مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1397، دوره 18، شماره 01، ص ص 397-405

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت پودر جوش آلیاژی به روش چسباندن و بررسی خواص فلز جوش آن

مهدی محمدمیرزایی[1] و امیرحسین کوکبی[2*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- استاد، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی 11365-9466، kokabi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 آبان 1396
پذیرش: 10 دی 1396
ارائه در سایت: 29 دی 1396

کلید واژگان:
جوش‌کاری زیرپودری
چسباندن پودر جوش
فریت سوزنی
عناصر آلیاژی
آخال

چکیده

در جوش‌کاری زیرپودری، برای افزودن عناصر آلیاژی، پودر جوش باید به روش چسباندن تهیه شود. در این روش ترکیبات معدنی و عناصر آلیاژی آسیاب شده و با نسبت‌های معین با چسب مخلوط می‌شود. پس از خشک شدن در هوا به‌صورت کلوخه‌ای، در دمای حدود 350 درجه‌ی سانتی‌گراد پخت صورت می‌گیرد و با استفاده از سرند به دانه‌بندی 0.3 تا 1 میلی‌متر می‌رسد. مقادیر مختلف کروم، مولیبدن و کروم-مولیبدن به پودر جوش اضافه شد. در این حالت عناصر آلیاژی از طریق واکنش‌های بین فلز جوش-سرباره وارد فلز جوش شد. برای بررسی خواص مکانیکی آزمون‌های کشش طولی، سختی سنجی و انرژی ضربه شارپی از فلز جوش گرفته شد. ریزساختار به کمک میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بررسی شد. افزودن 0.4 درصد وزنی مولیبدن به فلز جوش باعث افزایش فریت سوزنی تا 87 درصد شد. استحکام 20 درصد افزایش و انرژی ضربه 25 درصد کاهش یافت. تاثیر کروم بر افزایش فریت سوزنی در فلز جوش کمتر از مولیبدن بود. با افزودن 0.4 درصد وزنی کروم به فلز جوش 57 درصد فریت سوزنی تشکیل شد، استحکام تقریبا ثابت ماند ولی انرژی ضربه 35 درصد کاهش یافت. در ادامه با افزایش بیشتر کروم به‌دلیل افزایش فریت با فاز ثانویه انرژی ضربه به شدت (60 درصد) کاهش یافت. بیش‌ترین مقدار فریت سوزنی (95 درصد) با افزودن 0.28 درصد وزنی کروم و 0.35 درصد وزنی مولیبدن به فلز جوش به‌دست آمد. در این حالت استحکام فلز جوش 20 درصد (100 مگاپاسکال) افزایش و انرژی ضربه 15 درصد (20 ژول) کاهش یافت.

Production of alloying Bonded Flux and study of Weld Metal properties

Mahdi Mohammadmirzaei, Amirhossein Kokabi*

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 9466-11365, Tehran, Iran, kokabi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 30 October 2017
Accepted 31 December 2017
Available Online 19 January 2018

Keywords:
Submerged Arc Welding
Bonded Flux
Acicular Ferrite
Alloying elements
Inclusion

ABSTRACT

In submerged-arc welding, flux is produced through bonding so that alloying element can be added to Weld Metal. In this method, mineral ingredients and alloying elements are milled and mixed with glue in appropriate proportions. Once the drying of the pellets is complete in air, they are baked at 350 degree centigrade and broken up by using a sieve to attain the desired particle size (0.3-1 mm). The various content of Cr, Mo and Cr-Mo was added to bonded flux. Addition of alloying elements was done through flux and slag-weld metal reactions. Mechanical properties were studied by means of Longitudinal Tensile, Hardness and Charpy V-notch tests. Microstructure was studied by means of Optical and Scanning Electron Microscope. The addition of 0.4 wt. % Mo increased the volume fraction of Acicular Ferrite (AF) to 87%. The Ultimate Tensile Strength (UTS) increased by 20% and Impact Toughness (IT) decreased by 25%. Cr affected AF content less than Mo. The addition of 0.4 wt. % Cr increased the volume fraction of AF to 57%. The UTS almost did not change and IT decreased by 35%. Further increase in Cr content led to increase of Ferrite with Second Alloyed phase that strongly impaired IT (60%). The highest proportion of AF (95%) obtained in 0.28 wt. %Cr and 0.35 wt. % Mo. In this specimen UTS increased by 20% (100 Mpa) and Impact Toughness was decreased by 15% (20 J).

1- مقدمه

فرآیند جوش‌کاری زیرپودری به‌دلیل خواص ذاتی مثل نرخ اتصال و نفوذ بالا، سطح جوش باکیفیت، قابلیت جوش‌کاری مقاطع ضخیم و جلوگیری از آلودگی جوی از فرآیندهای اصلی جوش‌کاری به‌شمار می‌آید. این فرآیند بیشتر در صنایع سنگین مثل کشتی‌سازی، تولید لوله‌ها، سازه‌های عظیم، دستگاه‌های نیرو، صنایع شیمیایی، هسته‌ای و ... کاربرد دارد [2,1].

در این فرآیند پودر جوش از حوضچه‌ی جوش محافظت می‌کند. ترکیبات پودر جوش عمدتاً مواد معدنی مثل SiO_2 ، TiO_2، Al_2O_3 و ... به‌صورت معدنی یا در ترکیب باهم است. پودر جوش تأثیر مهمی در کیفیت جوش دارد. با تغییر در ترکیب شیمیایی فلز جوش از طریق افزودن عناصری نظیر مولیبدن و کروم، ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش قابل کنترل است. برای افزودن عناصر آلیاژی به پودر جوش، پودر باید به روش چسباندن[1] تهیه شود. در این روش برای تولید پودر جوش مواد معدنی، ترکیبات

[1] Bonded flux

Please cite this article using:
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
M. Mohammadmirzaei, A. Kokabi, Production of alloying Bonded Flux and study of Weld Metal properties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 397-405, 2018 (in Persian)

اکسیدی، نمک‌ها و ترکیبات دیگر به‌خوبی آسیاب شده و با نسبت‌های معین ترکیب می‌شود. در حین مخلوط کردن چسب به آن پاشیده می‌شود. معمولاً از چسب‌های سیلیکات سدیم و سیلیکات پتاسیم استفاده می‌شود. بعد از مخلوط کردن مواد با چسب به مقدار کافی، مخلوط حاصل‌شده در هوا خشک می‌شود. چسب باید استحکام کافی به پودر جوش بدهد تا به‌راحتی پودر نشود. مقدار چسب بعد از خشک شدن باید حدود 1 تا 10 درصد وزنی پودر جوش باشد. در این مرحله مواد به‌صورت کلوخه‌ای شکل درمی‌آید. بعد از خشک شدن، باید عملیات پخت در دمای حدود 350 درجه‌ی سانتی‌گراد روی آن انجام گیرد. درنهایت کلوخه‌ها خرد شده و با توجه به دانه‌بندی موردنظر الک می‌شود [4,3].

1-1- تغییرات فازی حین انجماد فلز جوش

برای بررسی نحوه‌ی تشکیل فریت سوزنی، تغییرات فازی با تغییرات دما حین انجماد فلز جوش فولاد در ادامه همراه "شکل 1" آمده است. ریزساختار فلز جوش تحت تأثیر ذوب شدن، انحلال گاز، انجماد و تحولات حالت جامد است. حوضچه‌ی مذاب تا دمایی حدود 2200 درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود، در این حالت در مذاب فولاد با توجه به خواص ترمودینامیکی مذاب، گاز و نوع سرباره اکسیژن حل می‌شود. با کاهش دمای مذاب تا 1700–2000 درجه‌ی سانتی‌گراد، اکسیژن حل‌شده در با عناصر موجود مذاب واکنش داده و آخال‌های اکسیدی تکی یا پیچیده[1] با اندازه حدود 0.1–1 میکرومتر تشکیل می‌دهد (شکل 1-a). در ادامه در دمای 1600–1700 درجه‌ی سانتی‌گراد فریت دلتا تشکیل می‌شود و آخال‌ها اکسیدی را می‌پوشاند (شکل 1-b). در دمای 800–1600 درجه‌ی سانتی‌گراد آستنیت تشکیل می‌شود و رشد می‌کند (شکل 1-c). در دمای 300–800 درجه‌ی سانتی‌گراد آستنیت به دگرشکلی‌های مختلف فریت تجزیه می‌شود. تجزیه‌ی آستنیت به فریت با تشکیل فریت آلوتریمورفیک[2] (α) از مرزدانه‌های آستنیت-آستنیت قبلی شروع می‌شود و درنهایت این مرز دانه‌ها را در برمی‌گیرد (شکل 1-d و e). با ادامه‌ی سرمایش، فریت ویدمنشتاتن[3] (α_w) در مرز فریت آلوتریوموفیک-آستنیت جوانه می‌زند و به داخل دانه‌های تغییرنیافته‌ی آستنیت گسترش می‌یابد (شکل 1-f). با ادامه‌ی سرمایش، فریت سوزنی می‌تواند بر روی آخال‌ها جوانه‌زنی کند (شکل 1-g). اگر پتانسیل آخال وجود نداشته باشد، فریت بینایتی[4] (α_b) ممکن است به‌جای فریت سوزنی تشکیل شود. در ادامه‌ی سرمایش تا دمای اتاق، آستنیت باقیمانده می‌تواند به‌صورت کامل یا جزئی به مارتنزیت تبدیل شود که به آن مارتنزیت-آستنیت اطلاق می‌شود. این توالی در تبدیل فازی فولاد در بررسی تشکیل فریت سوزنی مهم است زیرا تمام واکنش‌های گفته شده در جوانه‌زنی و رشد فریت سوزنی مؤثر است [5].

2-1- تأثیر آخال بر روی ریزساختار

فریت سوزنی با ریزساختاری که باعث قفل‌های ریز مکانیکی می‌شود، از تشکیل و رشد ترک‌ها به‌طور قابل‌توجهی جلوگیری می‌کند. همچنین باعث کاهش تشکیل فریت ویدمن اشتاتن و ترکیبات مارتنزیتی-آستنیتی می‌شود. بهترین انرژی ضربه در فولادها در وجود فریت سوزنی به‌دلیل ساختار ریز و زاویه‌ی دانه زیاد قابل‌دسترسی است [6]. تحقیقات نشان می‌دهد که فریت سوزنی اساساً روی آخال‌های جوش جوانه‌زنی می‌کنند [7]. بنابراین اگر ترکیب شیمیایی و حرارتی در جوش مناسب استحاله‌ی فریتی باشد، فریت سوزنی در آخال همراه با دیگر ریزساختارها جوانه‌زنی می‌کند [8]. مابوچی [9] نشان داد کاهش منگنز در فصل مشترک زمینه‌ی فریت-سولفید منگنز قابل ارتباط با تشکیل رسوبات منگنز روی آخال‌های اکسیدی حین سرد شدن است و این ویژگی را یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های تشکیل فریت سوزنی برشمرد. اندازه مناسب آخال‌های غیرفلزی برای شروع جوانه‌زنی فریت سوزنی در بررسی‌های دیگر حدود 0.2 تا 0.3 میکرومتر به‌دست آمد. همچنین حداقل اندازه آخال برای جوانه‌زنی 0.2 میکرومتر باید باشد. وقتی اندازه آخال کمتر از 2.0 میکرومتر باشد، کاهش سد انرژی برای جوانه‌زنی فریت و توسعه-ی ناحیه‌ی انحلال حفره اطراف آخال‌های غیرفلزی ناکافی است [6]. تاکی[5] [10] با بررسی جوش‌های فولاد کم‌کربن آخال‌ها را به دو دسته‌ی جوانه‌زا و غیرجوانه‌زا دسته‌بندی کرد. وی با بررسی اندازه آخال‌ها به این نتیجه رسید که آخال‌های جوانه‌زا به‌مراتب بزرگ‌تر از آخال‌های غیرجوانه‌زا هستند و با افزایش اندازه آخال (و با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی یکسان آخال)، احتمال جوانه‌زنی و رشد فریت سوزنی افزایش می‌یابد. با افزایش اندازه آخال، جوانه‌زنی ورق‌های فریتی[6] با جهت‌گیری بلوری مختلف بیشتر شده و مقدار فریت سوزنی بیشتری تشکیل می‌شود.

3-1- تأثیر عناصر آلیاژی روی فلز جوش

عناصر آلیاژی برای بهبود خواص مکانیکی یا فیزیکی حین فرآیندهای حرارتی (عملیات حرارتی یا فرآیندهای دیگر مثل جوش‌کاری) اضافه می‌شود. به‌طور خاص، هدف از افزودن عناصر آلیاژی معمولاً بهبود استحکام کششی بدون کاهش قابل‌توجه در انعطاف‌پذیری، بهبود چقرمگی شکست و افزایش سختی‌پذیری است. به‌طورکلی نظریه‌ای ثابت در مورد مقدار و نسبت مناسب عناصر آلیاژی در فلز جوش وجود ندارد. تأثیر یک عنصر آلیاژی در فولاد ممکن است تحت تأثیر حضور عناصر دیگر، نوع فرآیند یا عملیات حرارتی که روی آن انجام‌گرفته قرار بگیرد؛ مثل تأثیر متقابلی که برخی عناصر با یکدیگر

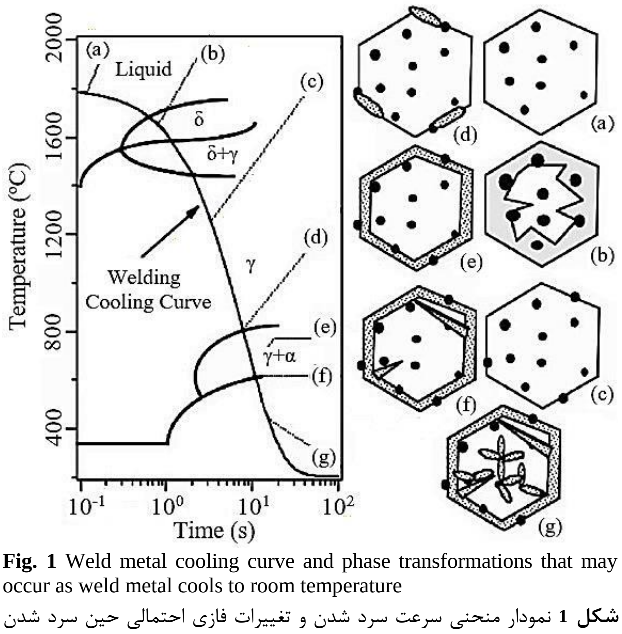

Fig. 1 Weld metal cooling curve and phase transformations that may occur as weld metal cools to room temperature

شکل 1 نمودار منحنی سرعت سرد شدن و تغییرات فازی احتمالی حین سرد شدن فلز جوش فولاد [8]

[1] complex
[2] Allotriomorphic ferrite
[3] Widmanstatten ferrite
[4] Bainitic ferrite
[5] Tae-Kyu
[6] Ferrite laths

دارند. به‌علاوه، تأثیر یک عنصر خاص ممکن است باعث بهبود یکی از خواص ذکر شده شود و برای جنبه‌ای دیگر مضر باشد [11].

مولیبدن باعث افزایش سختی‌پذیری فولاد می‌شود، همچنین باعث کاهش نفوذ شده و برای تمپر کردن نیاز به دمای بالاتری دارد. مولیبدن تبدیل آستنیت به پرلیت را بسیار بیشتر از تبدیل آستنیت به بینایت به تأخیر می‌اندازد؛ بنابراین، در فولادهای حاوی مولیبدن که به‌طور پیوسته سرد می‌شوند، می‌تواند بینایت تولید شود [11]. خزایی [12] با افزودن 0.25 درصد مولیبدن و 0.3 درصد نیکل به فلز جوش فولاد St37 از طریق جوش‌کاری قوسی توپودری مشاهده کرد مقدار فریت سوزنی فلز جوش افزایش‌یافته و در این حالت انرژی ضربه 10 ژول افزایش پیدا می‌کند. حولی[1] [13] با بررسی تأثیر افزایش نیکل و مولیبدن و نیکل-مولیبدن به فلز جوش فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، دریافت که با افزودن مولیبدن تا 1 درصد، میزان فریت سوزنی افزایش و در نتیجه استحکام و انرژی ضربه افزایش می‌یابد. بررسی‌های جونها[2] [14] روی تأثیر مولیبدن روی خواص مکانیکی و ریزساختاری فولاد استحکام بالای خط لوله، در مورد تغییرات انرژی ضربه مغایر نتایج حولی بود. آزمایش‌های جونها نشان داد که با افزایش مولیبدن استحکام و سختی افزایش و انرژی ضربه کاهش می‌یابد. افزایش مولیبدن تا 0.2 درصد باعث افزایش تشکیل فاز فریت سوزنی می‌شود، در این حالت انرژی ضربه برخلاف افزایش فاز فریت سوزنی کاهش یافت.

کروم معمولاً برای افزایش مقاومت به خوردگی و اکسید شدن، افزایش سختی‌پذیری، بهبود استحکام دمای بالا و مقاومت به سایش به فولاد اضافه می‌شود. کروم یک کاربید ساز قوی است، کاربیدهای کروم-آهن با سرعت کم در آستنیت حل می‌شوند، بنابراین برای عملیات حرارتی آن زمان کافی برای انحلال لازم است [11]. بررسی‌ها روی فولاد کربن-منگنزدار نشان می‌دهد که با افزایش کروم ابتدا فریت سوزنی افزایش می‌یابد، در ادامه با افزایش بیشتر کروم فریت با فاز ثانویه و مارتنزیت تشکیل می‌شود. با افزایش کروم به‌خصوص در مقادیر بالای 0.5 درصد وزنی، سختی و استحکام افزایش اما انرژی ضربه به‌شدت کاهش می‌یابد. این با توجه به افزایش فاز مارتنزیت-آستنیت با افزایش کروم قابل توجیه است که باعث کاهش انرژی ضربه می‌شود [15].

2- مواد و روش تحقیق

برای انجام این پژوهش از فولاد ساختمانی St37 به ابعاد 15×120×250، سیم جوش S_2 به قطر 4 میلی‌متر و پودر جوش آما اُپی 139[3] استفاده شد. ابتدا فولاد St37 با پودر جوش بدون عناصر آلیاژی اگلومره شده (AS) جوش داده شد. متغیرهای جوش‌کاری برای ایجاد یک جوش باکیفیت و یکسان در یک پاس روی پخ 9 میلی‌متری به روش جوش‌کاری زیرپودری مطابق شکل 2 برابر جریان 500 آمپر، ولتاژ 29 ولت، سرعت 4 میلی‌متر بر ثانیه و قطبیت الکترود مثبت جریان مستقیم در نظر گرفته شد. برای افزودن عناصر آلیاژی به فلز جوش، عناصر به پودر جوش اضافه شد. افزودن عناصر آلیاژی به پودر جوش فقط از طریق پودر جوش تولیدشده به روش چسباندن امکان‌پذیر است. برای تولید پودر جوش به روش چسباندن، ترکیبات اولیه آسیاب شد و پس از مخلوط کردن با چسب و خشک شدن در هوا به‌صورت کلوخه‌ای، در دمای حدود 350 درجه‌ی سانتی‌گراد پخت روی آن صورت گرفت. در مرحله‌ی آخر پودر جوش به دانه‌بندی یکنواخت 0.3 تا 1 میلی‌متر رسید. از

[1] Bhole
[2] Junhua
[3] AMA OP139

پودر فروکروم و فرومولیبدن برای افزودن عناصر آلیاژی به پودر جوش استفاده شد. برای مقایسه‌ی پودر جوش اگلومره شده با پودر جوش چسبانده شده، یک پاس جوش با پودر جوش بدون عنصر آلیاژی چسبانده شده (BS) داده شد. در ادامه 8 پاس جوش با پارامترهای یکسان گفته شده با اضافه کردن مقادیر مختلف مولیبدن، کروم و کروم-مولیبدن به پودر جوش به روش چسباندن روی فولاد ساختمانی St37 داده شد. روند تغییرات ریزساختار و خواص مکانیکی در جوش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

2-1- ترکیب شیمیایی نمونه‌ها

برای تعیین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از دو روش کوانتومتری و طیف‌سنجی جذب اتمی[4] استفاده شد. نتایج ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم جوش در جدول 1 آمده است. ترکیب پودر جوش و عناصر آلیاژی مورداستفاده به ترتیب در جدول 2 و 3 آمده است. ترکیب شیمیایی جوش‌ها در جدول 4 آمده است.

2-2- ریزساختار

برای بررسی ریزساختار و فازهای موجود در نمونه‌های جوش‌کاری شده با مقادیر مختلف کروم، مولیبدن و کروم-مولیبدن، مقاطع جوش و منطقه‌ی تحت تأثیر از حرارت و فلز پایه از میکروسکوپ نوری[5] استفاده شد. برای تعیین درصد فازها از نرم‌افزار ایمیج جی استفاده شد. برای یکسان بودن شرایط، در بزرگنمایی 200 و برای هر نمونه 5 عکس گرفته شد و درصد

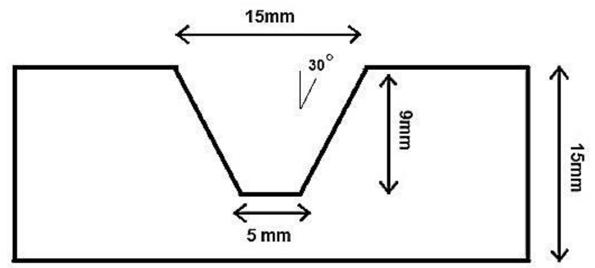

Fig. 2 Join geometry for the weld

شکل 2 طرح جوش‌کاری روی فلز پایه

جدول 1 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه و سیم جوش

Table 1 Chemical composition (wt. %) of the base metal and filler metal

C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe	نوع فولاد
0.23	0.5	0.9	0.2	-	باقی‌مانده	St37
0.1	0.1	1	-	-	باقی‌مانده	S_2

جدول 2 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) پودر جوش (AMA OP139)

Table 2 Chemical composition (wt. %) of flux (AMA OP139)

$SiO_2 + TiO_2$	$CaO + MgO$	$Al_2O_3 + MnO$	CaF_2	ترکیب
20	25	35	15	درصد وزنی

جدول 3 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) پودر عناصر آلیاژی

Table 3 Chemical composition (wt. %) of alloying element powders

C	Mo	Cr	پودر
0.29	-	75	فروکروم
0.1	45	-	فرومولیبدن

[4] Atomic Adsorption Spectroscopy
[5] Optical microscope (Olympus BX51M)

جدول 4 ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز جوش‌های مختلف

Table 4 Chemical composition (wt. %) of weld metals

اسم جوش	Fe	Mo	Cr	Mn	Si	C
AS	باقی‌مانده	-	0.05	1.15	0.26	0.09
BS	باقی‌مانده	-	0.05	1.1	0.26	0.09
BS4Mo	باقی‌مانده	0.4	-	1.13	0.26	0.09
BS7Mo	باقی‌مانده	0.7	-	1.05	0.25	0.09
BS4Cr	باقی‌مانده	-	0.4	1.1	0.24	0.09
BS15Cr	باقی‌مانده	-	1.5	1.08	0.23	0.09
BS22	باقی‌مانده	0.2	0.2	1.05	0.25	0.09
BS33	باقی‌مانده	0.35	0.28	1.07	0.24	0.09
BS46	باقی‌مانده	0.61	0.45	1.06	0.24	0.09

تقریبی میانگین هر فاز به‌دست آمد. همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] برای شناسایی نوع و درصد عناصر موجود در آخال استفاده شد.

2-3- سختی و استحکام

برای سختی‌سنجی از روش ویکرز استفاده شد. بعد از جوش‌کاری روی شیار فلز پایه، قسمت طولی فلز جوش توسط اره‌لنگ با دقت برش داده شد. در مرحله‌ی بعد اضافات فلز پایه کف تراشی شد. سپس نمونه‌های آزمون کشش با اندازه کوچک مطابق استاندارد "شکل 3" به‌دست آمد. سرعت کشش 2 میلی‌متر بر دقیقه و از هر جوش 2 نمونه کشش تهیه شد.

2-4- انرژی ضربه

برای تعیین انرژی ضربه از هر جوش سه نمونه برای آزمون ضربه شارپی نمونه کوچک[2] مطابق استاندارد "شکل 4" به ابعاد 55×10×8 میلی‌متر تهیه شد. سپس توسط فرز مجهز به تیغه 45 درجه شیار 2 میلی‌متر روی نمونه عمود بر جهت جوش‌کاری صورت گرفت. اعداد به‌دست آمده از آزمون ضربه به دلیل نمونه کوچک بودن بر 0.8 تقسیم شد. اعداد گزارش شده از میانگین نتایج سه نمونه حاصل‌شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی ریزساختار

"شکل 5" ریزساختار فلز پایه ST37، ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده (AS) و چسبانده شده (BS) را نشان می‌دهد. ریزساختار فلز پایه St37 شامل فریت و پرلیت است. ناحیه‌ی متأثر از حرارت ترکیبی از فازهای فریت مرزدانه‌ای[3]، فریت چندوجهی[4]، فریت ویدمن اشتاتن[5] و فریت سوزنی[6] است. ریزساختار فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده و چسبانده شده مشابه هم و شامل فریت سوزنی، فریت مرزدانه‌ای و فریت چندوجهی است. مقدار و نوع فازها در دوحالت تقریباً برابر به‌دست آمده است، یعنی تغییر در روش ساخت پودر جوش تأثیری روی ریزساختار نگذاشته است.

"شکل 6" ریزساختار فلز جوش با افزایش درصدهای مختلف کروم و مولیبدن را نشان می‌دهد. افزایش مولیبدن ابتدا باعث افزایش تشکیل فریت سوزنی و کاهش فریت مرزدانه‌ای و سپس باعث تشکیل فازهای بینایت و

[1] Scanning Electronic microscope (TESCAN MIRA 3)
[2] Sub size
[3] Grain boundary ferrite (GBF)
[4] Polygonal ferrite (PF)
[5] Widmanestatten ferrite (FS)
[6] Acicular ferrite (AF)

فریت با فاز ثانویه[7] می‌شود [14]. افزودن 0.4 درصد مولیبدن به فلز جوش (BS4Mo) باعث کاهش فریت سوزنی و مرزدانه‌ای شده و بیشتر ساختار را فریت سوزنی تشکیل داده است. با افزایش بیشتر مولیبدن تا 0.7 درصد وزنی (BS7Mo) فریت با فاز ثانویه در فلز جوش شکل گرفت و از میزان فریت سوزنی کاسته شد. افزایش کروم باعث افزایش فریت سوزنی در فلز جوش و شروع تشکیل فازهای سخت بینایت و فریت با فاز ثانویه می‌شود [16]. افزایش کروم تا 0.4 درصد (BS4Cr) باعث افزایش جزئی فریت سوزنی در فلز جوش شده است. با افزایش بیشتر کروم تا 1.5 درصد (BS15Cr)، مقدار قابل‌توجهی فریت با فاز ثانویه در فلز جوش تشکیل می‌شود و درصد فریت سوزنی کاهش می‌یابد.

"شکل 7" ریزساختار فلز جوش با افزودن هم‌زمان مقادیر مختلف کروم و مولیبدن به پودر جوش چسبانده شده را نشان می‌دهد. حضور مولیبدن و کروم باعث افزایش سختی‌پذیری فلز جوش می‌شود. با افزایش کروم و مولیبدن به فلز جوش ابتدا درصد فریت سوزنی افزایش پیدا کرده و درصد فریت مرزدانه‌ای و چندوجهی کاهش می‌یابد. در ادامه فریت با فاز ثانویه و بینایت تشکیل می‌شود [17,11]. با توجه به تصاویر میکروسکوپ نوری، در نمونه BS22 افزودن هم‌زمان 0.2 درصد وزنی کروم و 0.2 درصد وزنی مولیبدن به فلز جوش باعث افزایش قابل‌توجه فاز فریت سوزنی و کاهش فریت مرزدانه‌ای و چندوجهی شده است. نمونه BS33 کروم تا 0.28 درصد وزنی و مولیبدن تا 0.35 درصد وزنی افزایش پیدا کرد. در این حالت مقدار فریت مرزدانه‌ای و چندوجهی باز هم کاهش یافت و با توجه به افزایش سختی‌پذیری به‌دلیل افزودن کروم و مولیبدن، احتمال تشکیل جزئی فریت با فاز ثانویه و مناطق تجمع کاربید وجود دارد. با افزودن 0.45 درصد وزنی کروم و 0.61 درصد وزنی مولیبدن در نمونه BS46، مقدار فریت با فاز ثانویه و مناطق تجمع کاربید افزایش و مقدار فریت سوزنی کاهش پیدا کرد.

جدول 5 درصد کمی تقریبی فازهای تشکیل شده در فلز جوش با افزودن کروم و مولیبدن را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد افزودن کروم و مولیبدن ابتدا باعث افزایش فاز فریت سوزنی شده و در ادامه فریت با فاز ثانویه تشکیل می‌شود. مولیبدن اثر بیشتری بر تشکیل فریت سوزنی نسبت به

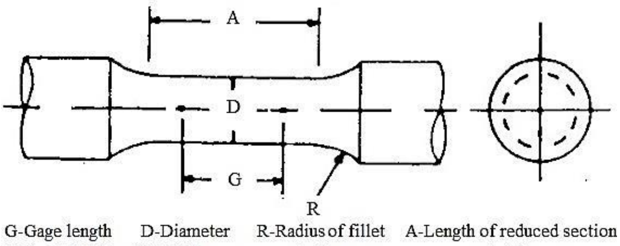

Fig. 3 Dimensions for Longitudinal Tensile Strength test (ASTM E8M)

شکل 3 ابعاد نمونه کشش طولی

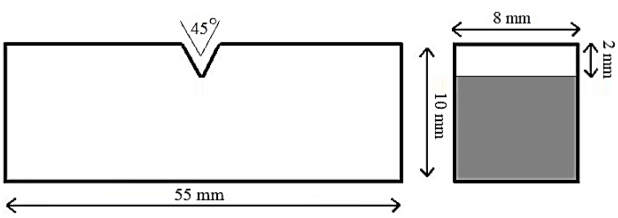

Fig. 4 Dimensions for Charpy V Notch test (ASTM E23-82)

شکل 4 ابعاد نمونه انرژی ضربه‌ی شارپی

[7] Ferrite with Second Alloyed phase (FSA)

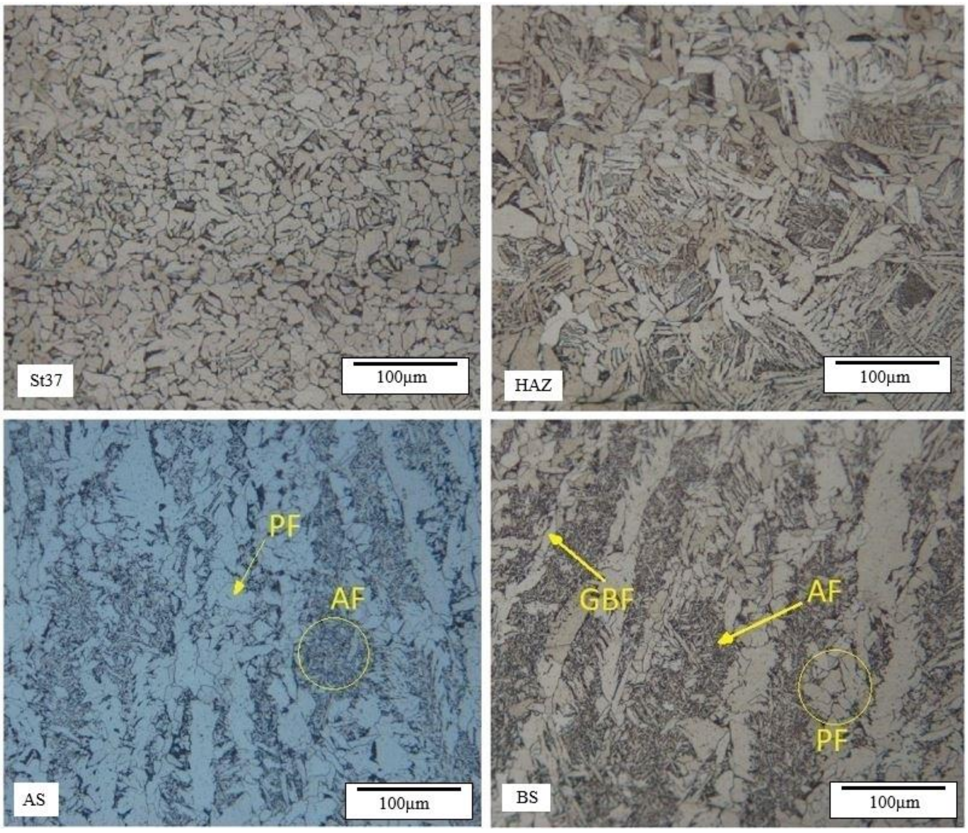

Fig. **5** Microstructures of Base metal St37, HAZ, weld metal welded by Agglomerated flux (AS) and weld metal welded by Bonded flux (BS)

شکل 5 ریزساختار فلز پایه St37، HAZ، فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده (AS) و فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش چسبانده شده (BS)

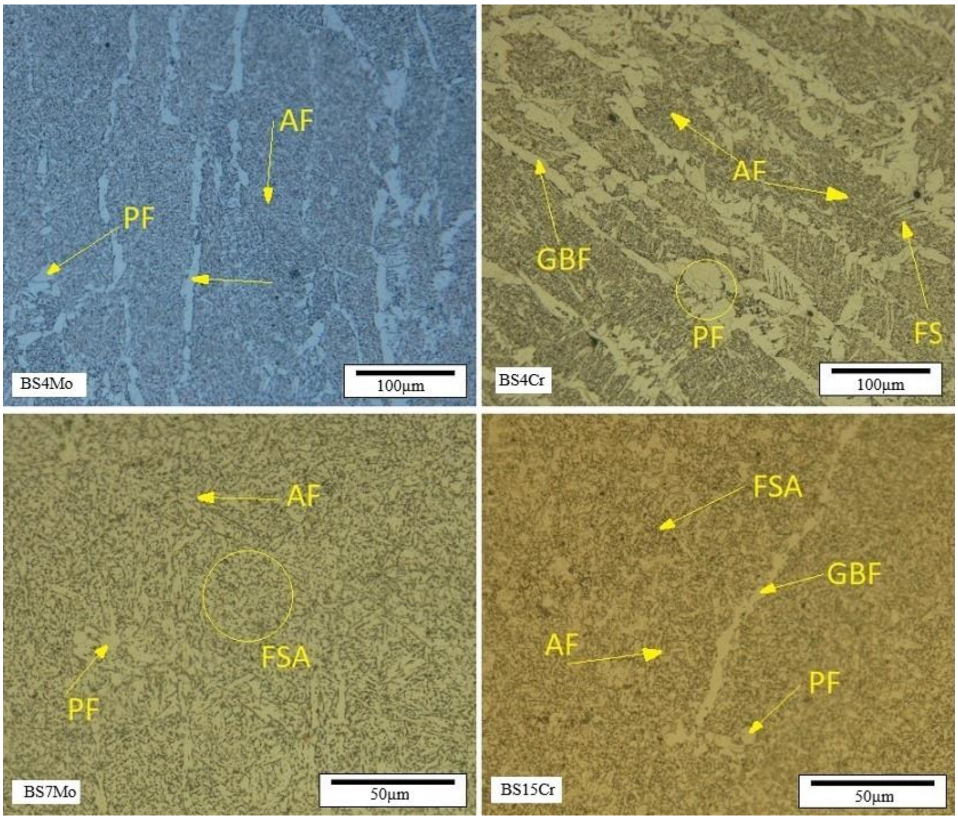

Fig. **6** Microstructures of the weld metals with 0.4 wt. % Molybdenum (BS4Mo), 0.7 wt. % Molybdenum (BS7Mo), .04 wt. % chromium (BS4Cr) and 1.5 wt. % Chromium (BS15Cr) contents

شکل 6 ریزساختارهای فلزهای جوش با 0.4 درصد وزنی مولیبدن (BS4Mo)، 0.7 درصد وزنی مولیبدن (BS7Mo)، 0.4 درصد وزنی کروم (Bs4Cr) و 1.5 درصد وزنی کروم (BS15Cr)

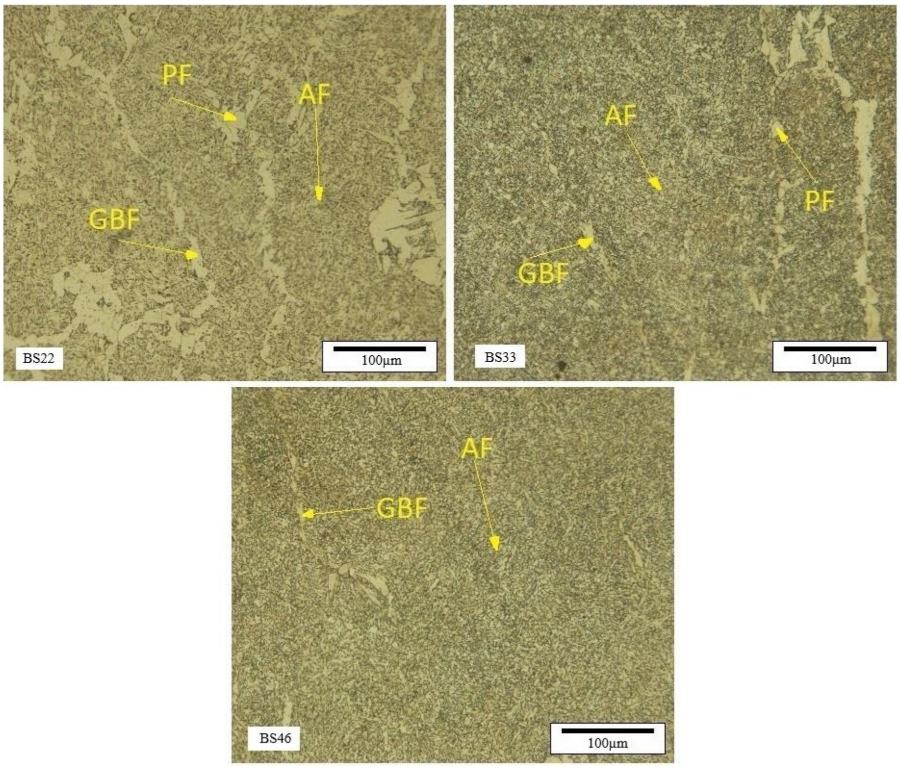

Fig. 7 Microstructures of the weld metals with 0.2 wt. % Chromium and 0.2 wt. % Molybdenum (BS22), 0.28 wt. % Chromium and 0.35 wt. % Molybdenum (BS33) and 0.45 wt. % Chromium and 0.61 wt. % Molybdenum (BS46) contents

شکل 7 ریزساختارهای فلزهای جوش با 0.2 درصد وزنی کروم و 0.2 درصد وزنی مولیبدن (BS22)، 0.28 درصد وزنی کروم و 0.35 درصد وزنی مولیبدن (BS33) و 0.45 درصد وزنی کروم و 0.61 درصد وزنی مولیبدن (BS46)

جدول 5 آنالیز کمی ریزساختاری فلزهای جوش با مقادیر مختلف عناصر آلیاژی

Table 5 Quantitative microstructural analysis of Weld metals with different content of alloying elements

اسم جوش	FSA	FS	PF	GBF	AF
AS	-	2	43	11	44
BS	-	2	44	12	42
BS4Mo	-	1	3	9	87
BS7Mo	28	-	1	1	70
BS4Cr	-	10	23	10	57
BS15Cr	46	-	2	2	50
BS22	-	-	8	8	84
BS33	-	-	2	3	95
BS46	38	0	1	1	60

کروم دارد. تاثیر افزودن همزمان کروم و مولیبدن بر روی تشکیل فریت سوزنی به مراتب بهتر از تاثیر تکی این عناصر است که باعث بهبود خواص مکانیکی نیز شده است.

بررسی‌ها نشان داده است که فریت سوزنی بیشتر روی آخال‌ها جوانه‌زنی می‌کند [18]. با تغییر نوع و ترکیب شیمیایی فلز جوش، ماهیت آخال‌های موجود در فلز جوش تغییر می‌کند. نوع، ترکیب و اندازه‌ی آخال تأثیر اساسی بر ریزساختار و تشکیل فریت سوزنی دارد [19]. ایجاد شرایط 1) اختلاف اندک کرنش شبکه‌ای بین آخال و زمینه، 2) کرنش گرمایی مثبت در اطراف آخال‌ها به‌دلیل اختلاف زیاد ضریب انبساط گرمایی با زمینه، 3) کمینه کردن انرژی بین سطوح و 4) تشکیل مناطق کاهش منگنز اطراف آخال MnS باعث افزایش جوانه‌زنی فریت سوزنی می‌شود [20]. جدول 6 و "شکل 8" نتایج آنالیز طیف‌نگاری تغییرات انرژی آخال‌های موجود در جوش BS33 را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، با افزایش کروم و مولیبدن به فلز جوش، مقدار مولیبدن و کروم در آخال‌های موجود در فلز جوش افزایش یافته و باعث افزایش جوانه‌زنی فریت سوزنی می‌شود.

3-2- سختی و استحکام

خواص مکانیکی فلز جوش‌های مختلف شامل نتایج آزمون کشش طولی، سختی‌سنجی و آزمون ضربه در جدول 7 آمده است. "شکل 9" نمودار تنش کرنش جوش‌های مختلف روی فولاد St37 را نشان می‌دهد. نمودار تنش-کرنش در فلز جوش AS و BS تقریباً روی‌هم افتاده است. این بدان معناست که خواص مکانیکی فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش تولیدشده به

جدول 6 نتایج (درصد وزنی) آنالیز طیف‌سنجی تغییرات انرژی از آخال جوش BS33

Table 6 ESD analyses (wt. %) results of BS33 inclusion

اسم جوش	Mo	Fe	Cr	Mn	Si	Al	O
BS33	3.02	53.64	0.28	11.31	10.31	12.21	9.23

جدول 7 نتایج خواص مکانیکی جوش‌های مختلف در دمای محیط

Table 7 Impact toughness results of weld metals in room temperature

نوع جوش	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول	سختی (Hv)	انرژی ضربه (J)
AS	390	550	24.7	145	144
BS	357	520	24.8	150	146
BS4Mo	514	640	20.4	184	107
BS7Mo	668	826	17.5	211	105
BS4Cr	383	554	26	155	93
BS15Cr	669	882	11.2	200	60
BS22	456	598	25.7	155	115
BS33	488	625	20.5	163	113
BS46	555	690	21	165	98

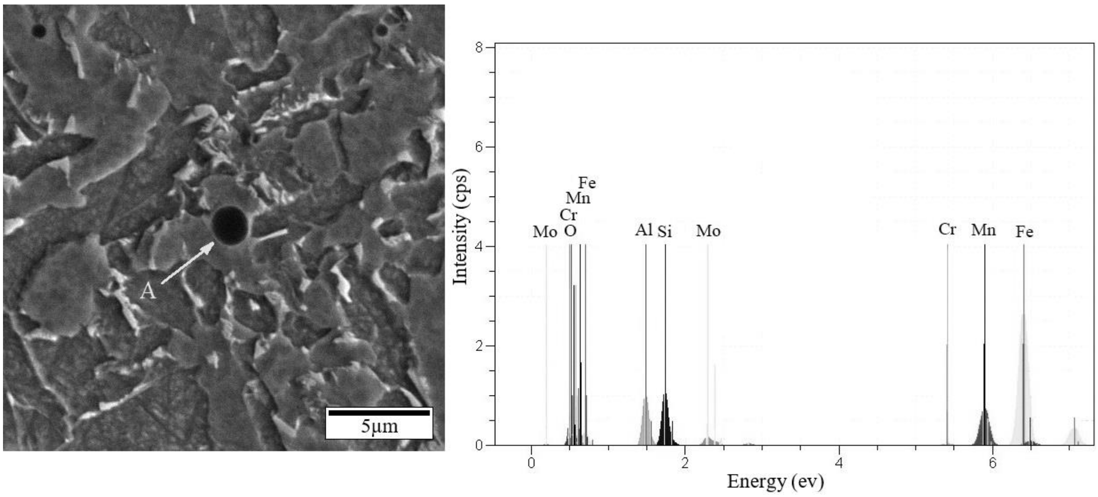

Fig. 8 ESD analyses of BS33 inclusion in A

شکل 8 آنالیز طیف‌سنجی تغییرات انرژی از آخال نمونه جوش BS33 در نقطه‌ی A

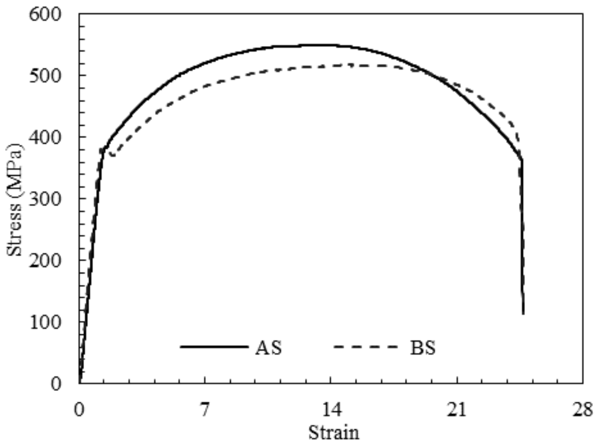

Fig. 9 Stress-Strain diagrams of weld metals welded by Agglomerated and Bonded Flux without addition of alloying elements

شکل 9 نمودار تنش-کرنش فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده و چسبانده شده بدون افزودن عناصر آلیاژی

روش چسباندن برابر خواص فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده به‌دست‌آمده است.

افزودن مولیبدن باعث افزایش سختی‌پذیری فولاد می‌شود، همچنین ترکیب خوبی از استحکام و چقرمگی در فلز جوش ایجاد می‌کند [11]. با توجه "شکل 10" با افزایش مولیبدن فلز جوش استحکام به‌دلیل تشکیل محلول جامد، فازهای فریت سوزنی و بینایت افزایش یافته است. افزودن 0.4 درصد مولیبدن به فلز جوش (BS4Mo) باعث افزایش استحکام نسبت به حالت پایه شده و انعطاف‌پذیری کاهش جزئی داشته است. این به‌دلیل وجود درصد بالای فریت سوزنی در ریزساختار است که استحکام و انعطاف‌پذیری را به‌صورت هم‌زمان دارد [5]. افزودن 0.7 درصد مولیبدن به فلز جوش (BS7Mo)، مقداری از فریت سوزنی کاهش و تبدیل به فریت با فاز ثانویه و بینایت شده که در اثر آن انعطاف‌پذیری کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به "شکل 11" با افزایش کروم در فلز جوش استحکام افزایش و انعطاف‌پذیری به‌خصوص در مقادیر بالای کروم کاهش‌یافته است. با افزایش 1.5 درصد وزنی کروم (BS15Cr)، استحکام و سختی افزایش چشمگیری یافته، ولی چقرمگی شکست و انعطاف‌پذیری به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. این به دلیل کاهش درصد فریت سوزنی و افزایش فریت با فاز ثانویه در این حالت است [17].

نمودار تنش-کرنش با افزودن هم‌زمان کروم و مولیبدن به فلز جوش در "شکل 12" آمده است. افزودن هم‌زمان کروم و مولیبدن باعث افزایش استحکام درعین‌حال بهبود چقرمگی شکست شده است. در این حالت مقدار فریت سوزنی افزایش‌یافته که موجب افزایش استحکام هم‌زمان با خواص خوب انرژی ضربه شده است [21]. با افزودن 0.2 کروم و 0.2 درصد مولیبدن به فلز جوش (BS22) به دلیل تشکیل درصد بالای فریت سوزنی استحکام و انعطاف‌پذیری فلز جوش افزایش‌یافته است. در نمونه BS46 با افزودن 0.45 درصد کروم و 0.61 درصد مولیبدن به فلز جوش، استحکام بازهم افزایش پیدا می‌کند اما به دلیل کاهش فریت سوزنی و تشکیل فازهای بینایت و فریت با فاز ثانویه، انعطاف‌پذیری مقداری کاهش می‌یابد.

3-3- انرژی ضربه

نتایج آزمون انرژی ضربه شارپی از فلز جوش‌های مختلف در جدول 7 آمده است. انرژی ضربه فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش اگلومره شده و چسبانده شده یکسان و حدود 146 ژول به دست آمد، پس تغییر در روش ساخت پودر جوش تأثیر روی انرژی ضربه هم نداشت. با افزودن عناصر آلیاژی انرژی ضربه فلز جوش کاهش یافت. این نتیجه با برخی از نتایج بررسی‌ها مطابقت دارد و با نتایج برخی تحقیقات در تضاد است. فلز پایه مختلف، اختلاف در نوع و مقدار عناصر آلیاژی موجود در فلز جوش، شرایط جوش‌کاری، ناخالصی‌های موجود در پودر عناصر فلزی اضافه شده به پودر جوش و میزان متفاوت اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و فسفر در فلز جوش می‌تواند از دلایل اصلی اختلاف در نتایج باشد [22].

تغییرات انرژی ضربه با افزودن مولیبدن در "شکل 13" آمده است. افزایش مولیبدن باعث کاهش جزئی در انرژی ضربه فلز جوش شده است. افزایش مولیبدن باعث افزایش سختی‌پذیری شده و امکان تشکیل فریت با فاز ثانویه و بینایت را بالا می‌برد که باعث کاهش انرژی ضربه می‌شود [21]. از طرفی باعث افزایش قابل‌توجه فاز فریت سوزنی که انرژی ضربه‌ی خوبی دارد نیز می‌شود. به همین دلیل انرژی ضربه کاهش جزئی پیدا کرده است.

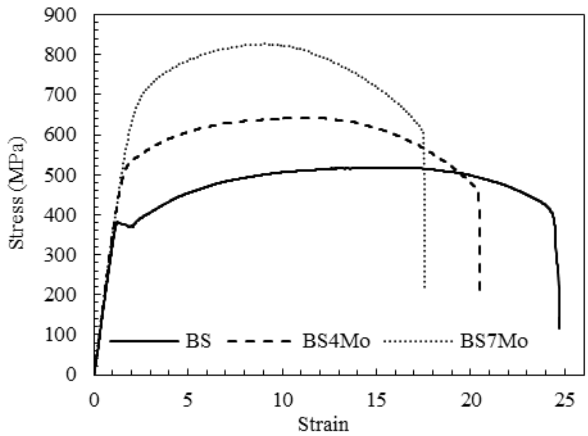

Fig. 10 Effects of Mo addition on Stress-Strain diagrams of weld metals

شکل 10 تأثیر افزودن مولیبدن به فلز جوش روی نمودار تنش-کرنش آن

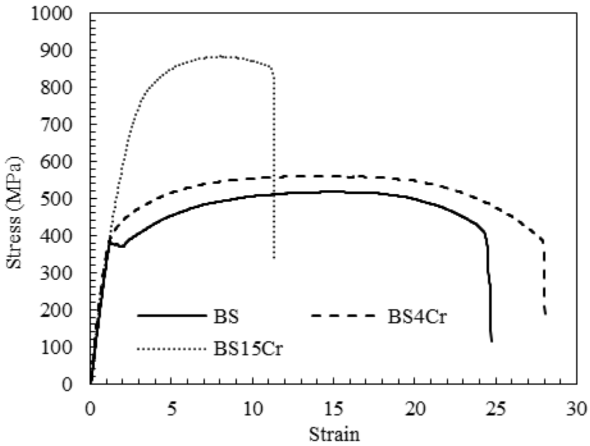

Fig. 11 Effects of Cr addition on Stress-Strain diagrams of weld metals

شکل 11 تأثیر افزودن کروم به فلز جوش روی نمودار تنش-کرنش آن

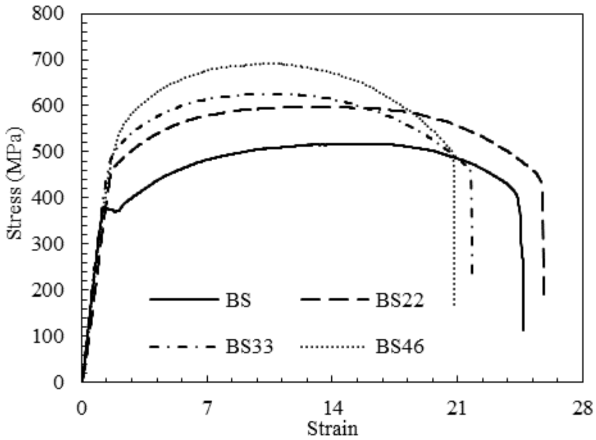

Fig. 12 Effects of Cr and Mo addition together on Stress-Strain diagrams of weld metals

شکل 12 تأثیر افزودن همزمان کروم و مولیبدن به فلز جوش روی نمودار تنش-کرنش آن

"شکل 14" تغییرات انرژی ضربه با افزودن کروم را نشان می‌دهد. کروم نیز باعث افزایش سختی‌پذیری فولاد می‌شود [15]. از طرفی با افزودن کروم فریت سوزنی فزایش جزئی داشته است. به همین دلیل افزایش کروم به فلز جوش به‌خصوص بالاتر از 0.4 درصد وزنی، باعث کاهش شدید در انرژی ضربه

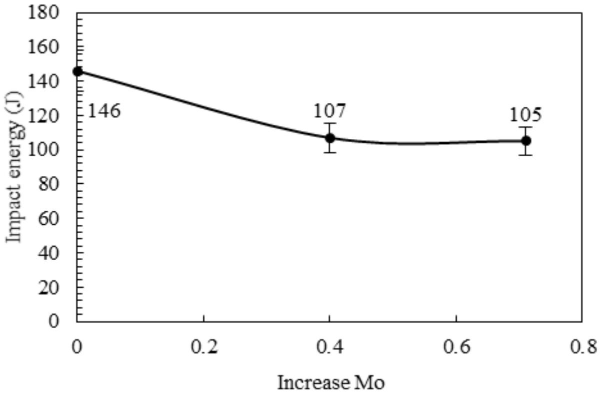

Fig. 13 Effects of Mo addition on Impact toughness of Weld metal in room temperature

شکل 13 تأثیر افزودن مولیبدن روی انرژی ضربه فلز جوش در دمای محیط

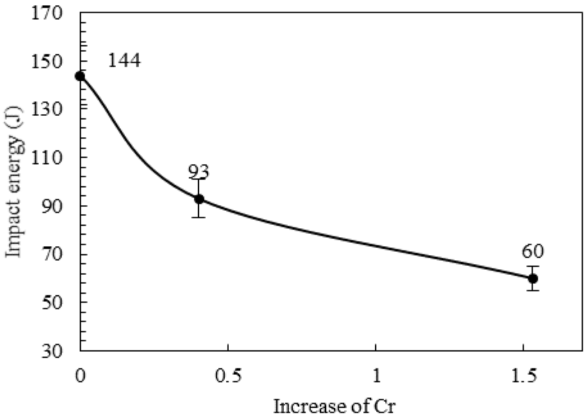

Fig. 14 Effects of Cr addition on Impact toughness of Weld metal in room temperature

شکل 14 تأثیر افزودن کروم روی انرژی ضربه فلز جوش در دمای محیط

شده است. با افزایش کروم فلز جوش تا 5.1 درصد، انرژی ضربه‌ی فلز جوش به‌شدت کاهش پیدا کرد و به حدود 60 ژول رسید.

"شکل 15"تغییرات انرژی ضربه با افزودن مولیبدن و کروم به فلز جوش را نشان می‌دهد. افزایش هم‌زمان کروم و مولیبدن تأثیر بیشتری روی تشکیل فریت سوزنی نسبت به افزودن تکی این عناصر داشته است، در نتیجه انرژی ضربه کاهش کمتری داشته است. با افزودن 0.2 درصد مولیبدن و 0.2 درصد کروم به فلز جوش به دلیل تشکیل بالای فریت سوزنی در فلز جوش، با 115 ژول بیش‌ترین انرژی ضربه را در بین فلز جوش‌های آلیاژی به‌دست آمد. با افزایش بیشتر مولیبدن و کروم، مقدار فریت سوزنی کاهش و بینایت و فریت با فاز ثانویه افزایش یافت و درنتیجه باعث کاهش انرژی ضربه شد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از فرآیند جوش‌کاری زیرپودری استفاده شد. به این منظور پودر جوش آلیاژی به روش چسباندن برای افزودن کروم و مولیبدن به فلز جوش فولاد ساختمانی St37 تولید شد. نتایج زیر به‌دست آمد:

1. ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش جوش‌کاری شده با پودر جوش تولیدشده به روش چسباندن و اگلومره سازی یکسان به‌دست آمد. این بدان معناست که در روش چسباندن می‌توان به فلز جوش عناصر آلیاژی اضافه کرد بدون آن‌که تأثیر منفی روی وظایف پودر جوش ازجمله محافظت از فلز جوش بگذارد.

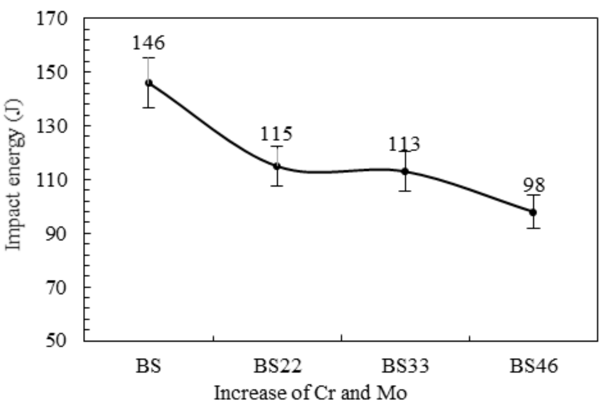

Fig. 15 Effects Cr of Mo addition together on Impact toughness of Weld metal in room temperature

شکل 15 تأثیر افزودن همزمان کروم و مولیبدن روی انرژی ضربه فلز جوش در دمای محیط

2. بدون استفاده از عناصر آلیاژی، درصد زیادی فریت سوزنی در فلز جوش تشکیل نمی‌شود، زیرا آخال‌های موجود در فلز جوش در این حالت بیشتر اثر خنثی روی جوانه‌زنی فریت سوزنی دارند.

3. با افزودن مولیبدن به فلز جوش، مولیبدن آخال‌های اکسیدی افزایش یافته و باعث افزایش جوانه‌زنی فریت سوزنی می‌شود. افزودن 0.4 درصد حدود 60 درصدی استحکام کششی و کاهش حدود 22 درصدی انرژی ضربه می‌شود.

4. تاثیر افزودن کروم به فلز جوش روی تشکیل فریت سوزنی کمتر از مولیبدن است. با افزایش کروم تا 0.4 درصد، 57 درصد فریت سوزنی تشکیل می‌شود. در این حالت استحکام تغییر زیادی نکرده ولی انرژی ضربه حدود 35 درصد کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر کروم، درصد زیادی فریت با فاز ثانویه تشکیل شده و انرژی ضربه حدود 60 درصد کاهش می‌یابد.

5. افزودن هم‌زمان کروم و مولیبدن به فلز جوش، باعث تشکیل درصد بالاتر فریت سوزنی نسبت به افزودن تکی این عناصر می‌شود. با افزودن 0.35 درصد مولیبدن و 0.28 درصد کروم به فلز جوش، فریت سوزنی تا حدود 95 درصد افزایش پیدا می‌کند. در این حالت استحکام حدود 20 درصد (100 مگاپاسکال) افزایش و انرژی ضربه حدود 15 درصد (20 ژول) کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر این دو عنصر، فریت با فاز ثانویه تشکیل‌شده و انرژی ضربه کاهش می‌یابد.

5- تقدیر و تشکر

با تقدیر و تشکر شایسته از معاونت پژوهشی دانشگاه و مسئولین شرکت صنعتی آما و آقای مهندس رحیمی که مواد اولیه‌ی موردنیاز برای انجام این پژوهش را فراهم نمودند.

6- مراجع

[1] A. Kokabi, M. Mahmoodghaznavi, *Welding Technology*, pp. 108-160, Tehran: Publishing institute of Sharif university, 2005. (in Persian فارسی)
[2] P. T. Houldcroft, ed, *Submerged-arc Welding*, pp. 9-18, Cambridge: Woodhead publishing, 1989.
[3] W. De Long, H. Heverly, E. Szumachowski, *Bonded Arc Welding Flux and Liquid Binding Agent Therefor*, U. S. Patent No. 3,769,099, 1973.
[4] M. Tokuhisa, Y. Hirai, *Basic Bonded Fluxes for Submerged Arc Welding Having an Excellent Removability of Slag at a Narrow Groove*, U. S. Patent No. 4,436, 562, 1984.
[5] G. Thewlis, Classification and quantification of microstructures in steels, *Materials Science and Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 143-160, 2004.
[6] M. Fattahi, N. Nabhani, M. Hosseini, N. Arabian, et al, Effect of Ti-containing inclusions on the nucleation of acicular ferrite and mechanical properties of multipass weld metals, *Micron*, Vol. 45, No. 1, pp. 107-114, 2013.
[7] B. HKDH, Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite, *Materials Transactions, JIM*, Vol. 32, No. 8, pp. 679-688, 1991.
[8] S. S. Babu, The mechanism of acicular ferrite in weld deposits, *Current Opinion in Solid state and Materials Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 267-278, 2004.
[9] H. Mabuchi, R. Uemori, M. Fujioka, The role of Mn depletion in intra-granular ferrite transformation in the heat affected zone of welded joints with large heat input in structural steels, *ISIJ International*, Vol. 36, No. 11, pp. 1406-1412, 1996.
[10] T. K. Lee, K. HJ, Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds, *ISIJ International*, Vol. 40, No. 12, pp. 1260-1268, 2000.
[11] R. J. Davis, ed, *Alloying: Understanding the Basics*, pp. 123-132, Ohio: ASM international, 2001.
[12] M. Khazaee, A. Kokabi, effect of alloying addition on mechanical properties and microstructure of weld metal of St12 steel welded with self-shielded flux-cored arc welding, *The 13th Scientific Student Conference On Metallurgical and Materials Engineering*, Amirkabir university of technology, Tehran, Iran, 2016. (in Persian فارسی)
[13] S. D. Bhole, J. B. Nemade, L. Collins, C. Lui, Effect of nickel and molybdenum additions on weld metal toughness in a submerged arc welded HSLA line-pipe steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, No. 1, pp. 92-100, 2006.
[14] K. Junhua, et al, Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel, *Materials & Design*, Vol. 25, No. 8, pp. 723-728, 2004.
[15] J. C. F. Jorge, L. F. G. Souza, J. M. A. Rebello, The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits, *Materials Characterization*, Vol. 47, No. 3, pp. 195-205, 2001.
[16] W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, M. Strangwood, Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds, *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 1, pp. 29-39, 2007.
[17] X. W. Chen, et al, Effects of Mo, Cr and Nb on microstructure and mechanical properties of heat affected zone for Nb-bearing X80 pipeline steels, *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 888-901, 2014.
[18] I. Datta, M. Parekh, Filler metal flux basicity determination using the optical basicity index, *Welding Journal*, Vol. 68, No. 2, pp. 68-74, 1989.
[19] P. Krauklis, F. J. Barbaro, K. E. Easterling, Pro International Conference Martensitic Transformations, *Monterey Institute for Advanced Studies, Monterey*, pp. 439, 1992.
[20] B. Singh, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, Review on effect of flux composition on its behavior and bead geometry in submerged arc welding (SAW), *Journal of Mechanical Engineering Research*, Vol. 5, No. 7, pp. 123-127, 2013.
[21] L. F. G de Souza, et al, Microstructural analysis of a single pass 2.25% Cr–1.0% Mo steel weld metal with different manganese contents, *Materials Characterization*, Vol. 55, No. 1, pp. 19-27, 2005.
[22] D. L. Olson, et al, Nature and Behavior of fluxes used for Welding, *ASM International, ASM Handbook*, Vol. 6, pp. 55-63, 1993.