



تأثیر حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L

مهدی کریمی منش¹، ایرج ستاری فر²، حمید امیدوار^{3*}

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 3- استادیار، مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 * تهران، 4413-15875، omidvar@aut.ac.ir

چکیده

کاربرد در دماهای پایین موجب تردی بسیاری از سازه‌ها می‌شود که در نتیجه، انتخاب پارامترهای جوش کاری مناسب برای حفظ چقرمگی سازه جوشی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای جوش کاری حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور فرایند جوش کاری قوسی الکتروود تنگستن با محافظت گاز، بر ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L به ضخامت 5 میلی‌متر انجام شد و با تغییر در پارامترهای حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، تأثیر پارامترهای یادشده بر ریزساختار، میزان فریت فلز جوش و انرژی ضربه شاری دما پایین نمونه‌ها بررسی شد. حرارت ورودی قوس از 1/04 تا 3/23 کیلووات و سرعت جوش کاری از 30 تا 240 میلی‌متر بر دقیقه تغییر کرد. مشاهده شد که افزایش حرارت ورودی قوس از طرفی می‌تواند سبب کاهش فریت در فلز جوش شود که این سبب بهبود مقاومت ضربه در دماهای پایین می‌شود، ولی از سوی دیگر زمان انجماد را افزایش داده که سبب درشت شدن ساختارهای دندریتی در فلز جوش می‌شود و می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت ضربه داشته باشد. تغییرات سرعت جوش کاری نیز می‌تواند بر میزان فریت و ریزساختار و در نتیجه بر مقاومت ضربه تأثیر داشته باشد. در نهایت با بررسی‌ها و انجام تست‌های متعدد، خواص ضربه بهینه در دمای پایین با حرارت ورودی قوس 1/67 کیلووات و سرعت جوش کاری 120 میلی‌متر بر دقیقه به دست آمد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 08 مهر 1393
 پذیرش: 26 آبان 1393
 ارائه در سایت: 13 دی 1393
 کلید واژگان:
 حرارت ورودی قوس
 سرعت جوش کاری
 مقاومت ضربه دما پایین
 فولاد زنگ‌نزن آستنیتی
 جوش کاری قوس الکتروود تنگستن با محافظت گاز

Effects of Arc Heat Input and Welding Speed on the Cryogenic Impact Strength of Type 304L Austenitic Stainless Steel Weld Metal

Mahdi Karimi Manesh¹, Iraj Sattari Far¹, Hamid Omidvar^{2*}

- 1- Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran.
 2- Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran.
 * P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, omidvar@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 30 September 2014
 Accepted 17 November 2014
 Available Online 03 January 2015

Keywords:
 Arc Heat Input
 Welding Speed
 Cryogenic Impact Strength
 Austenitic Stainless Steel
 Gas Tungsten Arc Welding

ABSTRACT

Usage in low temperatures causes embrittlement of many structures; consequently, selection of welding parameters for maintaining the toughness of welded structures is crucial. In this paper, effects of arc heat input and welding speed on the cryogenic impact strength of type 304L austenitic stainless steel weld metal are investigated. For this purpose, 304L austenitic stainless steel sheet with 5 mm thickness was welded with gas tungsten arc welding process and by changing the parameters of arc heat input and welding speed, the effect of these parameters on the microstructure, weld metal ferrite content and low temperature, charpy impact energy of samples was determined. The arc heat input range applied was between 1.04 and 3.23 kW, and the welding speed varied between 30 and 240 mm/min. It was found that increasing arc heat input can reduce weld metal ferrite content, which improves low temperature impact strength, but on the other hand, slow cooling due to increasing heat input results in coarser dendritic structures in the weld metal, and can adversely affect impact strength. Changes of welding speed can also affect the amount of ferrite and microstructure and thus have an influence on the impact strength. Finally, having carried out the numerous tests, optimum impact properties at low temperature were obtained at 1.67 kW arc heat input and 120 mm/min welding speed.

Please cite this article using:

M. Karimi Manesh, I. Sattari Far, H. Omidvar, Effects of Arc Heat Input and Welding Speed on the Cryogenic Impact Strength of Type 304L Austenitic Stainless Steel Weld Metal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 205-213, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به‌صورت گسترده در کاربردهای دما پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فولادها برای کاربردهایی از جمله حمل و نقل و نگهداری گازهای مایع، تجهیزات مربوط به میعان و تقطیر گازها و دیگر مایعاتی که نیاز به مقاومت خوردگی دارند، برای نمونه در نگهداری غذا و دیگر محصولاتی که آلودگی محصول باید کمینه باشد، بسیار مناسب است. نوع 304L یکی از انواعی است که به‌صورت گسترده برای کاربردهای دما پایین استفاده شده و به‌خوبی قابلیت جوش کاری با فرایند قوسی الکتروود تنگستن با محافظت گاز را داراست. زمانی که دما کاهش می‌یابد استحکام فولادهای آستنیتی افزایش یافته، در حالی که چقرمگی همچنان در سطوح بالا باقی می‌ماند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به‌دلیل ساختار مکعبی با مرکز وجوه پر¹، دمای انتقال از نرمی به تردی نداشته؛ بنابراین در دماهای پایین شکل‌پذیری خود را حفظ می‌کنند [1]. کاربرد در دماهای پایین موجب تردی بسیاری از سازه‌ها شده و از آن‌جا که خواص ضربه و چقرمگی مهم‌ترین فاکتور در کاربردهای دما پایین است؛ بنابراین نیاز است که تأثیر پارامترهای جوش کاری بر این خواص در دمای پایین بررسی شود. استانداردهای مختلف مقاومت ضربه را براساس کمینه انبساط عرضی² برابر 0/38 میلی‌متر، یا براساس کمینه انرژی ضربه شاری برای برابر با 32 ژول، در کاربردهای دما پایین تا دمای 196°C- در نظر گرفته‌اند [2].

گوریسانکار و همکارانش [3] که تأثیر حرارت ورودی و تعداد پاس جوش را بر ساختار و خواص مکانیکی فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L در فرایند جوش کاری زیرپوردی بررسی کردند، گزارش کردند که تعداد پاس‌های کمتر با حرارت ورودی بیشتر در هر پاس، سبب بهبود خواص ضربه در فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L شده است. ایشان این تغییرات را به ترکیب شیمیایی، میزان فریت، اندازه دانه‌ها و تغییر شکل پلاستیک نسبت دادند.

در این مقاله نیز تأثیر پارامترهای جوش کاری حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L مورد توجه قرار گرفته که برای بررسی نحوه تأثیر پارامترهای جوش کاری یادشده بر خواص ضربه، اثر این پارامترها بر ریزساختار و شکل و میزان فریت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از عوامل مهم در ساختار فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی که نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت ضربه در دماهای پایین دارد، میزان فاز فریت در ریزساختار است. همان‌طور که در شکل 1 به‌طور کامل روشن است دلتا فریت تأثیر زیادی بر انرژی ضربه و انبساط عرضی فلزات جوش آستنیتی دارد. این فاز به‌دلیل ساختار مکعبی مرکز پر³ خود سبب تردی در دماهای پایین شده و در نتیجه مقادیر فریت باید تا آن‌جا که ممکن است پایین نگه داشته شود تا چقرمگی مطلوبی را در دماهای پایین تضمین کند. از سویی مقادیر کمی از دلتا فریت برای جلوگیری از ترک گرم ضروری است که تحقیقات کمینه میزان عدد فریت⁴ را در فلز جوش ضروری دانسته‌اند [4]. حرارت ورودی قوس، سرعت جوش کاری و نرخ انجماد می‌تواند بر میزان فاز فریت در فلز جوش تأثیر داشته باشد. گوریسانکار و همکارانش [3] گزارش کرده‌اند که با افزایش حرارت ورودی و کاهش تعداد پاس، میزان فریت در پاس‌های ریشه کاهش یافته که آن را به افزایش اختلاط با فلز پایه

نسبت دادند. از طرف دیگر فولس و بلیک [5] گزارش کرده‌اند که اگر از تأثیر درجه رقت و اختلاط با فلز پایه جلوگیری شود، تغییرات حرارت ورودی تأثیر چندانی بر میزان فریت در فلز جوش ندارد.

رمضان ایلماز و همکارانش [6] در بررسی‌هایشان روی خواص مکانیکی فولادهای آستنیتی به این نکته رسیدند که نرخ‌های انجماد سریع، بازیابی آستنیت را کاهش داده و در نتیجه سبب افزایش فریت باقی‌مانده در فلز جوش شده که این اتفاق تأثیر منفی بر نرمی، چقرمگی و مقاومت خوردگی داشته است. همچنین ایشان نشان دادند که نرخ‌های انجماد کندتر که به‌واسطه سرعت‌های جوش کاری پایین و حرارت ورودی بالاتر ایجاد می‌شوند، بازیابی آستنیت را بهبود داده که آن را مفید ارزیابی کرده، ولی از جهتی نیز سبب درشت شدن ساختار فریت شده که یک فاکتور منفی برای خواص چقرمگی است.

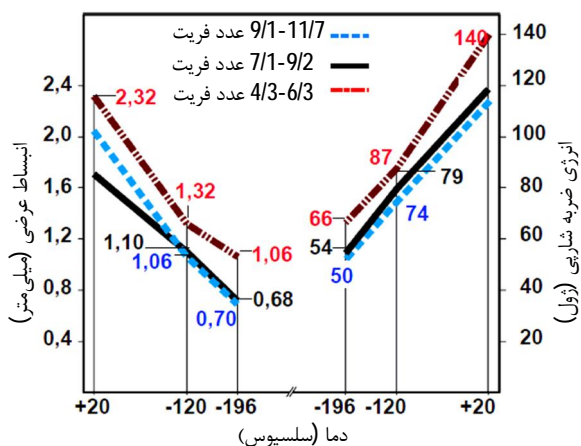
حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری همچنین می‌تواند بر ساختار و شکل فاز فریت نیز تأثیر داشته باشد. رید و همکارانش [7] تأثیر حرارت ورودی و نرخ سرد شدن را بر شکل فریت‌ها و خواص ضربه در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L در دماهای پایین بررسی کردند. ایشان گزارش کردند که با کاهش نرخ سرد شدن به‌واسطه حرارت‌های ورودی بالاتر، فضای فریت‌های دندریتی و اندازه موثر دانه در زمینه آستنیت افزایش یافته و در نتیجه خواص ضربه دما پایین کاهش یافته است.

در تمام منابع فاز فریت در فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، برای مقاومت ضربه مضر شناخته شده؛ بنابراین برای کاربردهای دما پایین، باید تا آن‌جا که امکان دارد این فاز در فلز جوش کاهش یابد.

2- مواد و طراحی آزمایش

ورق مورد استفاده از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی کروم نیکل‌دار بوده که در استاندارد ASME [8] در گروه SA240 قرار گرفته که به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L شناخته می‌شود. جداول 1 و 2 به‌ترتیب، ترکیب شیمیایی و خواص کششی به‌دست آمده از آزمایش کوانتومتری و تست کشش انجام شده بر نمونه ورق یادشده را نشان می‌دهد.

با تغییر در پارامترهای حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، هفت نمونه تست به‌دست آمد. تغییر در حرارت ورودی قوس با تغییر در آمپراژ، و تغییر در سرعت جوش کاری با تغییر سرعت پیشروی قوس با کنترل زمان پیشروی الکتروود در طول جوش در فرایند دستی قوسی الکتروود تنگستن



شکل 1 تأثیر فریت بر خواص ضربه و انبساط عرضی در دماهای پایین [4]

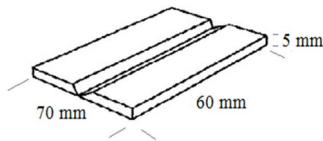
- 1- Face Centered Cubic (FCC)
- 2- Lateral expansion
- 3- Body Centered Cubic (BCC)
- 4- Ferrite Number (FN)

بیشینه باید کمتر باشد، زیرا سرعت سرد شدن آرام در محدوده رسوب گذاری کاربردها ممکن است خطرناک باشد [9]. از این رو در این پژوهش نمونه ها بدون پیش گرم، با دمای اولیه جوش کاری 25°C و با کنترل دمای بین پاسی تقریباً 150°C جوش کاری شده اند.

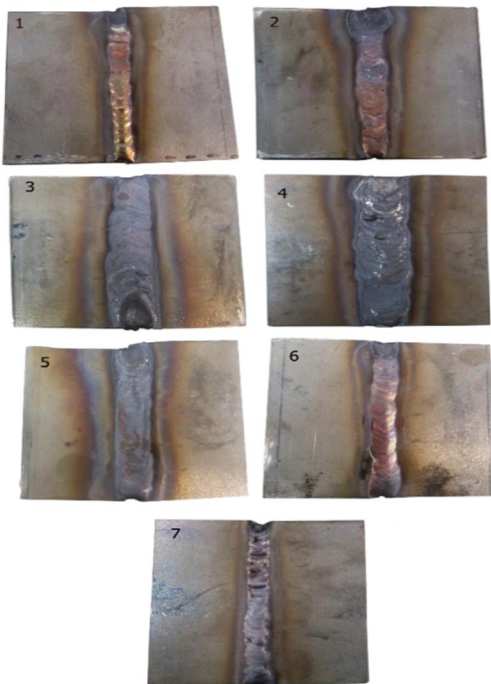
عملیات پس گرم در این فولادها که مقاومت بالایی در برابر شکست ترد دارند، به ندرت مورد نیاز است و در برخی مواقع برای کاهش خطر ترک خوردگی تنش و کاهش تنش های باقی مانده، عملیات حرارتی تنش زدایی انجام می گیرد. در صورتی که از این عملیات حرارتی استفاده شود، بایستی سرد شدن به سرعت در آب انجام شود، زیرا در صورت سرد شدن آرام، امکان رسوب کاربیدها وجود دارد [10]. استانداردها در برخی موارد نه تنها عملیات پس گرم را برای این فولادها ضروری نمی دانند، بلکه آن را ممنوع نیز کرده اند. در این پژوهش نمونه ها بدون عملیات پس گرم جوش کاری شده اند.

منابع علمی [11، 1] عملیات حرارتی پس گرم آنیل در محدوده 1050°C و سرد کردن سریع در آب را، سبب تجزیه فریت و بهبود خواص ضربه در دماهای پایین دانسته اند؛ بنابراین پس از تعیین پارامترهای جوش کاری بهینه (از نظر مقاومت ضربه دما پایین) حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، یک نمونه هم با انجام عملیات پس گرم (با مشخصات جوش کاری تدوین شده) تهیه و تست های ضربه بر آن انجام گرفته شده است.

در تمام نمونه ها گاز محافظ، گاز آرگون با خلوص 99/99 درصد با دبی 14 لیتر بر دقیقه و با تعداد 3 پاس جوش در نظر گرفته شد. جدول 3 نمونه های در نظر گرفته شده و پارامترهای جوش کاری مربوطه را و شکل 3 تصویر این نمونه ها را پس از جوش کاری نشان می دهد.



شکل 2 ابعاد نمونه های جوش داده شده



شکل 3 تصویر نمونه های جوش (با توجه به جدول 3) پس از جوش کاری

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه فولاد نوع 304L

عصر	درصد وزنی %
کربن	0/0215
سیلیسیم	0/63
فسفر	0/0278
گوگرد	<0/00020
منگنز	1/04
نیکل	8/39
کروم	18/61
مولیبدن	0/0213
مس	0/0561
نیوبیوم	0/0075
وانادیم	0/12
آلومینیوم	0/009
سرب	0/0019
کبالت	0/334
کلسیم	0/001
آهن	70/71

جدول 2 خواص کششی فلز پایه فولاد نوع 304L

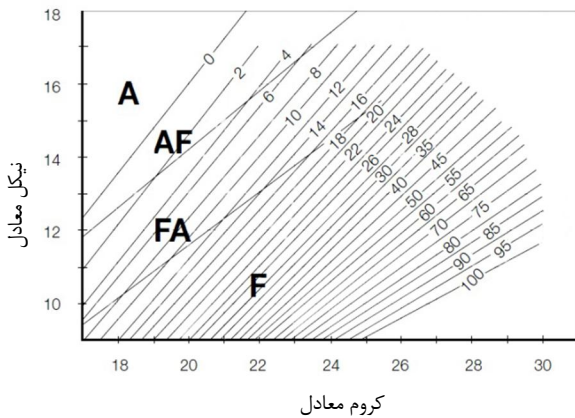
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	درصد تغییر طول %
375	590	48

حاصل شد. ولتاژ دستگاه با اندازه گیری توسط دستگاه ولت متر انجام گرفت. حرارت ورودی قوس از ضرب آمپراژ و ولتاژ به دست می آید.

1-2- فرایند جوش کاری

جوش کاری توسط فرایند قوسی الکتروود تنگستن توریم دار با محافظت گاز آرگون و در موقعیت جوش کاری تخت روی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L انجام شده است. پخ ایجاد شده به صورت ۷ شکل با زاویه 30 درجه، تقریباً 1 میلی متر ریشه، در هر ورق بوده که برای جلوگیری از اعوجاج ورق ها توسط گیره مقید شدند. نوع جریان و قطبیت جوش کاری با توجه به راهنماها جریان مستقیم با قطبیت منفی، الکتروود تنگستن از نوع توریم دار با قطر 2 میلی متر، با استفاده از فلز پرکننده ER308L که فلز پرکننده معمول برای جوش کاری فولادهای نوع 304L بوده و دارای مشخصه SFA-5.9 در استاندارد ASME است، با قطرهای 2 و 3 میلی متر انتخاب شدند. با تغییر در پارامترهای حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، هفت نمونه تست جوش به ابعاد 70 در 60 و ضخامت 5 میلی متر، به دست آمد. شکل 2 ابعاد نمونه های جوش داده شده را نشان می دهد.

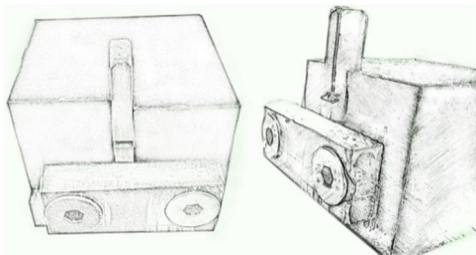
دماهای پیش گرم بالا که سبب افزایش زمان انجماد می شود، می تواند اثرات نامطلوبی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن آستنیتی داشته باشد و از طرفی فولادهای زنگ نزن آستنیتی مستعد ترک هیدروژنی نبوده و عملیات پیش گرم به جز در قطعات ضخیم برای کاهش تنش های پسماند و اعوجاجات، به ندرت در این فولادها مورد نیاز است. دمای پیش گرم و بین پاسی بالا تأثیر بسیار اندکی بر استحاله فریت به آستنیت دارد، زیرا این استحاله در دماهای بسیار بالا رخ می دهد، جایی که کنترل دمای پیش گرم و بین پاسی تأثیر اندکی بر سرعت سرد شدن دارد. در مواردی که ایجاد رسوبات کاربیدی موجب حساس شدن فلز می شوند، دمای بین پاسی از یک میزان



شکل 4 دیگرام ساختاری WRC-1992 [9]

جدول 3 نمونه‌های ایجاد شده با تغییر در پارامترهای جوش کاری

نمونه	آمپراژ [A]	ولتاژ [V]	حرارت ورودی قوس [kW]	سرعت جوش کاری [mm/min]
1	80	13	1/04	60
2	115	14	1/61	60
3	150	15	2/25	60
4	190	17	3/23	60
5	115	14	1/61	30
6	115	14	1/61	120
7	115	14	1/61	240



شکل 5 شماتیک قید ساخته شده برای ایجاد شیار روی نمونه‌های ضربه

برای تست‌های دما پایین، دمای نمونه‌ها باید پیش از تست به دمای پایین مطلوب رسیده باشد. دمای پایین با قرار دادن نمونه‌ها در ظرف نیتروژن مایع به مدت 25 دقیقه و سپس قرار دادن سریع قطعه در دستگاه تست ضربه حاصل شد. با اندازه‌گیری دما که توسط ترموکوپل انجام شد، دمای نیتروژن مایع -189°C و دمای اندازه‌گیری شده روی نمونه پس از خارج کردن از نیتروژن مایع و قرار دادن آن‌ها در دستگاه تست ضربه، پس از 5، 10 و 15 ثانیه به ترتیب -170°C ، -181°C و -159°C مشاهده شد. ترموکوپل استفاده شده، مدل TM-946 ساخت شرکت لوترون بوده که قابلیت اندازه‌گیری دما بین $-199/9^{\circ}\text{C}$ تا 1370°C را توسط چهار کانال داراست. با توجه به زمان انجام تست از لحظه خارج کردن نمونه از نیتروژن مایع تا ضربه توسط دستگاه، دمای تست نمونه‌ها تقریباً -170°C به دست آمد. شایان یاد است که پیش از انجام آزمایش، آونگ بدون وجود نمونه ره‌اشده و میزان انرژی جذب شده روی صفر تنظیم شد تا برای انجام آزمایش روی نمونه‌ها، دستگاه کالیبره شود.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج متالوگرافی

ترکیب شیمیایی و فرآیندهای ترمودینامیکی انجام گرفته بر فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L به گونه‌ای است که ریزساختار غالب آن آستنیتی باشد و بسته به نسبت عناصر فریت‌زا به آستنیت‌زا، ریزساختار ریختگی یا کار شده می‌تواند کاملاً آستنیتی یا مخلوطی از آستنیت و فریت باشد. شکل 6 ریزساختار فلز جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه را در نمونه 6 (با توجه به جدول 3) نشان می‌دهد که در آن، مرز ناحیه فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت به واسطه اندکی سوختگی کناره جوش، به خوبی مشخص است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دندریته‌ها از مرز به سمت داخل ناحیه فلز جوش انجماد پیدا کرده و ساختار دندریته با فریت اسکلتی را ایجاد کرده است.

2-2- آماده‌سازی و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

با توجه به استاندارد، برش کاری و عملیات جداسازی نمونه‌ها باید کم‌ترین تأثیر را بر خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌ها داشته باشد؛ بنابراین فرایندی که برای جداسازی نمونه‌ها از قطعات جوش خورده و تهیه نمونه‌ها استفاده شد، عبارت بود از برش قطعات توسط اره لنگ و ماشین کاری (دستگاه فرز) آن برای دستیابی به ابعاد نهایی.

برای متالوگرافی نمونه‌ها، پس از ماشین کاری، پرداخت و پولیش سطوح، با استفاده از محلول اچ $3\text{HCl} + 1\text{HNO}_3$ و قرار دادن در محلول به مدت تقریبی 10 ثانیه، نمونه‌ها اچ شده و متالوگرافی نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری انجام گرفت.

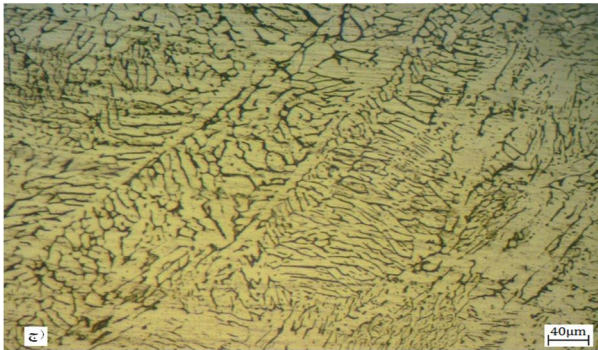
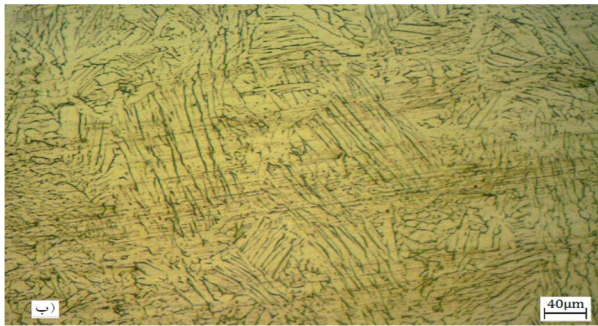
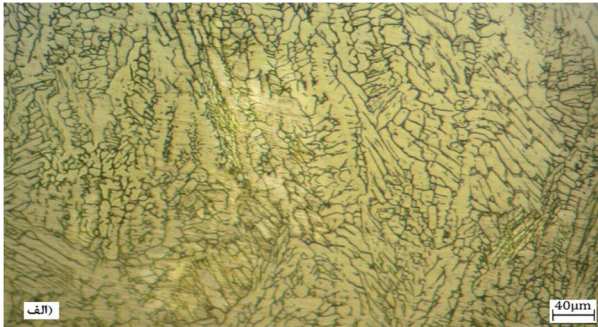
3-2- تعیین فریت فلز جوش

تعیین میزان فریت فلز جوش با استفاده از دو روش پیش‌بینی میزان فریت با استفاده از دیگرام ساختاری و روش اندازه‌گیری با دستگاه، انجام شده است. پس از تعیین ترکیب شیمیایی فلز جوش برخی از نمونه‌ها با آزمایش کوانتومتری، با استفاده از دیگرام WRC-1992 مقدار فریت فلز جوش آن‌ها به صورت عدد فریت به دست آمد. در حال حاضر، دیگرام WRC-1992، یکی از دقیق‌ترین دیگرام‌های موجود جهت پیش‌بینی عدد فریت در فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی است [9]. این دیگرام در شکل 4 نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری فریت از دستگاه فریت اسکوپ مدل FMP30 استفاده شد، که مقدار فریت را با دقت بالایی، به صورت درصد حجمی فریت نشان می‌دهد.

4-2- آزمون ضربه شاریپی

کمیت اصلی که در آزمون ضربه اندازه‌گیری می‌شود، انرژی جذب شده در شکست نمونه است که هرچه ماده چقرمه‌تر باشد انرژی جذب شده توسط آن بالاتر است. نمونه‌های ضربه با توجه به استاندارد ASTM [12] با ابعاد 55 در 10 و ضخامت 5 میلی‌متر تهیه شدند که در نمونه‌های ضربه فلز جوش، شیارها در وسط فلز جوش ایجاد شدند. برای تکرارپذیری تست، از هر نمونه جوشی دو نمونه ضربه با ابعاد بیان شده توسط اره لنگ و فرز کاری تهیه شدند. برای یکسان‌سازی شرایط و به کمینه رساندن خطاهای ساخت و با توجه به اهمیت مکان و عمق شیار، برای ایجاد شیار در نمونه‌های ضربه یک قید ساخته شد که شماتیک قید ساخته شده در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 7 ریزساختار فلز جوش با سرعت جوش کاری ثابت 60 میلی‌متر بر دقیقه، الف- نمونه 1 (حرارت ورودی قوس 1/04 کیلووات)، ب- نمونه 2 (حرارت ورودی قوس 1/61 کیلووات)، ج) نمونه 3 (حرارت ورودی قوس 2/25 کیلووات)

پارامترهای مناسبی از جهت مقاومت ضربه باشند.

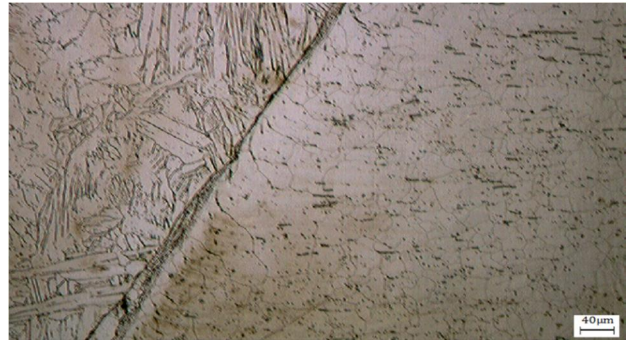
3-2- تعیین ترکیب شیمیایی و میزان فریت فلز جوش

آزمایش کوانتومتری برای تعیین ترکیب شیمیایی فلز جوش در نمونه‌های مختلف انجام گرفت که نتایج آن برای نمونه‌های جوش 1، 2، 3 و 5 در جدول 4 آمده است. مقادیر نیکل و کروم معادل توسط رابطه‌های (1، 2) که مربوط به دیاگرام ساختاری WRC-1992 [9] است، به دست آمد. میزان فریت (عدد فریت) در فلزات جوش نمونه‌ها توسط این دیاگرام تعیین شد.

$$Ni_{eq} = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0.25\%Cu \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 0.7\%Nb \quad (2)$$

جدول 5 نتایج تعیین فریت در ریشه و روی سطح فلزات جوش نمونه‌های 1، 2، 3، 5 و 6 را که توسط دستگاه فریت‌سنج مغناطیسی اندازه‌گیری شده را به صورت درصد فریت نشان می‌دهد. این آزمایش دو مرتبه از هر نقطه گرفته شد که میانگین این دو اندازه‌گیری در جدول یاد شده است. لازم به یاد است که رابطه مشخصی برای تبدیل عدد فریت به درصد فریت و برعکس وجود ندارد. در این پژوهش، این تبدیل به صورت تقریبی با رابطه (3) که توسط AWS [13] پیشنهاد شده، انجام شده است. Fe در فرمول درصد وزنی آهن موجود در ترکیب است.



شکل 6 ریزساختار فلز جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه

همچنین در قسمت‌هایی از شکل در ناحیه فلز جوش، فریت پرشکل دیده می‌شود.

با مقایسه اندازه دانه‌ها در ناحیه نزدیک به مرز فلز جوش (ناحیه متأثر از حرارت) و ناحیه دور از مرز (فلز پایه)، در ناحیه متأثر از حرارت درشت‌دانه‌گی دیده می‌شود که این به دلیل چرخه‌های حرارتی مکرر در پاس‌های متعدد جوش کاری است. همچنین در قسمتی از ناحیه متأثر از حرارت در امتداد مرزدانه‌ها، فریت تشکیل شده است که می‌تواند سبب جلوگیری از رشد دانه‌ها و کاهش خطر ترک گرم شود.

3-1-1- مقایسه ریزساختار نمونه‌ها با تغییر حرارت ورودی قوس

شکل‌های 7 الف، ب و ج که به ترتیب مربوط به ریزساختار ناحیه فلز جوش در نمونه‌های 1، 2 و 3 هستند و فرایند جوش کاری آن‌ها به ترتیب با حرارت‌های ورودی قوس 1/04، 1/61 و 2/25 کیلووات و سرعت جوش کاری ثابت 60 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده، نشان می‌دهند که با افزایش حرارت ورودی قوس، فاصله بازوهای دندردیتی بیشتر شده و دندردیت‌ها درشت‌تر شده‌اند، زیرا با افزایش حرارت ورودی و در نتیجه افزایش زمان انجماد، فرصت برای رشد دندردیت‌ها و دانه‌های آستنیتی بیشتر می‌شود.

ساختار فریت در این نمونه‌ها بیشتر به صورت فریت اسکلتی بوده که فریت‌های باقی‌مانده در بازوهای دندردیتی قرار گرفته‌اند و در برخی نواحی که تجمع فریت‌ها بیشتر شده، فریت پر شکل نیز ایجاد شده است. افزایش فاصله بازوهای دندردیتی و رشد دندردیت‌ها می‌تواند سبب کاهش چقرمگی شود، بنابراین افزایش حرارت ورودی قوس و زمان انجماد از لحاظ ریزساختار، یک عامل منفی برای خواص ضربه دما پایین است.

3-1-2- مقایسه ریزساختار نمونه‌ها با تغییر سرعت جوش کاری

شکل‌های 8 الف، 7-ب و 8-ب به ترتیب مربوط به ریزساختار ناحیه فلز جوش در نمونه‌های 5، 2 و 6 هستند، که فرایند جوش کاری در آن‌ها به ترتیب با سرعت‌های 30، 60 و 120 میلی‌متر بر دقیقه و حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات انجام شده است. ساختار فریت در این نمونه‌ها نیز اغلب به صورت فریت اسکلتی بوده و در برخی نواحی فریت‌های پرشکل نیز دیده شده است. با مقایسه این شکل‌ها نیز نتیجه می‌شود که با کاهش سرعت جوش کاری و در نتیجه افزایش زمان انجماد، فاصله بازوهای دندردیتی بیشتر شده و دندردیت‌ها درشت‌تر شده‌اند. همان‌طور که در ریزساختارها مشخص است، ریزساختار نمونه 6، ریزترین و ریزساختار نمونه 3 درشت‌ترین ریزساختار ایجاد شده در بین نمونه‌های نمایش داده شده است؛ بنابراین سرعت‌های جوش کاری در گستره 120 میلی‌متر و بالاتر و حرارت‌های ورودی قوس کمتر از 2/25 کیلووات، ساختارهای ریزتری ایجاد کرده و می‌توانند

جدول 4 ترکیب شیمیایی و عدد فریت فلز جوش نمونه‌های جوش 1، 2، 3 و 5

نمونه 5	نمونه 3	نمونه 2	نمونه 1	عنصر
درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	
0/0068	0/012	0/014	0/0319	کربن
0/547	0/562	0/555	0/518	سیلیسیم
0/0241	0/024	0/024	0/0323	فسفر
<0/00020	<0/00020	<0/00020	0/002	گوگرد
1/25	1/25	1/24	5/74	منگنز
8/88	8/85	8/75	5/52	نیکل
18/68	18/80	18/91	17/52	کروم
0/0262	0/0273	0/0248	0/0645	مولیبدن
0/696	0/854	0/936	1/33	مس
0/0088	0/0081	0/0084	0/0111	نیوبیوم
0/0926	0/097	0/0953	0/105	وانادیم
0/007	0/008	0/0078	0/00034	آلومینیوم
0/0031	0/0016	0/0014	0/0028	سرب
0/241	0/263	0/257	0/0969	کبالت
0/056	0/058	0/059	0/062	نیتروژن
10/41	10/64	10/65	8/21	نیکل معادل
18/71	18/83	18/94	17/59	کروم معادل
9-10	9-10	9-10	14-15	عدد فریت
(8)	(8)	(8)	(10)	(درصد فریت)

جدول 5 درصد فریت فلز جوش نمونه‌ها توسط دستگاه فریت‌سنج مغناطیسی

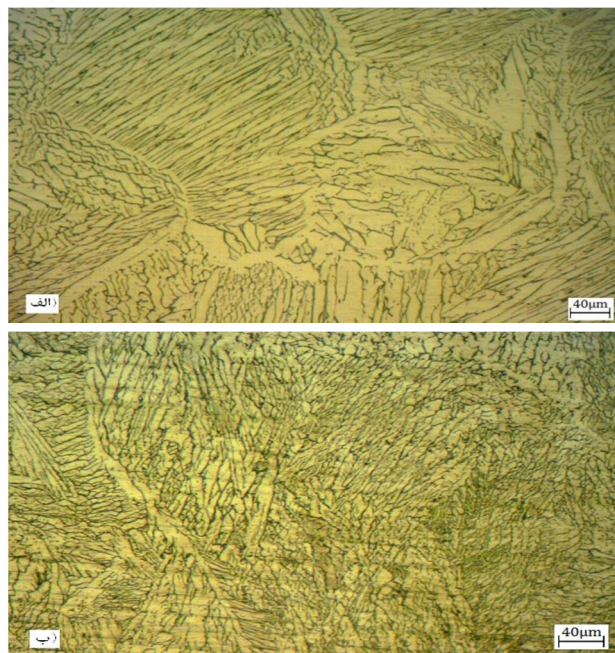
درصد فریت (عدد فریت)	ریشه جوش	سطح جوش	نمونه
درصد فریت (عدد فریت)	ریشه جوش	سطح جوش	
	9/1 (12/2)	10 (13/6)	نمونه 1
	8/5 (11/4)	9/1 (12/2)	نمونه 2
	8/3 (11/1)	9/2 (12/3)	نمونه 3
	8/4 (11/3)	9/1 (12/2)	نمونه 5
	8/6 (11/5)	9/9 (13/5)	نمونه 6

در نهایت با مقایسه مقادیر فریت در نمونه‌های 1، 2 و 3 که حرارت ورودی قوس در آن‌ها به ترتیب افزایش یافته و همچنین مقایسه مقادیر فریت در نمونه‌های 5، 2 و 6 که سرعت جوش کاری در آن‌ها به ترتیب افزایش یافته، می‌توان گفت که افزایش حرارت ورودی از چند جهت یعنی افزایش رقت با فلز پایه، افزایش دمای ماکزیمم در ناحیه مذاب و افزایش زمان انجماد که سبب افزایش کسر فریت انتقال یافته به آستنیت می‌شود، سبب کاهش میزان فریت می‌شود.

این نکته نیز قابل یاد است که اگر از اثر اختلاط با فلز پایه جلوگیری شود، تغییرات حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری در گستره‌های انجام شده در این تحقیق، تأثیر قابل توجهی بر میزان فریت فلز جوش ندارند. شکل‌های 9 و 10 تأثیر حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری را بر میزان فریت فلزات جوش، در نمودار آورده است.

3-3- نتایج تست ضربه دما پایین

در بخش 2-4 نحوه انجام تست‌های ضربه دما پایین توضیح داده شد. جدول 6 نتایج تست‌های ضربه شاربی دما پایین، بر نمونه‌های مختلف جوشی (معرفی شده در جدول 3) را نشان می‌دهد. از هر نمونه جوش دو تست ضربه



شکل 8 ریزساختار فلز جوش با حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات، الف - نمونه 5 (سرعت جوش کاری 30 میلی‌متر بر دقیقه)، ب - نمونه 6 (سرعت جوش کاری 120 میلی‌متر بر دقیقه)

$$FN = \frac{\%ferrite \times (5.409Fe - 0.026Fe^2 - 102.39)}{100} \quad (3)$$

با توجه به جدول 4 مشاهده می‌شود که میزان فریت در نمونه 1 در مقایسه با نمونه‌های 2 و 3 افزایش قابل توجهی داشته که دلیل اصلی آن کاهش عنصر آستنیت‌زای نیکل در نمونه 1 با توجه به ترکیب شیمیایی آن است. همچنین در نمونه 1 میزان کربن بالاتر از نمونه‌های 2 و 3 بوده که خود سبب کاهش خواص ضربه دما پایین می‌شود. با توجه به جدول 5 نیز، درصد فریت هم در ریشه و هم در روی فلز جوش نمونه 1، بیشتر از درصد فریت در همان محل از نمونه‌های 2 و 3 است. نمونه‌های 2 و 3 ترکیب شیمیایی تقریباً نزدیک به ترکیب فلز پایه دارند که به اختلاط بالاتر فلزات جوش این نمونه‌ها با فلز پایه بازمی‌گردد. در نتیجه افزایش حرارت ورودی قوس از دو جهت یعنی افزایش رقت با فلز پایه و افزایش دمای ماکزیمم در ناحیه مذاب که سبب افزایش کسر فریت انتقال یافته به آستنیت می‌شود، سبب شده تا میزان فریت در فلز جوش نمونه‌های 2 و 3 کمتر از فریت در نمونه 1 باشد.

نمونه 6 نیز به واسطه افزایش سرعت جوش کاری و کاهش حرارت ورودی بر واحد طول، دارای فریت کمی بیشتر نسبت به نمونه‌های 2 و 5 است که می‌تواند به دلیل کاهش اختلاط با فلز پایه و کاهش تبدیل فریت به آستنیت باشد. در سرعت‌های انجماد بالا فرصت برای تبدیل فریت به آستنیت کمتر بوده و فریت باقی‌مانده بیشتری در فلز جوش ایجاد می‌شود. البته نرخ‌های انجماد با سرعت 120 میلی‌متر بر دقیقه، در مقایسه با سرعت‌های 60 میلی‌متر بر دقیقه و کمتر، تفاوت خیلی زیادی در زمان انجماد ندارند و مطلب بیان شده در خصوص تأثیر زمان انجماد بر فریت تبدیل شده، در سرعت‌های جوش کاری بالاتر، تأثیرگذارتر است. لازم به یاد است که در تمام نمونه‌ها میزان فریت در ریشه فلزات جوش، کمتر از مقادیر آن در سطح فلزات جوش است که دلیل آن به اختلاط و رقت بیشتر با فلز پایه در پاس‌های نخستین نسبت به پاس‌های بعدی بازمی‌گردد.

دلیل کاهش خواص ضربه از نمونه 3 به نمونه 4 نیز به افزایش اندازه دانه و درشت شدن بیش از حد ریزساختار بازمی‌گردد. همچنین هنگام جوش کاری نمونه 4 با توجه به آمپراژ بسیار بالای آن، عیب بریدگی کناره² جوش مشاهده شد. شکل 3 فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت بسیار عریض در نمونه 4 را نشان می‌دهد.

در نهایت می‌توان گفت که از نظر خواص ضربه دما پایین، در جوش کاری با شرایط یادشده و سرعت جوش کاری ثابت 60 میلی‌متر بر دقیقه، حرارت‌های ورودی قوس بین 2/25-1/61 کیلووات می‌تواند خواص ضربه مطلوبی را فراهم کند.

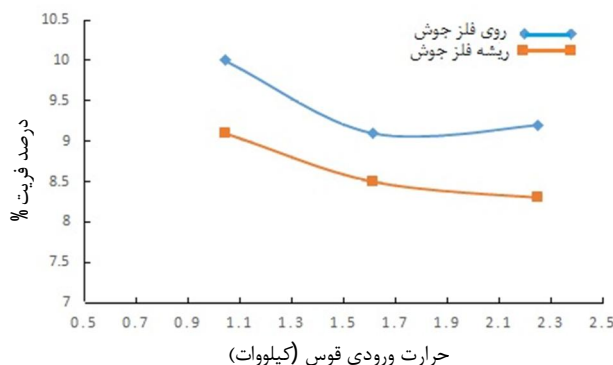
با مقایسه نتایج تست ضربه نمونه‌های 5، 2، 6 و 7، ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت جوش کاری (افزایش نرخ انجماد) تا 120 میلی‌متر بر دقیقه، مقادیر انرژی ضربه دما پایین افزایش یافته است. ولی با افزایش بیشتر سرعت جوش کاری تا 240 میلی‌متر بر دقیقه، مقادیر انرژی ضربه افت پیدا کرده است (شکل 12).

دلیل بهبود خواص ضربه از سرعت جوش کاری 30 تا 120 میلی‌متر بر دقیقه به کاهش اندازه دانه‌ها و ریزتر شدن ریزساختار بازمی‌گردد. با افزایش سرعت جوش کاری (افزایش نرخ انجماد)، فلز جوش سریع‌تر منجمد شده و فرصت کمتری برای رشد دندریت‌ها وجود داشته؛ بنابراین ساختاری ریزدانه‌تر با فریت‌های گسسته و بازوهای دندریتی ظریف‌تری حاصل شده است، اما در نمونه 7، به دلیل سرعت حرکت بیش از حد قوس، همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود، عیوب ذوب نشدن لبه جوش³ و پرنشستگی⁴ ایجاد شده است. همچنین به دلیل افزایش نرخ انجماد فرصت برای تبدیل فریت به آستنیت کمتر بوده و اختلاط با فلز پایه نیز که دارای عناصر فریت‌زای کمتری است، کمتر بوده و در نتیجه میزان فریت در نمونه‌های با سرعت جوش کاری بالاتر، بیشتر شده که این عامل نیز می‌تواند دلیلی بر کاهش خواص ضربه در نمونه 7 باشد.

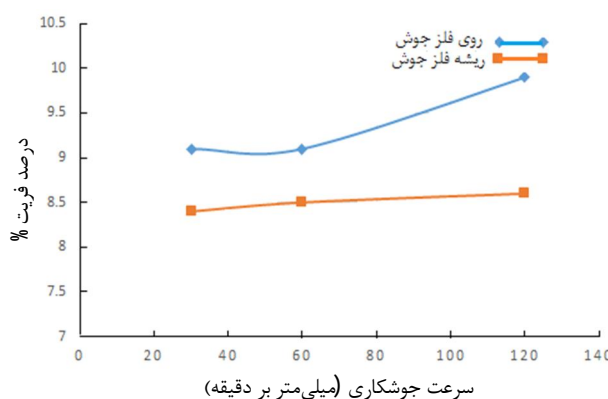
در نهایت می‌توان گفت که از نظر خواص ضربه دما پایین، در جوش کاری با شرایط مذکور و حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات، سرعت‌های جوش کاری در محدوده تقریبی 120 میلی‌متر بر دقیقه، می‌تواند خواص ضربه مطلوبی را فراهم کند.

4- انتخاب پارامترهای بهینه و نتایج تست‌های مربوطه

در نمونه‌های 2، 3 و 6 بیشترین مقادیر انرژی ضربه به دست آمد و با مقایسه تمام مقادیر، ملاحظه شد که حرارت‌های ورودی قوس بین 1/61 تا 2/25 کیلووات و سرعت جوش کاری در محدوده 120 میلی‌متر بر دقیقه، هم سبب ایجاد ساختاری نسبتاً ریزتر شده (که سبب بهبود استحکام نیز می‌شود) و هم می‌تواند سبب ایجاد جوش‌هایی با چقرمگی بالا در دماهای پایین شود. در نهایت با توجه به نتایج و بررسی‌های انجام شده، پارامترهای مورد بررسی حرارت ورودی قوس (آمپراژ) و سرعت جوش کاری، به ترتیب 1/67 کیلووات (130 آمپر) و 120 میلی‌متر بر دقیقه، به عنوان مقادیر بهینه از نظر مقاومت ضربه دما پایین، در نظر گرفته شد و تست‌های ضربه دما پایین از سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش برای تأیید، انجام گرفت. همچنین تست کشش نیز روی نمونه‌های با پارامترهای بهینه یادشده انجام گرفت، تا جوش‌های مربوطه را از نظر استحکام نیز تأیید کند.



شکل 9 تغییرات درصد فریت با تغییر حرارت ورودی قوس (سرعت ثابت جوش کاری 60 میلی‌متر بر دقیقه)



شکل 10 تغییرات درصد فریت با تغییر سرعت جوش کاری (حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات)

دما پایین گرفته شده است.

با مقایسه نتایج تست ضربه نمونه‌های 1-4، ملاحظه می‌شود که با افزایش حرارت ورودی قوس از 1/04 تا 1/61 کیلووات (افزایش آمپر از 80 تا 115 آمپر)، مقادیر انرژی ضربه دما پایین به صورت چشم‌گیری افزایش یافته و همچنین با افزایش حرارت ورودی قوس تا 2/25 کیلووات (150 آمپر) نیز، مقادیر انرژی ضربه به صورت جزئی بهبود یافته است، ولی با افزایش بیشتر حرارت ورودی قوس تا 3/23 کیلووات، مقادیر انرژی ضربه افت پیدا کرده است (شکل 11). دلیل بهبود خواص ضربه از نمونه 1 به نمونه 2، به کاهش فریت و کربن در نمونه 2 نسبت به نمونه 1 بازمی‌گردد. همچنین هنگام جوش کاری نمونه 1 با توجه به آمپراژ پایین آن، عیب ذوب ناقص¹ و عدم ایجاد خط جوش یکنواخت مشاهده شد.

جدول 6 نتایج تست ضربه شاریپی دما پایین نمونه‌های مختلف جوش داده‌شده

نمونه	انرژی ضربه در دمای 170°C - برحسب ژول	
	تست اول	تست دوم
نمونه 1	56/9	46/5
نمونه 2	109/8	122/5
نمونه 3	107/3	130/0
نمونه 4	105/4	115/1
نمونه 5	92/6	87/2
نمونه 6	111/1	128/4
نمونه 7	103/2	110/0

1- Lack of Fusion

2- Undercut
3- Lack of Side Wall Fusion
4- Underfill

جدول 7 نتایج تست ضربه دما پایین بر نمونه‌های نهایی بدون عملیات حرارتی

ردیف	موقعیت شیار	انرژی ضربه در دمای -170°C بر حسب ژول
1	فلز پایه	132/6
2	فلز پایه	135/4
3	فلز پایه	139/1
4	منطقه متأثر از حرارت	124/2
5	منطقه متأثر از حرارت	131/6
6	منطقه متأثر از حرارت	133/2
7	فلز جوش	115/0
8	فلز جوش	125/5
9	فلز جوش	128/3

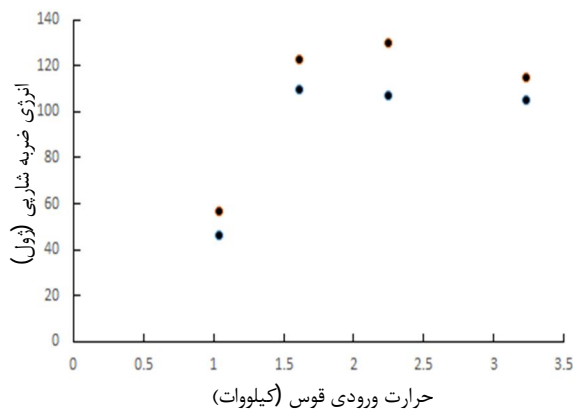
جدول 8 نتایج تست ضربه دما پایین بر نمونه‌های نهایی با عملیات حرارتی

ردیف	موقعیت شیار	انرژی ضربه در دمای -170°C بر حسب ژول
1	فلز پایه	131/1
2	فلز پایه	136/2
3	فلز پایه	140/0
4	منطقه متأثر از حرارت	115/6
5	منطقه متأثر از حرارت	133/4
6	منطقه متأثر از حرارت	135/2
7	فلز جوش	127/0
8	فلز جوش	132/6
9	فلز جوش	134/3

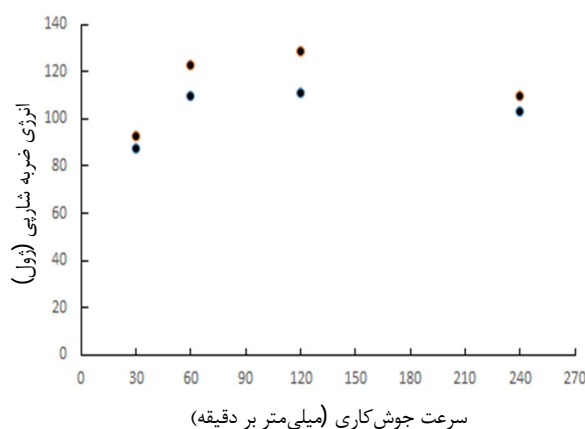
جدول 9 نتایج تست کشش بر نمونه‌های نهایی

ردیف	نمونه	تنش تسلیم [MPa]	تنش نهایی [MPa]	درصد تغییر طول %	ملاحظات
1	بدون عملیات پس‌گرم	370	585	45	خارج از محل جوش پاره شد
2	بدون عملیات پس‌گرم	372	599	40	خارج از محل جوش پاره شد
3	با عملیات پس‌گرم	285	524	41	خارج از محل جوش پاره شد
4	با عملیات پس‌گرم	300	558	46	خارج از محل جوش پاره شد

نکته دیگر این‌که مقادیر میانگین انرژی ضربه در منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه بیشتر از فلز جوش بوده که دلیل آن به مقادیر بسیار کم فریت در این نواحی بازمی‌گردد. همچنین به دلیل اندکی درشت‌دانه‌گی، به‌واسطه چرخه‌های حرارتی جوش کاری در ناحیه متأثر از حرارت، مقادیر انرژی ضربه در این منطقه کمتر از مقادیر آن در فلز پایه به‌دست آمده است. با انجام تست کشش، تمام نمونه‌ها در خارج از محل جوش پاره شدند و از آن‌جا که گلوبی شدن و شکست ابتدا در مناطق ضعیف‌تر رخ می‌دهد، نتیجه گرفته می‌شود که استحکام فلز جوش از فلز پایه بیشتر بوده و در



شکل 11 تغییرات انرژی ضربه شارپی با تغییر حرارت ورودی قوس (سرعت ثابت جوش کاری 60 میلی‌متر بر دقیقه)



شکل 12 تغییرات انرژی ضربه شارپی با تغییر سرعت جوش کاری (حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات)

همان‌طور که از پیش بیان شد، پس از تعیین پارامترهای جوش کاری بهینه (از نظر مقاومت ضربه دما پایین) حرارت ورودی قوس و سرعت جوش کاری، یک نمونه هم با انجام عملیات پس‌گرم (با مشخصات جوش کاری تدوین‌شده) تهیه و تست‌های ضربه روی آن گرفته شد. عملیات پس‌گرم آنیل به این صورت انجام شد که نمونه به مدت 1 ساعت در دمای 1050°C قرار داده شد و سپس بی‌درنگ عملیات سردکردن در آب انجام شد. جداول 7 و 8 نتایج تست ضربه شارپی دما پایین را، به‌ترتیب برای نمونه‌های جوش بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی پس‌گرم نشان می‌دهد. این تست برای هر سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش سه بار انجام گرفت. جدول 9 نیز نتایج تست کشش نمونه‌های با پارامترهای بهینه یادشده را نشان می‌دهد. این آزمایش دوبار برای نمونه با عملیات حرارتی پس‌گرم آنیل و نمونه بدون عملیات پس‌گرم انجام گرفت.

مقایسه نتایج تست ضربه دما پایین در نمونه‌های بدون عملیات و با عملیات حرارتی پس‌گرم نشان می‌دهد که انجام عملیات پس‌گرم مربوطه، تأثیر زیادی بر خواص ضربه در منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه نداشته، ولی سبب افزایش انرژی ضربه دما پایین در فلز جوش شده است. با اندازه‌گیری درصد فریت فلز جوش در نمونه‌های با پس‌گرم، درصد فریت به‌صورت میانگین 6/5 درصد حجمی به‌دست آمد، بنابراین افزایش انرژی ضربه به‌واسطه عملیات پس‌گرم یادشده می‌تواند به کاهش فریت (تبدیل فریت باقی‌مانده به آستنیت) در فلز جوش نسبت داد.

فلز جوش بازمی‌گردد؛ همچنین این عملیات سبب کاهش استحکام تسلیم و نهایی می‌شود.

6- مراجع

- [1] Materials for cryogenic services, engineering properties of Austenitic Stainless steels, *Nickel development institute*, 1974.
- [2] Guidelines on suitability testing of welding filler metals, VdTUV Information sheet, *Welding engineering document*, 1153, 1980.
- [3] A. K. Gowrisankar, V. Bhaduri, D. Seetharaman, Effect of the Number of Passes on the Structure and Properties of Submerged Arc Welds of AISI Type 316L Stainless Steel, *Welding Research Supplement*, pp. 147-154, 1987.
- [4] N. Friedrich, Welding of austenitic stainless steels for cryogenic LNG application, low temperature behavior of austenitic weldments, *Bohler Welding Austria*, 2005.
- [5] R. J. Fowls, S. E. Blake, Influence of heat input on austenitic stainless steel weld metal properties, Vol. 1, pp. 17-24, 2008.
- [6] R. Yilmaz, H. Usun; Mechanical properties of Austenitic stainless steels Welded by GMAW and GTAW, *Journal of Marmara of Pure and Applied Sciences*, Vol. 18, pp. 97-113, 2002.
- [7] D. T. Read, H. I. McHenry, P. A. Steinmeyer, Metallurgical Factors Affecting the Toughness of 316L SMA Weldments at Cryogenic Temperatures, *Welding Research Supplement*, pp. 104-112, 1980.
- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. II, SA-240, Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet and Strip for Pressure Vessels.
- [9] J. C. Lippold, D. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, 2005.
- [10] Welding of Stainless Steel and other Joining Methods, Designer's Handbook, *Nickel Development Institute*, pp. 4-9, 2005.
- [11] G. Holloway, A. Marshall, Stainless steel arc welding consumables for cryogenic applications, *Conference Stainless Steel World America 2004*, Huston, USA, 2004.
- [12] ASTM E23-12C, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. *ASTM International*.
- [13] J. M. Vitec, S. A. David, E. R. Hinman, Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects, Part I Model Development, *AWS Paper*, 2003.

نتیجه جوش را از نظر استحکام تأیید می‌کند. همچنین با مقایسه استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ها، نتیجه گرفته می‌شود که انجام عملیات حرارتی پس‌گرم مربوطه، سبب کاهش تنش تسلیم و نهایی شده است. از آن‌جا که در نمونه با عملیات پس‌گرم نیز شکست در ناحیه فلز پایه اتفاق افتاد، این نتیجه حاصل می‌شود که عملیات حرارتی مربوطه، سبب کاهش استحکام فلز پایه شده است.

5- نتیجه‌گیری

1. حرارت ورودی قوس بالاتر از طرفی می‌تواند باعث کاهش فریت شده و در نتیجه باعث بهبود مقاومت ضربه دما پایین شود، ولی از طرف دیگر با افزایش زمان انجماد و رشد دانه و افزایش حساسیت، می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت ضربه داشته باشد. افزایش سرعت جوش کاری نیز از طرفی می‌تواند بر میزان فریت تأثیر داشته و سبب افزایش جزئی فریت باقی‌مانده در ترکیب فلز جوش شود و از سوی دیگر ریزتر شدن ریزساختار را سبب می‌شود.
2. بالاترین مقاومت ضربه دما پایین در فلز جوش، با حرارت ورودی قوس 1/67 کیلووات (130 آمپر) و سرعت جوش کاری 120 میلی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد.
3. عملیات پس‌گرم آنیل در دمای 1050°C و سرد کردن سریع در آب، تأثیر زیادی بر خواص ضربه در منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه نداشته ولی سبب افزایش انرژی ضربه دما پایین در فلز جوش شده که یکی از دلایل این افزایش انرژی ضربه، به کاهش فریت در