غفاری، کورش؛ قبیتی حسب، مهدی (۱۳۹۵). اثر پارامترهای جوشکاری زیر پودری بر خواص مکانیکی لوله فولادی میکروآلیاژی X80. تبدیل انرژی، ۲(۴)، ۲۷-۳۰.

اثر پارامترهای جوشکاری زیر پودری بر خواص مکانیکی لوله فولادی میکروآلیاژی X80

کورش غفاری [۱]، مهدی قبیتی حسب [۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک – ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران
[۲] استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران

دریافت: فروردین ۹۵، بازنگری: اردیبهشت ۹۵، پذیرش: تیر ۹۵

چکیده

در این مقاله اثر پارامترهای جوشکاری (جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری) بر خواص مکانیکی (کشش و ضربه) ناحیه حرارت دیده ناشی از جوش زیر پودری لوله های از جنس فولاد میکرو آلیاژی X80 مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی نتایج آزمایشگاهی نمونه های جوشکاری شده نشان داد که پارامتر جریان، تأثیر مثبت بر استحکام (تسلیم و کششی) و تاثیر منفی بر چقرمگی نمونه دارد. افزایش ولتاژ، موجب افزایش پهنای ناحیه حرارت دیده و کاهش استحکام و چقرمگی نمونه می شود. افزایش سرعت جوشکاری تاثیر زیادی بر بهبود استحکام و چقرمگی دارد.

[*] **عهده‌دار مکاتبات:** ghobeiti@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: فولاد میکرو آلیاژی، جوشکاری زیر پودری، ناحیه متاثر از حرارت، استحکام، چقرمگی.

۱- مقدمه

صنایع نفت و گاز به عنوان موتور محرکی برای توسعه صنعت به شمار می روند. لذا نیاز به توسعه میادین جدید نفت و گاز و انتقال آن به بازارهای مصرف دور دست بیش از پیش احساس می گردد. در صنعت گاز پیوسته فعالیت هایی در جهت بهبود مزایای اقتصادی به وسیله ی بهینه سازی طراحی خطوط لوله در حال انجام است. فاکتور تعیین کننده در افزایش کمیت گاز در مسیرهای طولانی، افزایش فشار کاری است. در نتیجه به استحکام های بالاتر یا مواد ضخیمتر برای ساخت لوله های خطوط انتقال نیاز خواهد بود. با توجه به افزایش روزافزون فشارهای کاری و طـــول خطوط لوله، توسعه ی فولادهای استحکام بالا سهم قابل ملاحظه ای را در کاهش هزینه ی ساخت و احداث پروژه های خطوط لوله خواهد داشت [۱].

با توجه به هزینه بالای ایجاد خطوط لوله که عمدتا حامل مواد و فرآورده های نفتی و گازی بسیار خطرناک و اشتعال زا می باشند، کیفیت بالای ساخت این لوله ها به خصوص منطقه جوش و ناحیه اطراف آن (HAZ) از اهمیّت بسیار زیادی جهت جلوگیری از زیانهای مالی و جانی برخوردار است [۲].

روشهای جوشکاری مورد استفاده در ساخت لوله های فولادی عبارتند از:

- جوشکاری مقاومت الکتریکی فرکانس بالا: در این روش لبه های ورق پس از فرآیند شکل دهی به روش نورد سرد، به یکدیگر رسیده و در اثر جریان الکتریسیته فرکانس بالا به حالت خمیری درآمده و پس از آن با اعمال فشار از سوی غلتک های فشار دهنده در هم فرو رفته و عمل ادغام صورت می گیرد.
- جوشکاری زیر پودری: در این روش لبه های ورق پس از فرآیند شکل دهی به روش نورد سرد، بوسیله فرآیند جوشکاری زیرپودری که از دسته فرآیندهای ذوبی با انرژی حرارتی بالا می باشد، به یکدیگر متصل می شوند. در این فرآیند با تشکیـــل قوس الکتریکی بین الکترود فولادی مصرف شدنی و لبه های اتصال لوله، عملیات جوشکاری تحت بستری از پودر که از حوضچه مذاب محافظت می نماید، انجام می شود. جوشکاری زیرپودری بدلیل انرژی حرارتی بالا و قابلیت آن برای اتصال قطعات ضخیم، جهت ساخت لوله های قطور با ضخامت بالا مورد استفاده در خطوط اصلی و پرفشار انتقال نفت و گاز، کاربرد دارد [۳و۴].

انرژی حرارتی بالای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری زیرپودری موجب ایجاد تغییرات و اختلافات شدید دمایی در ناحیه اطراف جوش و در نتیجه تشکیل فازهای مختلف (به خصوص فازهای ترد و شکننده) به همراه تغییرات زیاد در اندازه دانه ها می شود. در صورت عدم کنترل صحیح سیکلهای

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.2.7]

حرارتی ناشی از جوشکاری، کاهش شدید خواص مکانیکی و به خصوص چقرمگی در ناحیه متاثر از حرارت اجتناب ناپذیر است [۵-۷].

این تحقیق بر روی فولاد API 5L X80 که به روش جوشکاری زیرپودری به لوله تبدیل شده است انجام گردیده است. فولادهای میکروآلیاژی مورد استفاده برای ساخت لوله های انتقال نفت و گاز مطابق استاندارد API با سری X طبقه بندی می شوند. X دلالت بر وجود عناصری همچون نیوبیم، وانادیم، نیتروژن یا دیگر عناصر آلیاژی در فولاد مورد نظر دارد. دو رقم بعد از X نشان دهنده حداقل استحکام تسلیم مورد نیاز فولاد بر حسب ksi است. افزایش استحکام و چقرمگی فولاد X80 با تغییر ریزساختار زمینه ی فولاد از فریتی - پرلیتی به فریتی - بینیتی امکان پذیر است که به دلیل اندازه دانه ریزتر و چگالی بالاتر نابجایی ها در ساختار بینیتی نسبت به ساختار پرلیتی می باشد [۸-۱۰].

در این تحقیق ابتدا با روش تجربی به پارامترهایی که به وسیله آنها جوشی بدون عیب با خواص مکانیکی در محدوده استاندارد تولید می گردد، دست یافته (نمونه مبنا) و سپس با محوریت قرار دادن این پارامترها و با ایجاد تغییرات مجزا در هر کدام از آنها، رفتار و خواص مکانیکی ناحیه متاثر از حرارت مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

۲-۱- *ماده اولیه:*

فلز پایه مورد استفاده جهت انجام این پژوهش فولاد میکروآلیاژی X80 است که توسط شرکت POSCO با شماره ذوب ۱۵۲۷۷ و ضخامت ۰٫۶۸۸ اینچ (۱۷٫۵ میلی متر) تولید شده و به صورت قطاع های برش خورده از لوله ای به قطر ۵۶ اینچ (تولید شده به روش جوش زیر پودری در شرکت لوله سازی اهواز) می باشند، فراهم شده است. نتایج آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده در تحقیق در جدول۱ و خواص مکانیکی آن در جدول۲ ارایه شده است. این فولاد کمتر از ۰٫۱ درصد وزنی کربن دارد و فولادی کم کربن به شمار می رود. فولاد میکرو آلیاژی مورد استفاده در این تحقیق در محدوده استاندارد API 5L قرار دارد. عناصر میکروآلیاژی نظیر وانادیم، نیوبیم، و تیتانیم به میزان اندک و عناصر ناخالصی نظیر فسفر و گوگرد در حداقل مقدار ممکن قرار دارند.

۲-۲- *فرایند جوشکاری:*

فرآیند جوشکاری زیر پودری تک سیمه در چهار پاس متوالی برای ساخت نمونه های جوش مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از یک پاس جوش به روش جوشکاری الکترود دستی به عنوان جوش پشت بند برای تنظیم قطعات نمونه ها در کنار یکدیگر استفاده شد. قطر سیم های مصرفی ۴ میلی متر در نظر گرفته شد. سیم جوشکاری مورد استفاده از نوع KJS-124 می باشد که توسط شرکت کاوش جوش تولید شده است. این نوع سیم معادل EA2 در استاندارد AWS A 5.23 بوده که ترکیب شیمیایی آن در جدول۳ ارائه شده است. نوع فلاکس مصرفی KJF-612 می باشد که توسط شرکت کاوش جوش تولید شده است. این فلاکس با هر دو جریان یکنواخت و متناوب سازگار بوده، درجه بازیسیته آن حدود ۱٫۳ و از نوع آلومینات قلیایی آگلومره می باشد. فلاکس مورد نظر، پیش از استفاده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد به مدت دو ساعت تحت عملیات بازپخت قرار گرفت. پیش از انجام عملیات جوشکاری طرح اتصال بر روی لبه های ورق به وسیله عملیات پخ زنی با زاویه ۲±۶۰ درجه ایجاد و آماده سازی گردید. فاصله نازل از سطح ورق ۳۳ میلی متر در نظر گرفته شد. پارامترهای جوشکاری برای نمونه مبنا در جدول۴ ارایه شده است. در تمامی پاس های جوشکاری از جریان مستقیم با قطبیت مثبت استفاده شده است.

جدول(۱): آنالیز شیمیایی فولاد مورد بررسی در تحقیق

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
C	۰٫۰۷۲	*Cu*	۰٫۰۰۹
Si	۰٫۲۵	*Ti*	۰٫۰۱۲
Mn	۱٫۸۰۵	*V*	۰٫۰۰۳
P	۰٫۰۰۷۸	*N*	۰٫۰۰۴
S	۰٫۰۰۱	*Mo*	۰٫۲۹
Al	۰٫۰۳۱	*Nb*	۰٫۰۳۵
Cr	۰٫۰۲	*Ni*	۰٫۲۶

جدول(۲): خواص مکانیکی فولاد مورد بررسی در تحقیق

خاصیت (واحد)	مقدار
انرژی ضربه (*J*)	۲۳۸ (در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد)
استحکام تسلیم (*psi*)	۸۸۹۸۵
استحکام کششی (*psi*)	۹۹۷۱۴
انعطاف پذیری (٪)	۳۲
سختی (ویکرز)	۲۰۵

جدول(۳): آنالیز شیمیایی سیم جوشکاری

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
C	۰٫۰۹	*S*	۰٫۰۰۶
Si	۰٫۱	*Cu*	۰٫۲۷
Mn	۱٫۰۴	*Mo*	۰٫۴۶
P	۰٫۰۰۶	-	-

۲-۳- *آنالیز نمونه ها*

در چند مرحله اقدام به جوش بر روی نمونه های ورق شکل گرفته شده به شکل لوله با قطر ۵۶ اینچ گردید. در هـــر مرحله با توجه به ابعاد مناسب جـــوش (عرض و ارتفاع گرده جوش)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.2.7]

مطابق با محدوده های مجاز قید شده در استاندارد API-5L، دو پارامتر از پارامترهای آمپر، ولتاژ و سرعت جوشکاری را ثابت نگه داشته، با اعمال تغییرات بر روی پارامتر سوم، نمونه های مورد نیاز تولید شدند. در هر مرحله جهت انجام آزمـــون های کشش و ضربه (چارپی) نمونه های استانداردی از مقاطع جوش تهیه و آماده سازی شد.

جدول(۴): پارامترهای جوشکاری زیرپودری برای نمونه مبنا

شماره پاس	آمپر	ولتاژ	سرعت (سانتی متر بر دقیقه)
پاس۱	۶۰۰	۳۶	۶۵
پاس۲	۷۰۰	۳۸	۵۵
پاس۳	۶۰۰	۴۰	۵۰
پاس۴	۶۰۰	۴۲	۴۵

آزمون کشش نمونه ها بر اساس استاندارد370 ASTM و آزمون ضربه بر اساس استاندارد ASTM E23 انجام شدند. در نهایت تأثیر هر کدام از پارامترهای جوشکاری بر خواص مکانیکی ناحیه حرارت دیده، تعیین گردید.

۳- نتایج و بحث

خواص مکانیکی نمونه جوش مبنا در جدول۵ ارائه شده است.

۳-۱- تأثیر شدت جریان:

برای بررسی اثر تغییرات شدت جریان روی ناحیه حرارت دیده جوش زیرپودری چهار نمونه با آمپر های متفاوت و تحت سرعت و ولتاژ ثابت تهیه و تست شدند. سرعت جوشکاری ۵۲/۵ سانتی متر بر دقیقه و ولتاژ جوشکاری ۳۹ ولت بود. نتایج در جدول۶ ارائه شده اند.

همان طور که نتایج نشان می دهد افزایش میزان جریان (آمپر) بعنوان یکی از پارامترهای موثر در میزان انرژی حرارتی ورودی به جوش، تا مقدار ۶۵۰ آمپر موجب افزایش استحکام تسلیم و کششی شده ولی بیش از این مقدار، هر دو استحکام کاهش می یابند. همچنین افزایش مقدار آمپر باعث کاهش انرژی جذب شده در آزمایش ضربه می شود که این امر ناشی از درشت تر شدن اندازه دانه های ناحیه حرارت دیده در اثر افزایش مقدار جریان می باشد.

جدول(۵): خواص مکانیکی نمونه جوش مبنا

خاصیت (واحد)	مقدار				
انرژی ضربه (*J*)	۶۸ (در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد)				
استحکام تسلیم (*psi*)	۸۶۷۸۷				
استحکام کششی (*psi*)	۱۰۶۱۱۲				
سختی (ویکرز)	*Base* ۱۹۷	*HAZ* ۲۰۵	*Weld* ۱۸۰	*HAZ* ۲۱۰	*Base* ۱۹۴

جدول(۶): اثر تغییر شدت جریان جوشکاری بر خواص کششی و ضربه ای

نمونه	آمپراژ (*Amp.*)	*Y.S.* (*psi*)	*U.T.S.* (*psi*)	انرژی ضربه (*J*)
فلز پایه	--	۸۸۹۸۵	۹۹۷۱۴	۲۳۸
فلز جوش	۴۵۰	۸۰۳۶۶	۹۳۰۷۷	۱۸۶
فلز جوش	۵۵۰	۸۴۸۶۳	۱۰۱۵۷۰	۱۲۹
فلز جوش مبنا	۶۵۰	۸۶۷۸۷	۱۰۶۱۱۲	۶۸
فلز جوش	۷۵۰	۸۶۹۳۱	۱۰۰۸۷۹	۵۰
فلز جوش	۸۵۰	۷۲۶۴۰	۹۳۴۸۰	۴۱

۳-۲- تأثیر ولتاژ:

برای بررسی اثر تغییرات ولتاژ روی ناحیه حرارت دیده جوش زیرپودری چهار نمونه با ولتاژهای متفاوت و تحت سرعت و جریان ثابت تهیه و تست شد. سرعت جوشکاری ۵۲/۵ سانتی متر بر دقیقه و جریان جوشکاری ۶۵۰ آمپر در نظر گرفته شد. نتایج در جدول۷ ارائه شده اند. همان طور که مشاهده می گردد با افزایش ولتاژ، علی رغم افزایش حرارت ورودی، به دلیل کاهش تمرکز حرارتی ناشی از افزایش پهنای قوس الکتریکی و کاهش گُرده جوش و در نتیجه ضعف اتصال، منجر به افت استحکام تسلیم و استحکام نهایی در منطقه جوش می شود. همچنین افزایش مقدار ولتاژ باعث کاهش چقرمگی ناحیه حرارت دیده جوش می شود. نکته قابل تأمل در مقایسه نتایج آزمون ضربه حاصل از نمونه های تغییرات جریان و ولتاژ آن است که در نمونه های آزمایش افزایش ولتاژ نسبت به نمونه های افزایش جریان، میزان کاهش چقرمگی با شیب بیشتری دچار افت می شود. این مطلب نشان دهنده آن است که تأثیر تغییرات پارامتر ولتاژ نسبت به جریان بر روی میزان استحکام ضربه به مراتب بیشتر است. این در حالی است که هر دوی این پارامترها تأثیری یکسان بر حرارت ورودی محاسبه شده در جوشکاری دارند.

جدول(۷): اثر تأثیر تغییر ولتاژ جوشکاری بر خواص کششی و ضربه ای

نمونه	ولتاژ (*Volt*)	*Y.S.* (*psi*)	*U.T.S.* (*psi*)	انرژی ضربه (*J*)
فلز پایه	--	۸۸۹۸۵	۹۹۷۱۴	۲۳۸
فلز جوش	۳۳	۷۸۹۰۴	۹۳۱۸۲	۱۰۸
فلز جوش	۳۶	۸۲۳۱۹	۹۹۱۵۴	۹۲
فلز جوش مبنا	۳۹	۸۶۷۸۷	۱۰۶۱۱۲	۶۸
فلز جوش	۴۲	۷۶۲۷۸	۹۱۵۵۴	۴۹
فلز جوش	۴۵	۶۹۸۵۰	۹۲۱۴۸	۴۲

۳-۳- تأثیر سرعت جوشکاری:

برای بررسی اثر تغییرات سرعت جوشکاری بر روی ناحیه حرارت دیده جوش زیرپودری، چهار نمونه با سرعت های متفاوت و تحت آمپر و ولتاژ ثابت تهیه گردید. جریان جوشکاری ۶۵۰ آمپر و ولتاژ جوشکاری ۳۹ ولت در نظر گرفته شد. نتایج

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.2.7]

در جدول۸ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود تغییرات استحکام متاثر از تغییرات سرعت به نتیجه معنی داری منتج نگردیده است. ولی با افزایش سرعت جوشکاری (بیش از ۵۲٫۵ سانتی متر بر دقیقه) و درنتیجه آن کاهش حرارت ورودی، مقدار انرژی ضربه و در نتیجه میزان چقرمگی ناحیه حرارت دیده افزایش می یابد. دلیل این افزایش، می تواند کاهش حرارت ورودی و در نتیجه آن کاهش اندازه دانه در ناحیه حرارت دیده باشد.

جدول(۸): تأثیر تغییر سرعت جوشکاری بر خواص کششی و ضربه ای

نمونه	سرعت *(cm/min)*	*Y.S.* *(psi)*	*U.T.S.* *(psi)*	انرژی ضربه *(J)*
فلز پایه	--	۸۸۹۸۵	۹۹۷۱۴	۲۳۸
فلز جوش	۴۲٫۵	۸۱۴۷۲	۹۹۲۱۳	۵۹
فلز جوش	۴۷٫۵	۷۱۴۸۸	۹۱۳۳۸	۶۵
فلز جوش مبنا	۵۲٫۵	۸۶۷۸۷	۱۰۶۱۱۲	۶۸
فلز جوش	۵۷٫۵	۸۱۷۵۷	۹۸۴۵۹	۹۸
فلز جوش	۶۲٫۵	۹۰۲۴۳	۹۹۷۵۰	۱۰۵

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری زیر پودری بر خواص کششی و ضربه ای فولاد API X80 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت زیر استنتاج گردید:

۱- افزایش جریان موجب کاهش چقرمگی ناحیه حرارت دیده شده (HAZ) می شود.

۲- افزایش مقدار ولتاژ موجب افزایش پهنای ناحیه حرارت دیده و کاهش استحکام و چقرمگی آن نسبت به فلز پایه می گردد.

۳- افزایش سرعت جوشکاری و در نتیجه کاهش انرژی ورودی به محل اتصال موجب افزایش چقرمگی می گردد. افزایش سرعت جوشکاری نسبت به کاهش دو پارامتر دیگر، تأثیر مثبت بیشتری بر روی چقرمگی ناحیه حرارت دیده دارد.

مراجع:

[1] H.B. Cary, S. Helzer, Modern Welding Technology, Prentice Hall, New Jersey, 2004.

[2] Y.L. Matrosov, O.A. Bagmet, A.O. Nosochenko, Development of Modern Heavy Plate Steels for Pipelines, Materials Science Forum, 539-543 (2007) 4756-4761.

[3]H. Mohrbacher, Pipe Steel Development, Niobium, Science & Technology: proceedings of the International Symposium Niobium held in Orlando, Florida, U.S.A., 2001.

[4] Y.Shi, D. Chen, Y. Lei, X. Li, HAZ microstructure simulation in welding of a ultra fine grain steel, Computational Materials Science, 31 (2004) 379-388.

[5] S.Y. Nastich, Y.D. Morozov, L.I. Efron, M.Y. Matrosov, Steels with ferrite-bainite microstructure with improved weldability and cold resistance for main pipelines, Materials Science Forum, 539-543 (2007) 4744-4749.

[6] W. Chen, D. Ferguson, G.Y. Li, L.G. Ao, C.M. Wang, J. Zhang, H.X. Ma, Study of ultrafine grain structure of a pipeline steel, Materials Science Forum, 539-543 (2007) 2910-2915.

[7] L .Zheng, S. Gao, Microstructure and properties of pipeline steel with acicular ferrite, Materials Science Forum, 539-543 (2007) 4750-4755.

[8] Y. Yang, L. Shi, Zh. Xu, H. Lu, X. Chen, X. Wang, Fracture toughness of the materials in welded joint of X80 pipeline steel, Engineering Fracture Mechanics, 148 (2015) 337-349.

[9] X.D. Huo, F. Dong, F.L. Li, Study on Microstructure and Properties of X80 Pipeline Steel, Advanced Materials Research, 941-944 (2014) 138-141.

[10] Y.P. Zeng, S.H. Li, K. Tong, Micro-Behavior of Inclusions in X80 Pipeline Steel under Tensile Loading, Applied Mechanics and Materials, 248 (2013) 224-230.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.4.2.7]