد شدند. پس از اتمام کوئنچ در روغن، مرحله اول تمپر آغاز شد. به این منظور قطعات درون کوره 590 درجه سانتی گراد قرار داده شدند و به مدت 70 دقیقه تمپر شدند. پس از پایان زمان تمپر اولیه، نمونه ها از کوره خارج شده و در هوا خنک شدند.



برای تمپر ثانویه، قطعات به مدت 70 دقیقه در دمای 575 درجه سانتی گراد قرار داده شدند و پس از پایان زمان تمپر دوم، نمونهها از کوره خارج و در هوا خنک شدند. این سیکل عملیات حرارتی مطابق با سیکل واقعی اعمال شده در شرکت پارت سازان مشهد می باشد که براساس آن ترکیب مناسبی از مقاومت به سایش و چقرمگی نسبی جهت کاربرد در ساخت قالبها حاصل می شود.

آنیل ندارند، لذا به منظور ایجاد شرایط مشابه جوش تعمیری قطعات صنعتي، ابتدا نمونهها مورد عمليات حرارتي كوئنچ و تمیر قرار گرفتند. به این منظور نمونهها به مدت یک ساعت در کوره با دمای 870 درجه سانتی گراد آستنیته شده و سپس تا دمای محیط داخل کوره سرد شدند. این شرایط باعث کاهش سختی قطعات و سهولت تراشکاری آنها شد. سپس روی هركدام از نمونهها يک شيار جناغي با زاويه 60 درجه و با عمق 10 میلیمتر بهصورت طولی و سرتاسری، همانطور که در شکل(1) دیده می شود، ایجاد شد. در ادامه یک سیکل عملیات حرارتی سختکاری روی قطعات انجام شد. آبکاری قطعات براساس یک سیکل عملیات حرارتی چندمرحلهای انجام شد. نمونهها ابتدا در یک کوره با دمای 820 درجه سانتی گراد قرار داده شدند، پس از گذشت حدود 35 دقیقه و اطمینان از همدما شدن نمونهها با دمای کوره، نمونهها به یک کوره با دمای 1040 درجه سانتی گراد منتقل شدند. نمونهها به مدت 45 دقیقه در کوره با دمای 1040درجه سانتی گراد نگهداشته شدند که 15 دقیقه برای همدما شدن و 30 دقیقه برای آستنیته شدن نمونهها در نظر گرفته شد. پس از پایان زمان لازم برای آستنیته شدن، نمونهها برای کوئنچ کردن از کوره خارج شدند. کوئنچ کردن نمونهها بهصورت دومرحلهای انجام شد؛ در مرحله اول، خنک کردن در هوا در بازه دمایی 950 تا 1040 درجه سانتی گراد انجام شد

2-3- جوشكاري نمونهها

نمونهها با شرایط کنترل شده و با هدف بررسی تأثیر نوع الکترود بر خواص جوش حاصل به سه صورت متفاوت جوشکاری شدند. در دو نمونه از آستر با چقرمگی بالا استفاده شد و یکی ازنمونهها بدون آستر جوشکاری شد. برای نشاندادن مشخصات الکترودهای مصرفی، برای هر نمونه یک کد در نظر گرفته شده که در جدول(2) ارائه شده است.

حروف SL در ابتدای کدها مشخص کننده وجود آستر و حروف NSL مشخص کننده عدم استفاده از آستر است. در جوشکاری هر سه نمونه مجموعهای از شرایط به صورت یکسان اعمال شد. همه نمونه ها در کوره با دمای 350 درجه سانتی گراد حدود 50 دقیقه پیش گرم و در کوره با دمای 650 درجه سانتی گراد به مدت 2 ساعت پس گرم شدند. دمای بین پاسی در تمام مراحل مدت 2 ساعت پس گرم شدند. دمای بین پاسی در تمام مراحل جوشکاری در حدود 350 درجه سانتی گراد رعایت شد. نشاندن آستر چقرمه با جریان 145 آمپر و جوشکاری پاس های روکش الکترودها در کوره با دمای 350 درجه به مدت تقریبی 40 دقیقه نخشک شدند. برای نمونههای دارای آستر، ابتدا یک پاس جوشکاری با الکترود E309 انجام شد و با کنترل دمای بین

2-4- متالو گرافي

برای بررسی ریزساختاری نمونه ها، از هر قطعه یک نمونه متالوگرافی به صورتی که شامل فلزپایه، منطقه متأثر از حرارت، آستر و جوش روکشی باشد، تهیه شد. قطعات به روش مانت گرم آماده شده و سپس سنباده زنی و پولیش شدند. برای حکاکی کردن آستر از جنس فولاد زنگ نزن، نمونه به مدت 70 ثانیه در محلول ویللا %2 (شامل 1 گرم اسید پیکریک، قمیلی لیتر اسید هیدرو کلریک، 100 میلی لیتر اتانول) نگه داشته شد. همچنین برای اطمینان از صحت شناسایی فازها و نتایج متالو گرافی از محلول های اسید اگزالیک (حاوی 10 میلی لیتر اسید اگزالیک و 100 میلی لیتر آب) و نیتال %2 (شامل 2 میلی لیتر اسید نیتریک و 80 میلی لیتر الکل) نیز کمک گرفته شد.

بررسیهای کمی میکروسکوپی توسط نرم افزار آنالیز تصویر MIP انجام شد.

5-2- آزمون،های مکانیکی

برای هرکدام از نمونههای جوشکاری شده یک پروفیل سختی در مقیاس ویکرز و با بار 500 گرم توسط دستگاه بوهلر تهیه شد. به این منظور، سختی در طول یک خط از فلزپایه به سمت منطقه متأثر از حرارت، آستر و جوش روکشی اندازه گیری شده است. برای ریزسختی سنجی هم از نیروی 100 گرم استفاده شده است. آزمون خمش نیز به صورت عرضی مطابق با استاندارد اتصال آستر به فلزپایه و فلز جوش انجام شد.

3- نتايج و بحث

3-1- بررسي ريزساختاري

بررسیهای متالوگرافی مشخص کرد که ریزساختار فلزپایه از مارتنزیت بازپخت شده تشکیلشده است. شکل (2) ریزساختار فلزپایه را نشان میدهد. در این تصاویر مقادیری آستنیت باقیمانده به رنگ روشن و مقداری کاربید هم دیده می شود.



شكل 2- ريزساختار فلزپايه.

تشخیص مورفولوژی مارتنزیت از روی تصاویر میکروسکوپ نوری دشوار است ولی به نظر میرسد که مخلوطی از مارتنزیت لایهای و بشقابی است. به علت بالا بودن نسبی دمای بازپخت و تنشزدایی و همچنین زمان نسبتاً طولانی عملیات تنشزدایی

(دو ساعت) این فرصت برای بازپخت تیغههای مارتنزیت و نرم شدن آنها وجود داشته است. وجود آستنیت باقیمانده احتمالی در ساختار را میتوان به نرخ سرمایش پایین تر روغن نسبت به آب و عدم توان کافی محیط روغن برای تبدیل تمام ریز ساختار به مارتنزیت مرتبط دانست. به علاوه مقدار کربن فولاد نیز زیاد است که باعث پایین آمدن دمای پایان تشکیل مارتنزیت (M) می شود.از آنجاکه فولاد H13 دارای مقادیر فراوانی عناصر آلیاژی نظیر کربن، سیلیسیم و کروم است، فراوانی عناصر آلیاژی نظیر کربن، سیلیسیم و کروم است، بازپخت باعث تشکیل کاربیدهای ریز می شود و با بالا رفتن دما و زمان بازپخت، این ذرات در شت تر نیز می شوند. نینگ و همکارانش [16] نیز تشکیل کاربیدهای مرده اند.

نمونه NSL22 فاقد آستر بوده و فلزجوش آن از جنس الکترود 1622 است (شکل3). بهطورکلی جوشها ازنظر ریزساختاری دارای سه بخش مجزا شامل فلزپایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلزجوش هستند. درباره فلزپایه و علل مارتنزیتی بودن آن پیشتر توضیح داده شد و تمرکز در این بخش معطوف به منطقه متأثر از حرارت(HAZ) و فلزجوش است.

درباره ریزساختار مربوط به منطقه HAZ (شکل 3-الف و 3-ب)، نکته قابلبحث بزرگتر شدن اندازه دانهها با نزدیکی شدن به فلزجوش است. علت درشت تر بودن دانهها در نزدیکی فلزجوش، حرارت بیشتر در این نواحی و درشت شدن دانههای آستنیت به علت حرارت بیشتر است. در دماهای بالا که آستنیت تنها فاز پایدار است فرایند رشد دانه بهراحتی انجام می شود و در نتیجه پس از سرد شدن ساختار مارتنزیتی خشنی حاصل می شود. مقادیر اندازه دانه در فلزپایه در محدوده μ 7-4 و در ناحیه LAZ نزدیک فلزچایه سا ۲۹-11 بود، در حالی که در مناقه LAZ نزدیک فلزجوش دانههای در حدود μμ 58 نیز مشاهده شد.

از شکل(3-ج) بهوضوح قابل دریافت است که ساختار زمینه ناحیه HAZ مارتنزیتی است. درمناطقروشنتر، این مارتنزیتها، نازکتر و ریزتر و بهصورت تیغهای هستند درحالیکه در لایه

تیرهتر، مارتنزیتها درشتتر بوده و از حالت تیغهای به حالت بشقابی تغییر فرم دادهاند. درصد کربن می تواند در تغییر موفولوژی مارتنزیت تأثیر گذار باشد. با افزایش درصد کربن، مارتنزیت به صورت بشقابی در ساختار ظاهر می شود. در این شرایط گزارش شده است که بستههای مارتنزیت دارای ساختار دوقلویی شدیدی میباشند [17]. اگرچه نوع الکترود در این نمونه تغییر نکرده اما ساختار فلزجوش در پاس میانی به علت حرارت ناشی از پاس،های روکش حاوی مقادیر زیادی مارتنزیت تمير شده است (شکل3-د). همچنين به دليل عمليات تنشرزدايي نیز مقداری بازیخت اتفاق افتاده است. تفاوت عمده این ساختار با فلزپایه این است که فازهای اولیه در اثر انجماد به وجود میآیند درحالیکه در فلزپایه ساختار ابتدایی کار گرم شده است. به نظر میرسد که در اینجا نیز مقادیر فراوانی از آستنیت باقیمانده وجود دارد. در این منطقه نرخ سرمایش از نرخ بحرانی تشكيل مارتنزيت بالاتر بوده و لذا مارتنزيتي شدن ساختار براثر نرخ سرمایش بالا ناشی از فروکشی حرارت توسط فلزپایه رخداده است. ریزساختار پاس نهایی جوشکاری نیز مارتنزیتی است (شكل3-ه).

در نمونه SL22، ریزساختار منطقه متأثر از حرارت مشابه نمونه NSL22، مارتنزیتی است. در این نمونه، با توجه به اینکه جنس آستر فولاد زنگ نزن آستنیتی است، ملاحظه می شود که ساختار از نوع آستنیتی به همراه لایه های فریت است (شکل 4-الف). نوع انجماد فولاد زنگ نزن، به صورت FA است که در ابتدا فریت دلتا منجمد شده و در ادامه این فریت به آستنیت تبدیل می شود [18].

این تبدیل فاز بهطور کامل انجام نمی شود و مقادیری فریت در بین دندریت های آستنیت باقی می ماند. مور فولوژی فریت از نوع اسکلتی است. کشیدگی فریت به دلیل فروکشی حرارتی توسط فلزپایه و رشد ستونی قابل ملاحظه است. البته در اینجا رقیق شدن توسط فلزپایه کمی این استحاله را از حالت معمول خود خارج می کند. فلز جوش دارای زمینه مارتنزیتی است. در شکل (4-ب) این زمینه مارتنزیتی که به رنگ روشن بوده و در صد بیشتری از تصویر را تشکیل داده به خوبی قابل مشاهده است.

Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-04



شکل د- ریزساختار. الف - مرز بین فلزپایه و منطقه متانر از حرارت. ب- مرز بین منطقه متأثر از حرارت و آستر، ج - منطقه متأثر از حرارت، د- فلزجوش در پاس میانی، ه- فلزجوش در پاس روکش نمونه NSL22.

در ساختار فلزجوش یک فاز رسوبی به صورت پراکنده وجود دارد. این فازها در شکل (4-ب) با علامت قرمز مشخص شده است. این فازها دارای سختی حدود 420 ویکرز هستند. با توجه به درصد نسبتاً بالای کروم در ترکیب شیمیایی فلزپایه و الکترود و نیز سختی آنها، به نظر میآید این فازها کاربید کروم هستند که به علت دمای نسبتاً بالا و زمان طولانی پس گرم شدن (دو ساعت در دمای 650 درجه سانتی گراد) رشد کرده اند. رسوب کاربیدها توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است [19].



شکل 4- ریزساختار مربوط به نمونه SL22: الف- آستر چقرمه از جنس SS309L ب- فلزجوش در پاس روکش: رسوبات کاربید کروم روی شکل با حلقههایی دایره مانندی مشخص شده اند.

علت تفاوت این ساختار با نمونه NSL22، ذوب جزئی آستر و مخلوط شدن عناصر آن با مذاب فلزجوش است. با توجه به اینکه آستر دارای عناصر آلیاژی زیادی است ساختار فلزجوش بهطور کامل تغییر کرده است. در بعضی از قسمتها بهصورت

موضعی مارتنزیت تشکیل شده است که می تواند ناشی از تفاوت سرعت سرمایش به صورت موضعی باشد. دلیل دیگری که می تواند باعث تشکیل مارتنزیت شود سرعت بالای انجماد و عدم وجود زمان کافی برای مخلوط شدن کامل در همه قسمتها و درنتیجه تفاوت موضعی ترکیب شیمیایی است. چنین ساختار غیریکنواختی در کار دیگران هم گزارش شده است [20].

در نمونه SL00، ساختار آستر چقرمه و منطقه متأثر از حرارت مشابه نمونه SL22 است. ساختار فلزجوش نیز همانند نمونه قبلی مارتنزیت همراه با کاربیدهای کروم است. همان طور که در شکل (5) دیده می شود کاربید کروم بر اثر حضور کروم در لایه آستر فولاد SS309L (حاوی حدود ۲۴% کروم) و نیز وجود (75% کربن و 7% کروم در ترکیب الکترود V 1000 روکش در خط ذوب بین دو پاس آستر و روکش به صورت لایه های سیاه رنگی دیده می شود. حرارت ثانویه ناشی از اعمال پاس روکش هم در تشکیل این فاز کاربیدی نقش مؤثری دارد.



شکل 5- ریزساختار فلزجوش نمونه SL00 : (پایین) پاس اول با الکترود E309L و (بالا) پاس دوم با الکترود V 1600.

2-3- نتايج سختي سنجي

برای مقایسه سختی فلزپایه و نواحی مختلف جوش، از هر نمونه یک پروفیل سختی تهیه شد. سختی سنجی از نقطهای روی فلزپایه شروع شده، در HAZ و آستر و فلزجوش ادامه یافته و در فلزپایه طرف مقابل به پایان می رسد. مطابق شکل (6) برای

هرکدام از نمونهها یک نمودار تهیهشده که نشاندهنده سختی نواحی مختلف مورد آزمایش است.



مطابق نتایج سختی سنجی نمونه فاقد آستر (NSL22) دو نکته حائز اهمیت وجود دارد. اول اینکه، سختی میانگین فلزپایه 388 ویکرز و سختی میانگین فلزجوش 340 ویکرز است؛ و این یعنی فلزجوش نتوانسته سختی برابر با فلزپایه را ایجاد کند. پایین بودن سختی فلزجوش بهطور مستقیم با ترکیب شیمیایی الکترود مرتبط است؛ چراکه کربن، سیلیسیم و کروم موجود در الکترود بهصورت قابلتوجهی نسبت به مقادیر همین عناصر در فلزپایه کمتر هستند و طبیعتاً فلزجوش حاصل سختیپذیری کمتری داشته است.

نکته دوم، سختی خیلی زیاد ناحیه HAZ نسبت به بقیه نواحی است. سختی میانگین این ناحیه 675 ویکرز است که نسبت به فلزپایه و فلزجوش خیلی بیشتر است. این ناحیه نزدیکترین منطقه به حوضچه مذاب حاصل از جوشکاری است و درجه حرارت بیشتری را نسبت به نقاط دیگر تجربه میکند. علت سختی زیاد این منطقه را میتوان به حضور 3 عامل به طور همزمان نسبت داد. وجود حدود %55/0 کربن در ساختار فلزپایه و سختیپذیری بالای آن، درجه حرارت بالا و مناسب برای آستنیته شدن و نیز نرخ سرمایش کافی برای تشکیل مارتنزیت، باعث ایجاد ساختار مارتنزیتی و سختی بالا در منطقه HAZ

بزرگتر دانههای آستنیت اولیه و درنتیجه درشت شدن مارتنزیتهای تشکیل شده جدید است. از طرفی شرایط عملیات حرارتی فلزپایه به صورتی بوده که دو مرحله تمپر دمای بالا را تجربه کرده که باعث کاهش سختی شده است؛ اما در HAZ آستنیت اولیه دوباره به وجود آمده و بدیهی است که مارتنزیت جدید تشکیل شده این مراحل تمپر را تجربه نکرده و ازاین جهت دارای سختی بسیار بالایی است.

نمونه SL22 دارای آستر چقرمه است که با استفاده از الکترود E309L نشانده شده است. در نمودار این نمونه 4 ناحیه کلی وجود دارد. فلزيايه دارای سختی ميانگين حدود 370 ويکرز است. در این نمونه، مشابه نمونه قبلی سختی منطقه HAZ بسیار بالاست و بهطور میانگین دارای سختی 660 در مقیاس ویکرز است. به نظر میرسد دلایلی که در ارتباط با سختی بالای HAZ نمونه بدون آستر ارائه شد، برای توجیه سختی بالای HAZ در این نمونه هم قابل ارائه است؛ اما همانطور که در نمودار مربوطه دیده می شود آستر که از جنس فولاد زنگ نزن 209L است، دارای سختی بهمراتب پایین تری از فلزیایه، HAZ و فلزجوش است؛ بهطورىكه سختى ميانگين اين لايه حدود 235 ویکرز است. این مقدار سختی، با توجه به ترکیب شیمیایی و ریزساختار فاز حاصل کاملاً قابل پیش بینی است؛ چراکه این الکترود دارای مقدار بسیار کمی کربن (%0/0) بوده و عملاً قابلیت سختی پذیری و ایجاد کاربید ندارد. از طرف ديگر اين الکترود داراي مقدار نسبتاً بالايي نيکل ((13/5) است که یک عنصر پایدارکننده آستنیت میباشد و باعث تشکیل زمینه آستنیتی در ساختار شده است.

نکته قابل توجه در مورد این نمونه، سختی نسبتاً بالای فلزجوش است. همان طور که از نمودار برمی آید، سختی متوسط فلزجوش حدود 588 ویکرز بود، این در حالی است که سختی فلزجوش در نمونه SSL22 که تنها در داشتن آستر با این نمونه تفاوت داشت، حدود 340 ویکرز می باشد. همان طور که در تصاویر متالو گرافی مشاهده شد، با توجه به ذوب موضعی آستر و تشکیل مذاب با ترکیب جدید، ساختار فلزجوش شامل مارتنزیت با عناصر آلیاژی بالا و مقادیر کمی کاربید کروم بود؛

درنتیجه این مارتنزیت کاملاً متفاوت (ازلحاظ ترکیب آلیاژی و مورفولوژی) دارای سختی بسیار بالاتری است.

نمونه SL00 دارای آستر از جنس E309L و روکش از جنس الکترود V 1600 بود. الکترود روکشی مورداستفاده در این نمونه دارای عناصر آلیاژی بیشتری نسبت به الکترود V 2022 و حتی نسبت به فلزپایه است؛ و با توجه به این موضوع میتوان سختی بالاتری را انتظار داشت. میانگین سختی حاصل از فلزجوش در این نمونه حدود 663 ویکرز بود. نواحی فلزپایه، HAZ و آستر دارای محدوده سختی تقریباً مشابهی با نمونه قبلی هستند. تمرکز نمونه های قبلی معطوف است. در ترکیب شیمیایی این الکترود حدود %07 کربن و حدود %7 کروم دیده میشود. وجود این عناصر باعث ایجاد ساختار مارتنزیتی و نیز مقادیر متنابهی کاربید میشود. این دو عامل به طور همزمان باعث بالا رفتن

3-3- نتایج آزمون خمش سەنقطەای

این آزمون بهمنظور بررسی میزان چقرمگی آستر و فلزجوش و نيز كيفيت اتصال أستر به فلزيايه و فلزجوش انجام شد. نكته قابلتوجه درباره هر سه نمونه، ايجاد ترک از ريشه جوش و رشد آن درون فلزجوش بود. به طور کلی رفتار خمشی نمونهها از دو مكانيزم كلي تبعيت مي كردند. مكانيزم نخست مطابق شکل (۷-الف) مربوط به قطعه فاقد آستر بود که ترک ایجادشده در فلزجوش گسترش یافته و باعث شکست نمونه شد. مکانیزم دوم در نمونههای دارای آستر چقرمه دیده شد که رشد ترک با رسیدن به لایه با چقرمگی زیاد متوقف گردید و تأثیر اعمال بار بیشتر، در تغییر فرم مومسان لایه با چقرمگی زیاد قابل مشاهده بود. همان طور که در شکل (7-ب) دیده می شود، برای این نمونهها ترک اول از فلزپایه شروعشده و ادامه مییابد، ولی با رسیدن به فلزجوش حاصل از آستر چقرمه متوقف می گردد. در ادامه، اعمال نیرو باعث تغییر شکل مومسان آستر چقرمه شده و با اعمال نیروی بیشتر، ترک دوم از فلزجوش میانی شروع می شود و ضمن گسترش در آن باعث ترک و شکست نمونه شده است. ضمن اینکه وجود آستر چقرمه، باعث شکست نرم در قطعه شده و از شکست ناگهانی و ترد ممانعت کرده است. از آنجاکه ضخامت آستر چقرمه در این نمونه کمی بیشتر از نمونه قبلی است، نمونه تغییر شکل مومسان بیشتری داشته و انرژی بیشتری جذب نموده است؛ اما به علت استحکام پایین تر فلز آستر از فلز جوش، نمونه نیروی کمتری را نسبت به نمونه قبلی تحمل کرده است.



با مقایسه نمونههای آستر دار با یکدیگر که خواص بهتری نسبت به نمونه بدون آستر داشته اند میتواند دریافت که استفاده از الکترود روکشی ۱۶۰۰ (با درصد کروم بالا) باعث سختی بالاتر و به کارگیری الکترود روکشی ۱۶۲۲ (با درصد کروم پایین) موجب تغییر شکل تا شکست بیشتری برای فلزجوش نهایی می شود.

4- نتيجه گيرى

در این پروژه تلاش شد تا اثر آستر و لایه نهایی روکش بر ریزساختار و سختی جوش تعمیری فولاد H13 بررسی شود. نتایجی که از این بررسی به دست آمد به شرح زیر است: - ریزساختار فلزپایه مارتنزیت تمپر شده بود که دارای مقداری آستتنیت باقیمانده و ذرات کاربید میباشد. ناحیه متأثر از حرارت در تمام نمونهها ساختار مارتنزیتی دارد. آستر چقرمه استفادهشده دارای ساختار آستنیتی به همراه لایههای فریت با مورفولوژی اسکلتی است. در هر سه نمونه ریزساختار شكست فلزجوش شد.



شکل 7- تصویر نحوه رشد ترک حین آزمون خمش: الف- مکانیزم 1-اشاعه مستقیم داخل فلزجوش، ب- مکانیزم 2- اشاعه دومرحله ای در نمونههای آستردار.

نمودار جذب نیروی نمونه ها حین آزمون خمش در شکل (8) دیده می شود. نمودار مربوط به نمونه NSL22 (بدون آستر) نشان دهنده تحمل نیروی نسبتاً بالا در عین تغییر شکل کمتر و شکست ناگهانی است که می تواند نشانه ای از شکست ترد باشد. علت این اتفاق، پایین بودن چقرمگی فلز جوش و نبود آستر چقرمه و درنتیجه کرنش کمتر نمونه تحت آزمون است. ضمن اینکه استحکام فلز جوش نسبت به نمونه های دارای آستر چقرمه قابل توجه است و اگر چه تغییر شکل زیادی نمی دهد اما نیروی زیادی را تا شروع ترک و شکست تحمل می کند.

در نمونه های دارای آستر، برای نمودار مربوط به نمونه SL00 می توان دریافت که بیشترین تنش قابل تحمل در لایه با چقرمگی بالا و روکش الکترود ۱۶۰۰ اتفاق افتاده و با ایجاد ترک در فلزجوش، نیروی مؤثر کاهشیافته و قطعه به شکست نزدیکتر شده است.

آستر استفادهشده در نمونه SL22 هم تأثیری مشابه نمونه قبلی داشته و باعث جذب انرژی بیشتر و به تأخیر انداختن رشد 6-Vigraman, T., Ravindranand, D., Narayanasamy, R., "Diffusion Bonding of AISI 304L Steel to Low-Carbon Steel with AISI 304L Steel Interlayer", *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 594-602, 2012.

7-Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Madhusuhan Reddy, G., Sivakumar, K., "Effect of Buttering and Hardfacing on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armour Steel Joints", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 469-479, 2011.

8-Balakrishnan, M., Balasubramanianand, V., Reddy, G.M., "Effect of Hardfaced Interlayer Thickness on Ballistic Performance of Armour Steel Welds", *Materials and Design*, Vol. 44, pp. 59-68, 2013.

9-Wu, Q., Lu, F., Cui, H., Liu, X., Wang, P., Tang, X., "Role of Butter Layer in Low-Cycle Fatigue Behavior of Modified 9Cr and CrMoV Dissimilar Rotor Welded Joint", *Materials and Design*, Vol. 59, pp. 165-175, 2014.

10- Madhusudhan Reddy, G., Venkata Ramana, P., "Role of Nickel as an Interlayer in Dissimilar Metal Friction Welding of Maraging Steel to Low Alloy Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 66-77, 2012.

11- Ren, D., Liu, L., "Interface Microstructure and Mechanical Properties of Arc Spot Welding Mg-Steel Dissimilar Joint with Cu Interlayer", *Materials and Design*, Vol. 59, pp. 369-376, 2014.

12- Gualco, A., Svoboda, H.G., Surian, E.S., de Vedia, L.A., "Effect of Welding Procedure on Wear Behaviour of a Modified Martensitic Tool Steel Hardfacing Deposit", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 4165-4173, 2010.

13- Borrego, L.P., Pires, J.T.B., Costa, J.M., Ferreira, J.M., "Mould steels repaired by laser welding", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, pp. 596-607, 2009.

14- Cong, D., Zhou, H., Yang, M., Zhang, Z., "The mechanical properties of H13 die steel repaired by a biomimetic laser technique", *Optics & Laser Technology*, Vol. 53, pp. 1-8, 2013.

15-ASTM E190-92, *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*, Re-approved ed., 2003. 16- Ning, A., Mao, W., Chen, X., Guo, H., Guo, J., "Precipitation Behavior of Carbides in H13 Hot Work Die Steel and Its Strengthening during Tempering", *Metals*, Vol. 7, pp. 70-84, 2017.

17- Liu, Y.J., Li, Y.M., Tan, Y.H., Huang, B.Y., "Apparent Morphologies and Nature of Packet Martensite in High Carbon Steels", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 13, pp. 40-46, 2006.

18- Khakzad, A., *Welding and Metallurgy of Stainless Steels*, Tehran: Tarrah Publication, 2007.

19- Andrén, H.O., Karagöz, S., Guangjun, C., Lundin, L., Fischmeister, H., "Carbide precipitation in chromium steels", *Surface Science*, Vol. 246, pp. 246-251, 1991.

20- He, Y., Zhong, M., Beuth, J., Webler, B., "A Study of Microstructure and Cracking Behavior of H13 Tool Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion Using Single-tracks, Multi-track Pads, and 3D Cubes", *Journal* of Materials Processing Technology, Volume 286, 116802, 2020. فلزجوش بهصورت مارتنزیتی است که فاز رسوبی کاربید کروم در ساختار پراکندهشده است.

- از مقایسه سختی دو نمونهای که نوع الکترود مصرفی آنها یکسان است و فقط در داشتن یا نداشتن آستر باهم تفاوت دارند، مشخص شد که استفاده از آستر چقرمه فولاد زنگ نزن باعث افزایش سختی فلزجوش به مقدار 240 ویکرز شد که علت این اتفاق انحلال مقادیری از عناصر آلیاژی آستر در فلزجوش بود. همچنین افزایش درصد کروم و کربن در پاس نهایی می تواند سختی فلزجوش را به مقدار 85 ویکرز بیشتر افزایش دهد.

- نمونههایی که دارای آستر چقرمه بودهاند، در آزمون خمش چقرمگی بهتری از خود نشان دادند و بهصورت نرم و همراه با تغییر شکل مومسان بیشتری نسبت به نمونه فاقد آستر شکستند. - سختی ناحیه متأثر از حرارت در تمام نمونهها حدود 280-270 ویکرز بالاتر از سختی فلزپایه بود. این موضوع به میزان حرارت بالای منتقل شده از این ناحیه اشاره داشت که به علت فراهم بودن شرایط و حذف اثر تمپرکردن، باعث تبدیل ساختار به مارتنزیت شده بود.

منابع

1- مهدی عزیزیه، بررسی جوش فولاد ابزار H13، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، 1383.

2- Skumavc, A., Tušek, J., Nagode, A., Klobčar, D., "Thermal fatigue study of tungsten alloy WNi28Fe15 cladded on AISI H13 hot work tool steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 285, pp. 304-311, 2016.

3- Shah, M., Ali, M., Sultan, A., Mujahid, M., Mehmood, H., Ullah Dar, N., Shuaib, M., "An Investigation into the Fatigue Crack Growth Rate of Electron Beam-Welded H13 Tool Steel: Effect of Welding and Post-Weld Heat Treatment", *Metallography, Microstructure, and Analysis,* Vol. 3, pp 114-125, 2014.

4- Kattire, P., Paul, S., Singh, R., Yan, W., "Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications", *Journal* of Manufacturing Processes, Vol. 20, pp. 492-499, 2015. 5- Barrena, M.I., Gómez de Salazar, J.M., Matesanz L., "Interfacial Microstructure and Mechanical Strength of WC–Co/90MnCrV8 Coldwork Tool Steel Diffusion Bonded Joint with Cu/Ni Electroplated Interlayer", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3389-3394, 2010.