



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

A. Ghorbani , B. Beidokhti\* 

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: [beidokhti@um.ac.ir](mailto:beidokhti@um.ac.ir)



## بررسی تاثیر نوع آستر و الکتروود بر خواص مکانیکی قالب‌های فولاد H13 بازسازی شده به روش جوشکاری با الکتروود پوشش دار

امین قربانی <sup>ID</sup>، بهروز بیدختی <sup>ID\*</sup>

گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی، مشهد

دریافت مقاله: 1400/09/29؛ پذیرش مقاله: 1400/11/06

### چکیده

پژوهش حاضر به بررسی تاثیر آستر چقرمه فولاد زنگ نزن آستنیتی و ترکیب شیمیایی الکتروود 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 به صورت 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 ویکرز بود. مطابق نتایج آزمون خمش، استفاده از آستر باعث افزایش چقرمگی جوش، تحمل تنش خمشی بالاتر و ایجاد شکست نرم در قطعه شد.

کلمات کلیدی: فولاد ابزار گرم کار، جوشکاری، خواص مکانیکی، آستر.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [beidokhti@um.ac.ir](mailto:beidokhti@um.ac.ir)

### 1- مقدمه

مقاومت به سایش بالا در دماهای بالا و پایین، چقرمگی و انعطاف‌پذیری خوب، قابلیت تراشکاری و پولیش‌کاری عالی، استحکام داغ بالا و مقاوم به خستگی حرارتی، سختی‌پذیری عالی و اعوجاج پایین در عملیات حرارتی و سخت‌کاری، کاربرد وسیعی در ساخت قالب‌های اکستروژن و ریخته‌گری تحت فشار 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

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

چندین پژوهش هم به نقش آستر بر ریزساختار و فصل مشترک جوش بین آلیاژهای غیرهمجنس پرداخته‌اند [10 و 11]. همچنین 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 می‌شود که عدم کاربرد آن می‌تواند 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 استحکام فصل مشترک ضمن تأمین میزان سختی لازم جای بررسی بیشتری دارد. از این جهت تحقیق حاضر با هدف یافتن بهترین ترکیب لایه روکشی که دارای کیفیت اتصال مطلوبی به فلزپایه باشد و خواسته‌های موردنظر از لحاظ سختی را نیز تأمین کند، انجام شد.

## 2- روش آزمایش

### 2-1- مواد اولیه

در بررسی حاضر از سه قطعه فولاد ابزار گرم کار AISI H13 ( $20 \times 85 \times 150$  میلی‌متر) به‌عنوان فلزپایه، الکتروود روکش‌دار SS E309L (قطر 2/5 میلی‌متر) به‌عنوان آستر، الکتروود AMA 1600V (قطر 4 میلی‌متر) و الکتروود AMA 1622V (قطر 3/2 میلی‌متر) به‌عنوان لایه روکشی سخت استفاده شده است. ترکیب شیمیایی فلزپایه و الکتروودها در جدول (1) ارائه شده است.

### 2-2- عملیات حرارتی نمونه‌ها

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

کاری بالا دچار عیوبی مانند ترک شده و به تدریج از کار افتاده می‌شوند. به علت هزینه بالای تولید این فولادها و نیز اندازه بزرگ قطعات مورد استفاده در صنعت، تعویض این قطعات مقرون به صرفه به نظر نمی‌رسد. بنابراین چاره دیگری برای حل این مشکل اتخاذ می‌شود که تعمیر قطعه به روش جوشکاری است. به دلیل حجم بالای جوشکاری مورد نیاز 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 می‌شود، چراکه به علت کربن نسبتاً زیاد، پس از جوشکاری استعداد بالایی برای شکل‌گیری ترک و ریزترک وجود دارد. نشان داده شده است که می‌توان مقاومت این فولادها را در برابر خستگی حرارتی به کمک لایه نشانی به روش جوشکاری بهبود بخشید [2]. شاه و همکارانش [3] نیز تحقیق مشابهی را روی بهبود مقاومت خستگی فولاد H13 در روش جوشکاری پیشرفته پرتوی الکترونی انجام داده‌اند.

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. به‌منظور جلوگیری از ایجاد ترک، طرحی پیشنهاد شده است که در آن از یک فلز با چقرمگی بالا به‌عنوان آستر بین فلزپایه و فلزجوش استفاده شود [5]. این آستر به‌صورت جوشکاری نشانده می‌شود. بررسی‌هایی روی تأثیر آستر بر ریزساختار و استحکام مکانیکی آن صورت گرفته است که عمدتاً روی اتصال نفوذی تمرکز کرده‌اند و توجه کمتری به لایه نشانی از طریق جوشکاری شده است [6 و 5].

بالاکریشن و همکارانش [7] نشان دادند که استفاده از الکتروود E307 به‌عنوان 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].

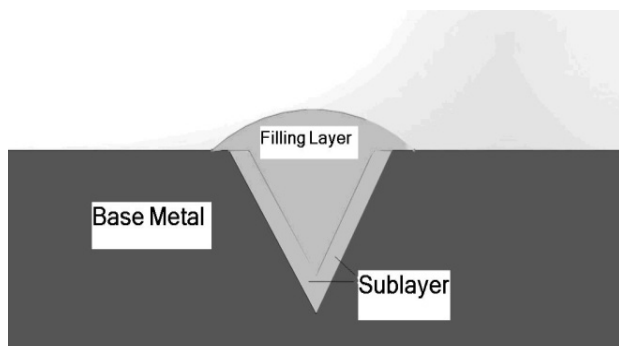
جدول 1- ترکیب شیمیایی فلز پایه و الکترودهای مصرفی برحسب درصد وزنی.

مواد مصرفی	کربن	مولیبدن	نیکل	کروم	منگنز	سیلیسیم	وانادیوم	آهن
H13	0.4	1.3	-	5.2	0.3	1.0	1.0	یاقیمانده
309L	0.03	0.5	13.5	24.2	1.2	0.6	-	یاقیمانده
1600V	0.5	0.5	-	7.0	0.3	0.4	0.5	یاقیمانده
1622V	0.2	-	-	2.8	0.4	0.5	-	یاقیمانده

جدول 2- کد نمونه‌ها و الکترودهای مصرفی.

کد نمونه	آستر	روکش
NSL22	ندارد	1622V
SL22	E309L	1622V
SL00	E309L	1600V

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



شکل 1- وضعیت شماتیک لایه‌های جوشکاری شده.

برای تمپر ثانویه، قطعات به مدت 70 دقیقه در دمای 575 درجه سانتی‌گراد 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 می‌باشد که براساس آن ترکیب مناسبی از مقاومت به سایش و چقرمگی نسبی جهت کاربرد در ساخت قالب‌ها حاصل می‌شود.

آبیل ندارند، لذا به منظور ایجاد شرایط مشابه جوش تعمیری قطعات صنعتی، ابتدا نمونه‌ها مورد عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر قرار گرفتند. به این منظور نمونه‌ها به مدت یک ساعت در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستینیت شده و سپس تا دمای محیط داخل کوره سرد شدند. این شرایط باعث کاهش سختی قطعات و سهولت تراشکاری آن‌ها شد. سپس روی هرکدام از نمونه‌ها یک شیار جناغی با زاویه 60 درجه و با عمق 10 میلی‌متر به صورت طولی و سرتاسری، همان‌طور که در شکل (1) دیده می‌شود، 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 سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد منتقل شدند. نمونه‌ها به مدت 45 دقیقه در کوره با دمای 1040 درجه سانتی‌گراد نگه‌داشته شدند که 15 دقیقه برای هم‌دما شدن و 30 دقیقه برای آستینیت شدن نمونه‌ها در نظر گرفته شد. پس از پایان زمان لازم برای آستینیت شدن، نمونه‌ها برای کوئنچ کردن از کوره خارج شدند. کوئنچ کردن نمونه‌ها به صورت دومرحله‌ای انجام شد؛ در مرحله اول، خنک کردن در هوا در بازه دمایی 950 تا 1040 درجه سانتی‌گراد انجام شد

### 3-2- جوشکاری نمونه‌ها

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

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

### 2-5- آزمون‌های مکانیکی

برای هر کدام از نمونه‌های جوشکاری شده یک پروفیل سختی در مقیاس ویکرز و با بار 500 گرم توسط دستگاه بوهرلر تهیه شد. به این منظور، سختی در طول یک خط از فلز پایه به سمت منطقه متأثر از حرارت، آستر و جوش روکشی اندازه‌گیری شده است. برای ریزسختی سنجی هم از نیروی 100 گرم استفاده شده است. آزمون خمش نیز به صورت عرضی مطابق با استاندارد ASTM E190 [15] برای بررسی میزان چقرمگی و نیز کیفیت اتصال آستر به فلز پایه و فلز جوش انجام شد.

حروف SL در ابتدای کدها مشخص‌کننده وجود آستر و حروف NSL مشخص‌کننده عدم استفاده از آستر است. در جوشکاری هر سه نمونه مجموعه‌ای از شرایط به صورت یکسان اعمال شد. همه نمونه‌ها در کوره با دمای 350 درجه سانتی‌گراد حدود 50 دقیقه پیش‌گرم و در کوره با دمای 650 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت پس‌گرم شدند. دمای بین پاسی در تمام مراحل جوشکاری در حدود 350 درجه سانتی‌گراد رعایت شد. نشان دادن آستر چقرمه با جریان 145 آمپر و جوشکاری پاس‌های روکش با جریان 160 آمپر انجام شد. لازم به ذکر است که تمامی الکترودها در کوره با دمای 350 درجه به مدت تقریبی 40 دقیقه خشک شدند. برای نمونه‌های دارای آستر، ابتدا یک پاس جوشکاری با الکتروود E309L انجام شد و با کنترل دمای بین پاسی، پاس‌های بعدی با الکترودهای روکشی انجام شد.

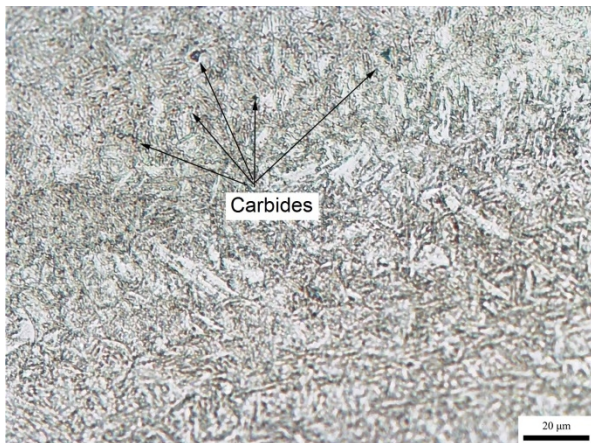
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی ریزساختاری

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

### 2-4- متالوگرافی

برای بررسی ریزساختاری نمونه‌ها، از هر قطعه یک نمونه متالوگرافی به صورتی که شامل فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت، آستر و جوش روکشی باشد، تهیه شد. قطعات به روش مانت گرم آماده شده و سپس سنباده‌زنی و پولیش شدند. برای حکاکی کردن آستر از جنس فولاد زنگ نزن، نمونه به مدت 70 ثانیه در محلول ویلا 2% (شامل 1 گرم اسید پیکریک، 5 میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک، 100 میلی‌لیتر اتانول) نگه‌داشته شد. همچنین برای اطمینان از صحت شناسایی فازها و نتایج متالوگرافی از محلول‌های اسید اگزالیک (حاوی 10 میلی‌لیتر اسید اگزالیک و 100 میلی‌لیتر آب) و نیتال 2% (شامل 2 میلی‌لیتر اسید نیتریک و 98 میلی‌لیتر الکل) نیز کمک گرفته شد.



شکل 2- ریزساختار فلز پایه.

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

تیره‌تر، مارتنزیت‌ها درشت‌تر بوده و از حالت تیغه‌ای به حالت بشقابی تغییر فرم داده‌اند. درصد کربن می‌تواند در تغییر موفولوژی مارتنزیت تأثیر گذار باشد. با افزایش درصد کربن، مارتنزیت به صورت بشقابی در ساختار ظاهر می‌شود. در این شرایط گزارش شده است که بسته‌های مارتنزیت دارای ساختار دوقلویی شدیدی می‌باشند [17]. اگرچه نوع الکتروود در این نمونه تغییر نکرده اما ساختار فلزجوش در پاس میانی به علت حرارت ناشی از پاس‌های روکش حاوی مقادیر زیادی مارتنزیت تمپر شده است (شکل 3-د). همچنین به دلیل عملیات تنش‌زدایی نیز مقداری بازپخت 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 تشکیل مارتنزیت بالاتر بوده و لذا مارتنزیتی شدن ساختار بر اثر نرخ سرمایش بالا ناشی از فروکشی حرارت توسط فلزپایه رخ داده است. ریزساختار پاس نهایی جوشکاری نیز مارتنزیتی است (شکل 3-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 می‌شود که ساختار از نوع آستنیتی به همراه لایه‌های 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 می‌شود [18].

این تبدیل فاز به‌طور کامل انجام نمی‌شود و مقادیری فریت در بین دندریت‌های آستنیت باقی می‌ماند. مورفولوژی 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 می‌کند. فلزجوش دارای زمینه مارتنزیتی است. در شکل (4-ب) این زمینه مارتنزیتی که به‌رنگ روشن بوده و درصد بیشتری از تصویر را تشکیل داده به‌خوبی قابل مشاهده است.

(دو ساعت) این فرصت برای بازپخت تیغه‌های مارتنزیت و نرم‌شدن آن‌ها وجود داشته است. وجود آستنیت باقیمانده احتمالی در ساختار را می‌توان به نرخ سرمایش پایین‌تر روغن نسبت به آب و عدم توان کافی محیط روغن برای تبدیل تمام ریزساختار به مارتنزیت مرتبط دانست. به‌علاوه مقدار کربن فولاد نیز زیاد است که باعث پایین آمدن دمای پایان تشکیل مارتنزیت ( $M_f$ ) می‌شود. از آنجا که فولاد H13 دارای مقادیر فراوانی عناصر آلیاژی نظیر کربن، سیلیسیم و کروم است، تشکیل کاربید حین بازپخت دور از انتظار نیست. عملیات بازپخت باعث تشکیل کاربیدهای ریز می‌شود و با بالا رفتن دما و زمان بازپخت، این ذرات درشت‌تر نیز می‌شوند. نینگ و همکارانش [16] نیز تشکیل کاربیدهای  $MC$ ،  $M_6C$ ،  $M_{23}C_6$  را حین بازپخت فولاد H13 گزارش کرده‌اند.

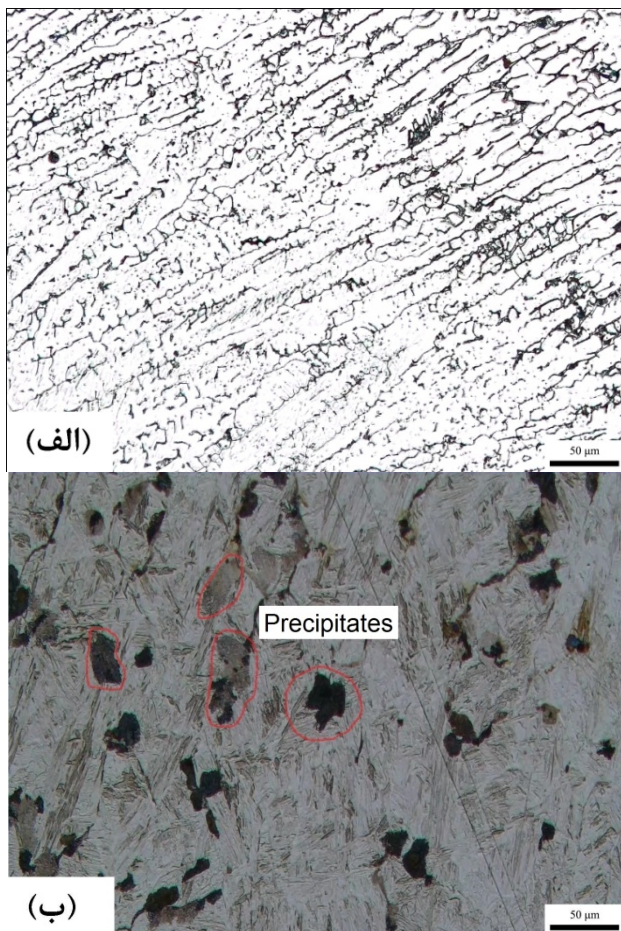
نمونه NSL22 فاقد آستر بوده و فلزجوش آن از جنس الکتروود 1622 است (شکل 3). به‌طور کلی جوش‌ها از نظر ریزساختاری دارای سه بخش مجزا شامل فلزپایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلزجوش هستند. درباره فلزپایه و علل مارتنزیتی بودن آن پیش‌تر توضیح داده شد و تمرکز در این بخش معطوف به منطقه متأثر از حرارت (HAZ) و فلزجوش است.

درباره ریزساختار مربوط به منطقه HAZ (شکل 3-الف و 3-ب)، نکته قابل‌بحث بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها با نزدیک شدن به فلزجوش است. علت درشت‌تر 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 می‌شود و در نتیجه پس از سرد شدن ساختار مارتنزیتی خشنی حاصل می‌شود. مقادیر اندازه دانه در فلزپایه در محدوده  $4-7 \mu m$  و در ناحیه HAZ نزدیک فلزپایه  $11-14 \mu m$  بود، در حالی‌که در منطقه HAZ نزدیک فلزجوش دانه‌های در حدود  $58 \mu m$  نیز مشاهده شد.

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

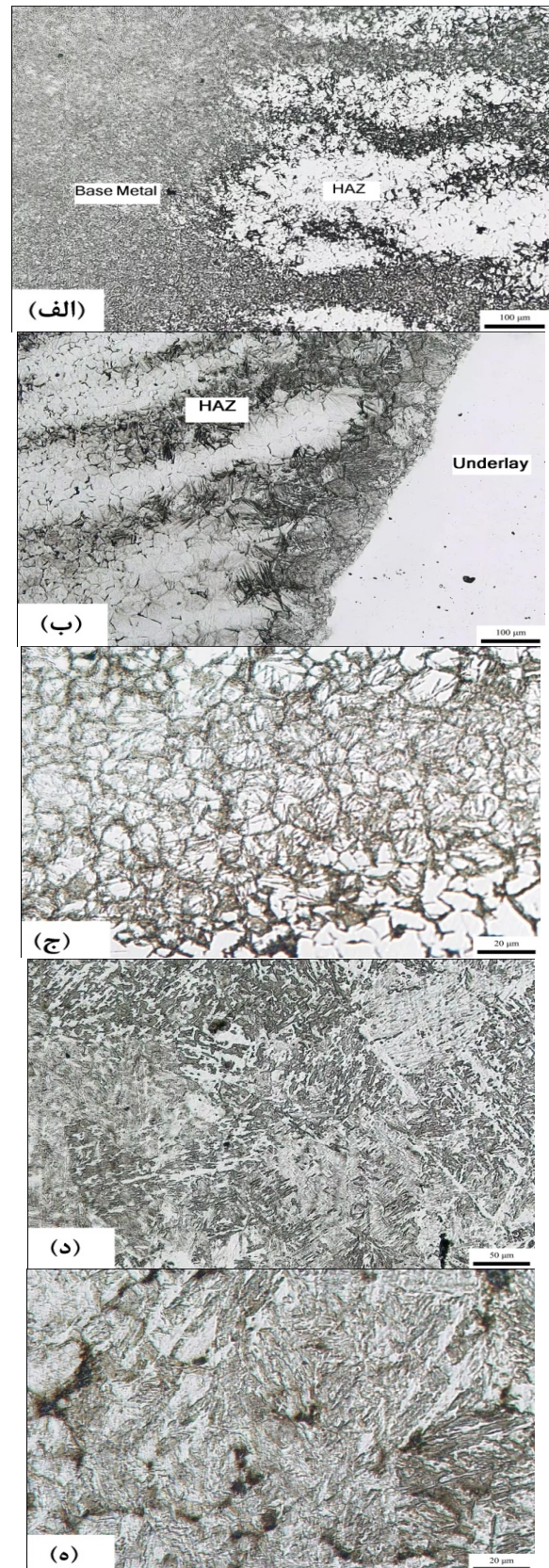


در ساختار فلزجوش یک فاز رسوبی به صورت پراکنده وجود دارد. این فازها در شکل (4-ب) با علامت قرمز مشخص شده است. این فازها دارای سختی حدود 420 ویکرز هستند. با توجه به درصد نسبتاً بالای کروم در ترکیب شیمیایی فلزپایه و الکتروود و نیز سختی آنها، به نظر می‌آید این فازها کاربید کروم هستند که به علت دمای نسبتاً بالا و زمان طولانی پس‌گرم شدن (دو ساعت در دمای 650 درجه سانتی‌گراد) رشد کرده‌اند. 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 مانند مشخص شده‌اند.

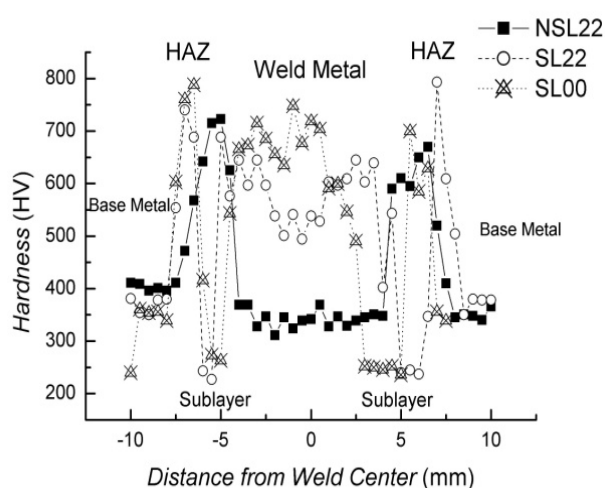
علت تفاوت این ساختار با نمونه NSL22، ذوب جزئی آستر و مخلوط شدن عناصر آن با مذاب فلزجوش است. با توجه به اینکه آستر دارای عناصر آلیاژی زیادی است ساختار فلزجوش به‌طور کامل تغییر کرده است. در بعضی از قسمت‌ها به صورت



شکل 3- ریزساختار: الف- مرز بین فلزپایه و منطقه متأثر 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.



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



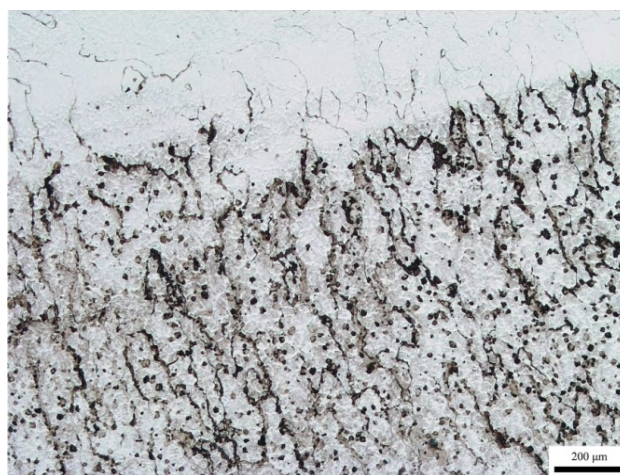
شکل 6- پروفیل سختی نمونه‌ها.

مطابق نتایج سختی سنجی نمونه فاقد آستر (NSL22) دو نکته حائز اهمیت وجود دارد. اول اینکه، سختی میانگین فلز پایه 388 ویکرز و سختی میانگین فلز جوش 340 ویکرز است؛ و این یعنی فلز جوش نتوانسته سختی برابر با فلز پایه را ایجاد کند. پایین بودن سختی فلز جوش به‌طور مستقیم با ترکیب شیمیایی الکتروود مرتبط است؛ چراکه کربن، سیلیسیم و کروم موجود در الکتروود به‌صورت قابل توجهی نسبت به مقادیر همین عناصر در فلز پایه کمتر هستند و طبیعتاً فلز جوش 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 فلز پایه و فلز جوش 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 به‌طور همزمان نسبت داد. وجود حدود 0/35% کربن در ساختار فلز پایه و سختی‌پذیری بالای آن، درجه حرارت بالا و مناسب برای آستینیت شدن و نیز نرخ سرمایش کافی برای تشکیل مارتنزیت، باعث ایجاد ساختار مارتنزیتی و سختی بالا در منطقه HAZ شده است. علت بالاتر بودن سختی نسبت به فلز پایه، اندازه

موضعی مارتنزیت تشکیل شده است که می‌تواند ناشی از تفاوت سرعت سرمایش به‌صورت موضعی باشد. دلیل دیگری که می‌تواند باعث تشکیل مارتنزیت شود سرعت بالای انجماد و عدم وجود زمان کافی برای مخلوط شدن کامل در همه قسمت‌ها و در نتیجه 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 فلز جوش نیز همانند نمونه قبلی مارتنزیت همراه با کاربیدهای کروم است. همان‌طور که در شکل (5) دیده می‌شود کاربید کروم بر اثر حضور کروم در لایه آستر فولاد SS309L (حاوی حدود 24% کروم) و نیز وجود 0/5% کربن و 7% کروم در ترکیب الکتروود 1600 V روکش در خط ذوب بین دو پاس آستر و روکش به صورت لایه‌های سیاه رنگی دیده می‌شود. حرارت ثانویه ناشی از اعمال پاس روکش هم در تشکیل این فاز کاربیدی نقش مؤثری دارد.



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

### 2-3- نتایج سختی سنجی

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



در نتیجه این مارتنزیت کاملاً متفاوت (از لحاظ ترکیب آلیاژی و مورفولوژی) دارای سختی بسیار بالاتری است. نمونه SL00 دارای آستر از جنس E309L و روکش از جنس الکتروود 1600 V بود. الکتروود روکشی مورد استفاده در این نمونه دارای عناصر آلیاژی بیشتری نسبت به الکتروود 1622 V و حتی نسبت به فلز پایه است؛ و با توجه به این موضوع می توان سختی بالاتری را انتظار داشت. میانگین سختی حاصل از فلز جوش در این نمونه حدود 663 ویکرز بود. نواحی فلز پایه، HAZ و آستر دارای محدوده سختی تقریباً مشابهی با نمونه قبلی هستند. تمرکز در این بخش بر توجیه علت سختی بالاتر فلز جوش نسبت به نمونه های قبلی معطوف است. در ترکیب شیمیایی این الکتروود حدود 0/5% کربن و حدود 7% کروم دیده می شود. وجود این عناصر باعث ایجاد ساختار مارتنزیتی و نیز مقادیر متناهی کاربرد می شود. این دو عامل به طور همزمان باعث بالا رفتن سختی فلز جوش شده بود.

### 3-3- نتایج آزمون خمش سه نقطه ای

این آزمون به منظور بررسی میزان چقرمگی آستر و فلز جوش و نیز کیفیت اتصال آستر به فلز پایه و فلز جوش انجام شد. نکته قابل توجه درباره هر سه نمونه، ایجاد ترک از ریشه جوش و رشد آن درون فلز جوش بود. به طور کلی رفتار خمشی نمونه ها از دو مکانیزم کلی تبعیت می کردند. مکانیزم نخست مطابق شکل (۷-الف) مربوط به قطعه فاقد آستر بود که ترک ایجاد شده در فلز جوش گسترش یافته و باعث شکست نمونه شد. مکانیزم دوم در نمونه های 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 موم سان لایه با چقرمگی زیاد قابل مشاهده بود. همان طور که در شکل (7-ب) دیده می شود، برای این نمونه ها ترک اول از فلز پایه شروع شده و ادامه می یابد، ولی با رسیدن به فلز جوش حاصل از آستر چقرمه متوقف می گردد. در ادامه، اعمال نیرو باعث تغییر شکل موم سان آستر چقرمه شده و با اعمال نیروی بیشتر، ترک دوم از فلز جوش میانی شروع می شود و ضمن گسترش در آن باعث

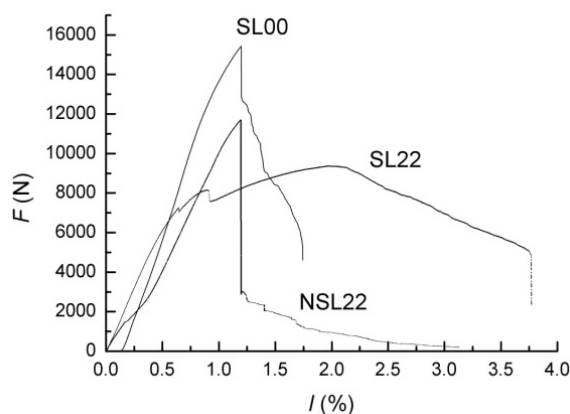
بزرگ تر دانه های آستنیت اولیه و در نتیجه درشت شدن مارتنزیت های تشکیل شده جدید است. از طرفی شرایط عملیات حرارتی فلز پایه به صورتی بوده که دو مرحله تمپر دمای بالا را تجربه کرده که باعث کاهش سختی شده است؛ اما در HAZ آستنیت اولیه دوباره به وجود آمده و بدیهی است که مارتنزیت جدید تشکیل شده این مراحل تمپر را تجربه نکرده و از این جهت دارای سختی بسیار بالایی است.

نمونه SL22 دارای آستر چقرمه است که با استفاده از الکتروود E309L نشانده شده است. در نمودار این نمونه 4 ناحیه کلی وجود دارد. فلز پایه دارای سختی میانگین حدود 370 ویکرز است. در این نمونه، مشابه نمونه قبلی سختی منطقه HAZ بسیار بالاست و به طور میانگین دارای سختی 660 در مقیاس ویکرز است. به نظر می رسد 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 همان طور که در نمودار مربوطه دیده می شود آستر که از جنس فولاد زنگ نزن 309L است، دارای سختی به مراتب پایین تری از فلز پایه، HAZ و فلز جوش است؛ به طوری که سختی میانگین این لایه حدود 235 ویکرز است. این مقدار سختی، با توجه به ترکیب شیمیایی و ریزساختار فاز حاصل کاملاً قابل پیش بینی است؛ چراکه این الکتروود دارای مقدار بسیار کمی کربن (0/03%) بوده و عملاً قابلیت سختی پذیری و ایجاد کاربرد ندارد. از طرف دیگر این الکتروود دارای مقدار نسبتاً بالایی نیکل (13/5%) است که یک عنصر پایدار کننده آستنیت می باشد و باعث تشکیل زمینه آستنیتی در ساختار شده است.

نکته قابل توجه در مورد این نمونه، سختی نسبتاً بالای فلز جوش است. همان طور که از نمودار برمی آید، سختی متوسط فلز جوش حدود 588 ویکرز بود، این در حالی است که سختی فلز جوش در نمونه NSL22 که تنها در داشتن آستر با این نمونه تفاوت داشت، حدود 340 ویکرز می باشد. همان طور که در تصاویر متالوگرافی مشاهده شد، با توجه به ذوب موضعی آستر و تشکیل مذاب با ترکیب جدید، ساختار فلز جوش شامل مارتنزیت با عناصر آلیاژی بالا و مقادیر کمی کاربرد کروم بود؛

شکست فلزجوش شد.

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 آنجا که 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 فلزجوش، نمونه نیروی کمتری را نسبت به نمونه قبلی تحمل کرده است.



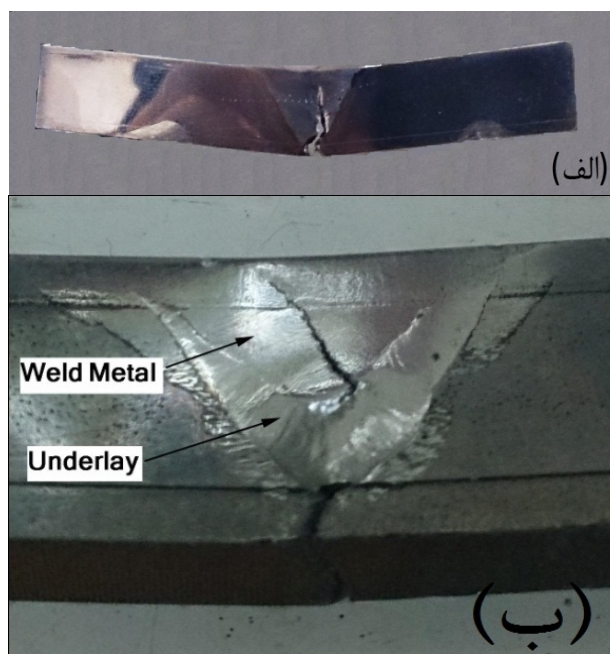
شکل 8- نمودار آزمون خمش نمونه‌های مختلف.

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

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پروژه تلاش شد تا اثر آستر و لایه نهایی روکش بر ریزساختار و سختی جوش تعمیری فولاد HI3 بررسی شود. نتایجی که از این بررسی به دست آمد به شرح زیر است:

- ریزساختار فلز پایه مارتنزیت تمپر شده بود که دارای مقداری آستنیت باقیمانده و ذرات کاربید می‌باشد. ناحیه متأثر از حرارت در تمام نمونه‌ها ساختار مارتنزیتی دارد. آستر چقرمه استفاده شده دارای ساختار آستنیتی به همراه لایه‌های فریت با مورفولوژی اسکلتی است. در هر سه نمونه ریزساختار



شکل 7- تصویر نحوه رشد ترک حین آزمون خمش:

الف - مکانیزم 1- اشاعه مستقیم داخل فلزجوش، ب - مکانیزم 2- اشاعه دومرحله ای در نمونه‌های آستر دار.

نمودار جذب نیروی نمونه‌ها حین آزمون خمش در شکل (8) دیده می‌شود. نمودار مربوط به نمونه NSL22 (بدون آستر) نشان‌دهنده تحمل نیروی نسبتاً بالا در عین تغییر شکل کمتر و شکست ناگهانی است که می‌تواند نشانه‌ای از شکست ترد باشد. علت این اتفاق، پایین بودن چقرمگی فلزجوش و نبود آستر چقرمه و در نتیجه کرنش کمتر نمونه تحت آزمون است. ضمن اینکه استحکام فلزجوش نسبت به نمونه‌های دارای آستر چقرمه قابل توجه است و اگرچه تغییر شکل زیادی نمی‌دهد اما نیروی زیادی را تا شروع ترک و شکست تحمل می‌کند.

در نمونه‌های دارای آستر، برای نمودار مربوط به نمونه SL00 می‌توان دریافت که بیشترین تنش قابل تحمل در لایه با چقرمگی بالا و روکش الکتروود V ۱۶۰۰ اتفاق افتاده و با ایجاد ترک در فلزجوش، نیروی مؤثر کاهش یافته و قطعه به شکست نزدیک‌تر شده است.

آستر استفاده شده در نمونه SL22 هم تأثیری مشابه نمونه قبلی داشته و باعث جذب انرژی بیشتر و به تأخیر انداختن رشد

6-Vigraam, 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., Balasubramanian, 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- Andr n, H.O., Karag z, 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 به صورت مارتنزیتی است که فاز رسوبی کاربید کروم در ساختار پراکنده شده است.

- از مقایسه سختی دو نمونه‌ای که نوع الکتروود 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 می‌تواند 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 به صورت نرم و همراه با تغییر شکل موم‌سان بیشتری نسبت به نمونه فاقد آستر شکستند.

- سختی ناحیه متأثر از حرارت در تمام نمونه‌ها حدود 270-280 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 clad 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., G mez 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.