مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 205-213

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

مهدی کریمی‌منش[1]، ایرج ستاری‌فر[2]، حمید امیدوار[3*]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، 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

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 جوش‌کاری
مقاومت ضربه دما پایین
فولاد زنگ‌نزن آستنیتی
جوش‌کاری قوس الکترود تنگستن با محافظت گاز

چکیده

کاربرد در دماهای پایین موجب تردی بسیاری از سازه‌ها می‌شود که در نتیجه، انتخاب پارامترهای جوش‌کاری مناسب برای حفظ چقرمگی سازه جوشی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای جوش‌کاری حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری، بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور فرایند جوش‌کاری قوسی الکترود 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 جوش‌کاری، تأثیر پارامترهای یادشده بر ریزساختار، میزان فریت فلز جوش و انرژی ضربه شارپی دما پایین نمونه‌ها بررسی شد. حرارت ورودی قوس از 1/04 تا 3/23 کیلووات و سرعت جوش‌کاری 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 درشت‌شدن ساختارهای دندریتی در فلز جوش می‌شود و می‌تواند تأثیر منفی بر مقاومت ضربه داشته باشد. تغییرات سرعت جوش‌کاری نیز می‌تواند بر میزان فریت و ریزساختار و در نتیجه بر مقاومت ضربه تأثیر داشته باشد. درنهایت با بررسی‌ها و انجام تست‌های متعدد، خواص ضربه بهینه در دمای پایین با حرارت ورودی قوس 1/67 کیلووات و سرعت جوش‌کاری 120 میلی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد.

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

Mahdi Karimi Manesh[1], Iraj Sattari Far[1], 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 Weldin

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.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 جوش‌کاری با فرایند قوسی الکترود تنگستن با محافظت گاز را داراست. زمانی که دما کاهش می‌یابد استحکام فولادهای آستنیتی افزایش یافته، در حالی‌که چقرمگی همچنان در سطوح بالا باقی می‌ماند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به‌دلیل ساختار مکعبی با مرکز وجوه پر[1]، 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 جوش‌کاری بر این خواص در دمای پایین بررسی شود. استانداردهای مختلف مقاومت ضربه را براساس کمینه انبساط عرضی[2] برابر 0/38 میلی‌متر، یا براساس کمینه انرژی ضربه شارپی 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 جوش‌کاری 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 جوش‌کاری حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری، بر مقاومت ضربه دما پایین فلز جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L مورد توجه قرار گرفته که برای بررسی نحوه تأثیر پارامترهای جوش‌کاری 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 پر[3] 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 فریت[4] 3 را در فلز جوش ضروری دانسته‌اند [4].

حرارت ورودی قوس، سرعت جوش‌کاری 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 جوش‌کاری 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.

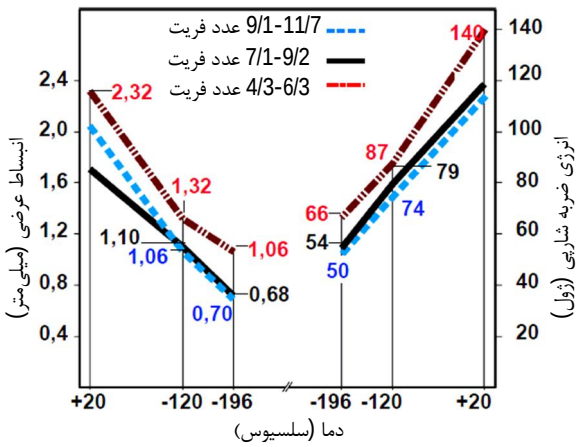
حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری همچنین می‌تواند بر ساختار و شکل فاز فریت نیز تأثیر داشته باشد. رید و همکارانش [7] تأثیر حرارت ورودی و نرخ سرد شدن را بر شکل فریت‌ها و خواص ضربه در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L در دماهای پایین بررسی کردند. ایشان گزارش کردند که با کاهش نرخ سرد شدن به‌واسطه حرارت‌های ورودی 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 جوش‌کاری، هفت نمونه تست به‌دست آمد. تغییر در حرارت ورودی قوس با تغییر در آمپراژ، و تغییر در سرعت جوش‌کاری با تغییر سرعت پیشروی قوس با کنترل زمان پیشروی الکترود در طول جوش در فرایند دستی قوسی الکترود 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)

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه فولاد نوع 304L

عنصر	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 اندازه‌گیری توسط دستگاه ولت‌متر انجام گرفت. حرارت ورودی قوس از ضرب آمپراژ و ولتاژ به‌دست می‌آید.

2-1- فرایند جوش‌کاری

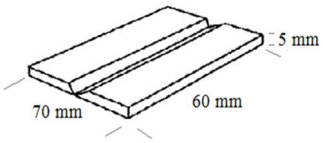
جوش‌کاری توسط فرایند قوسی الکترود تنگستن توریم‌دار با محافظت گاز آرگون و در موقعیت جوش‌کاری تخت روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L انجام شده است. پخ ایجاد شده به‌صورت v شکل با زاویه 30 درجه، تقریباً 1 میلی‌متر ریشه، در هر ورق بوده که برای جلوگیری از اعوجاج ورق‌ها توسط گیره مقید شدند. نوع جریان و قطبیت جوش‌کاری با توجه به راهنماها جریان مستقیم با قطبیت منفی، الکترود تنگستنی از نوع توریم‌دار با قطر 2 میلی‌متر، با استفاده از فلز پرکننده ER308L که فلز پرکننده معمول برای جوش‌کاری فولادهای نوع 304L بوده و دارای مشخصه SFA-5.9 در استاندارد ASME است، با قطرهای 2 و 3 میلی‌متر انتخاب شدند. با تغییر در پارامترهای حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری، هفت نمونه تست جوش به ابعاد 70 در 60 و ضخامت 5 میلی‌متر، به‌دست آمد. شکل 2 ابعاد نمونه‌های جوش داده شده را نشان می‌دهد.

دماهای پیش‌گرم بالا که سبب افزایش زمان انجماد می‌شود، می‌تواند اثرات نامطلوبی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی داشته باشد و از طرفی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی مستعد ترک هیدروژنی نبوده و عملیات پیش‌گرم به‌جز در قطعات ضخیم برای کاهش تنش‌های پسماند و اعوجاجات، به‌ندرت در این فولادها مورد نیاز است. دمای پیش‌گرم و بین‌پاسی بالا تأثیر بسیار اندکی بر استحاله فریت به آستنیت دارد، زیرا این استحاله در دماهای بسیار بالا رخ می‌دهد، جایی‌که کنترل دمای پیش‌گرم و بین‌پاسی تأثیر اندکی بر سرعت سرد شدن دارد. در مواردی که ایجاد رسوبات کاربیدی موجب حساس‌شدن فلز می‌شوند، دمای بین‌پاسی از یک میزان بیشینه باید کمتر باشد، زیرا سرعت سرد شدن آرام در محدوده رسوب‌گذاری کاربیدها ممکن است خطرناک باشد [9]. از این‌رو در این پژوهش نمونه‌ها بدون پیش‌گرم، با دمای اولیه جوش‌کاری 25°C و با کنترل دمای بین‌پاسی تقریباً 150°C جوش‌کاری شده‌اند.

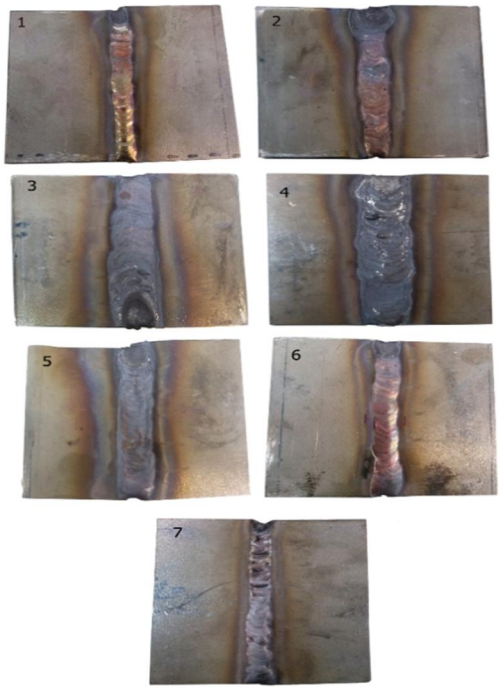
عملیات پس‌گرم در این فولادها که مقاومت بالایی در برابر شکست ترد دارند، به‌ندرت مورد نیاز است و در برخی مواقع برای کاهش خطر ترک خوردگی تنشی و کاهش تنش‌های باقی‌مانده، عملیات حرارتی تنش‌زدایی انجام می‌گیرد. در صورتی‌که از این عملیات حرارتی استفاده شود، بایستی سرد شدن به‌سرعت در آب انجام شود، زیرا در صورت سرد شدن آرام، امکان رسوب کاربیدها وجود دارد [10]. استانداردها در برخی موارد نه‌تنها عملیات پس‌گرم را برای این فولادها ضروری نمی‌دانند، بلکه آن‌را ممنوع نیز کرده‌اند. در این پژوهش نمونه‌ها بدون عملیات پس‌گرم جوش‌کاری شده‌اند.

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

در تمام نمونه‌ها 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 نمونه‌های در نظر گرفته شده و پارامترهای جوش‌کاری مربوطه را و شکل 3 تصویر این نمونه‌ها را پس از جوش‌کاری نشان می‌دهد.



شکل 2 ابعاد نمونه‌های جوش داده شده



شکل 3 تصویر نمونه‌های جوش (با توجه به جدول 3) پس از جوش‌کاری

جدول 3 نمونه‌های ایجادشده با تغییر در پارامترهای جوش‌کاری

نمونه	آمپراژ [A]	ولتاژ [V]	حرارت ورودی قوس [kW]	سرعت جوش‌کاری [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

2-2- آماده‌سازی و تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

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

برای متالوگرافی نمونه‌ها، پس از ماشین‌کاری، پرداخت و پولیش سطوح، با استفاده از محلول اچ $3HCl + 1HNO_3$ و قرار دادن در محلول به مدت تقریبی 10 ثانیه، نمونه‌ها اچ‌شده و متالوگرافی نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری انجام گرفت.

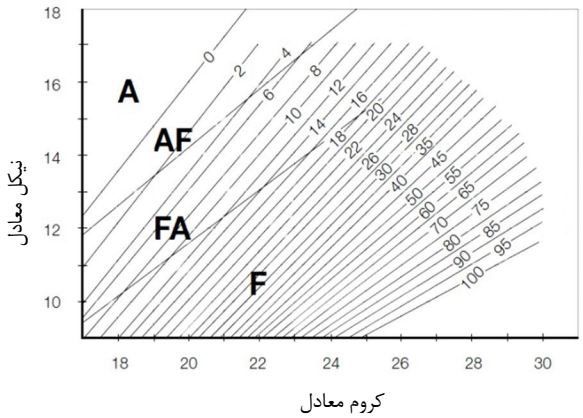
2-3- تعیین فریت فلز جوش

تعیین میزان فریت فلز جوش با استفاده از دو روش پیش‌بینی میزان فریت با استفاده از دیاگرام 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 دیاگرام WRC-1992 مقدار فریت فلز جوش آن‌ها به‌صورت عدد فریت به‌دست آمد. درحال حاضر، دیاگرام WRC-1992، یکی از دقیق‌ترین دیاگرام‌های موجود جهت پیش‌بینی عدد فریت در فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی است [9]. این دیاگرام در شکل 4 نشان داده شده است.

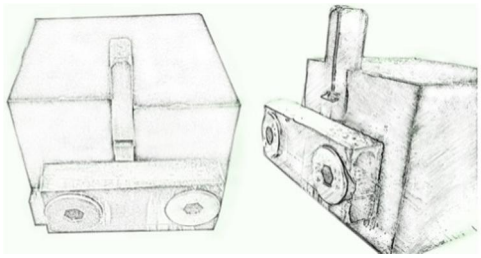
برای اندازه‌گیری فریت از دستگاه فریت اسکوپ مدل FMP30 استفاده شد، که مقدار فریت را با دقت بالایی، به‌صورت درصد حجمی فریت نشان می‌دهد.

2-4- آزمون ضربه شارپی

کمیت اصلی که در آزمون ضربه اندازه‌گیری می‌شود، انرژی جذب شده در شکست نمونه است که هرچه ماده چقرمه‌تر باشد انرژی جذب‌شده 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 بیان‌شده توسط اره لنگ و فرزکاری 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 4 دیاگرام ساختاری WRC-1992 [9]



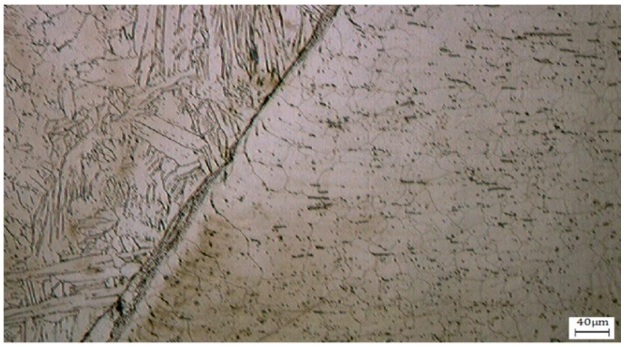
شکل 5 شماتیک قید ساخته شده برای ایجاد شیار روی نمونه‌های ضربه

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 اندازه‌گیری‌شده روی نمونه پس از خارج کردن از نیتروژن مایع و قرار دادن آن‌ها در دستگاه تست ضربه، پس از 5، 10 و 15 ثانیه به‌ترتیب 181-، 170- و 159°C- مشاهده شد. ترموکوپل استفاده‌شده، مدل TM-946 ساخت شرکت لوترون بوده که قابلیت اندازه‌گیری دما بین 199/9°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- به‌دست آمد. شایان یاد است که پیش از انجام آزمایش، آونگ بدون وجود نمونه رهاشده و میزان انرژی جذب‌شده 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 به‌گونه‌ای است که ریزساختار غالب آن آستنیتی باشد و بسته به نسبت عناصر فریت‌زا به آستنیت‌زا، ریزساختار ریختگی یا کارشده 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 به‌واسطه اندکی سوختگی کناره جوش، به‌خوبی مشخص است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دندریت‌ها از مرز به سمت داخل ناحیه فلز جوش انجماد پیدا کرده و ساختار دندریتی با فریت اسکلتی را ایجاد کرده 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 درشت‌دانگی دیده می‌شود که این به‌دلیل چرخه‌های حرارتی مکرر در پاس‌های متعدد جوش‌کاری 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.

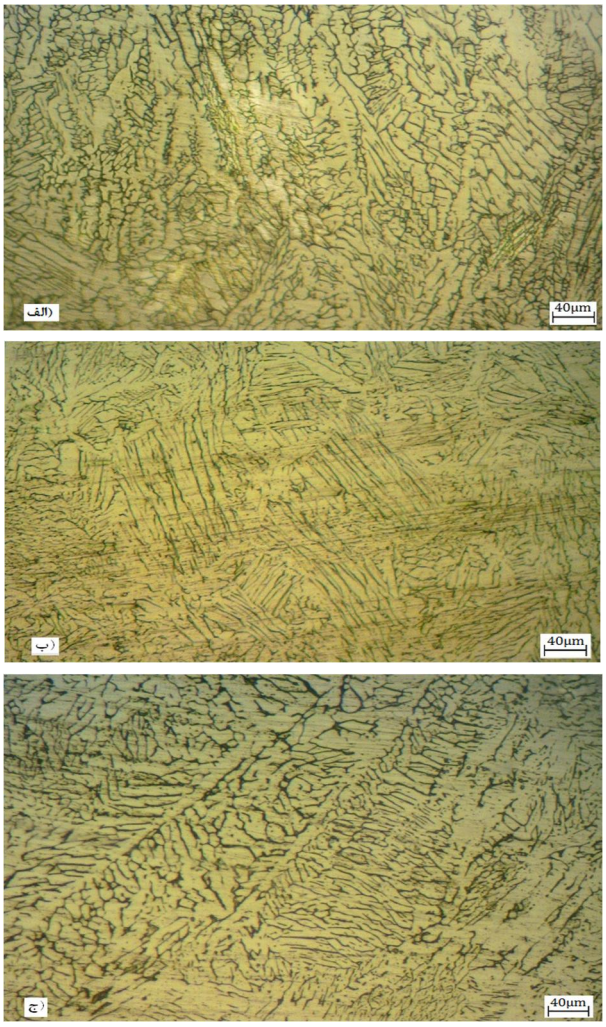
3-1-1- مقایسه ریزساختار نمونه‌ها با تغییر حرارت ورودی قوس

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

ساختار فریت در این نمونه‌ها بیشتر به‌صورت فریت اسکلتی بوده که فریت‌های باقی‌مانده در بازوهای دندریتی قرار گرفته‌اند و در برخی نواحی که تجمع فریت‌ها بیشتر شده، فریت پر شکل نیز ایجاد شده است. افزایش فاصله بازوهای دندریتی و رشد دندریت‌ها 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 جوش‌کاری

شکل‌های 8-الف، 7-ب و 8-ب به‌ترتیب مربوط به ریزساختار ناحیه فلز جوش در نمونه‌های 5، 2 و 6 هستند، که فرایند جوش‌کاری در آن‌ها به‌ترتیب 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 به‌صورت فریت اسکلتی بوده و در برخی نواحی فریت‌های پرشکل نیز دیده شده است. با مقایسه این شکل‌ها نیز نتیجه می‌شود که با کاهش سرعت جوش‌کاری و در نتیجه افزایش زمان انجماد، فاصله بازوهای دندریتی بیشتر شده و دندریت‌ها 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 جوش‌کاری در گستره 120 میلی‌متر و بالاتر و حرارت‌های ورودی قوس کمتر از 2/25 کیلووات، ساختارهای ریزتری ایجاد کرده و می‌توانند



شکل 7 ریزساختار فلز جوش با سرعت جوش‌کاری 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.

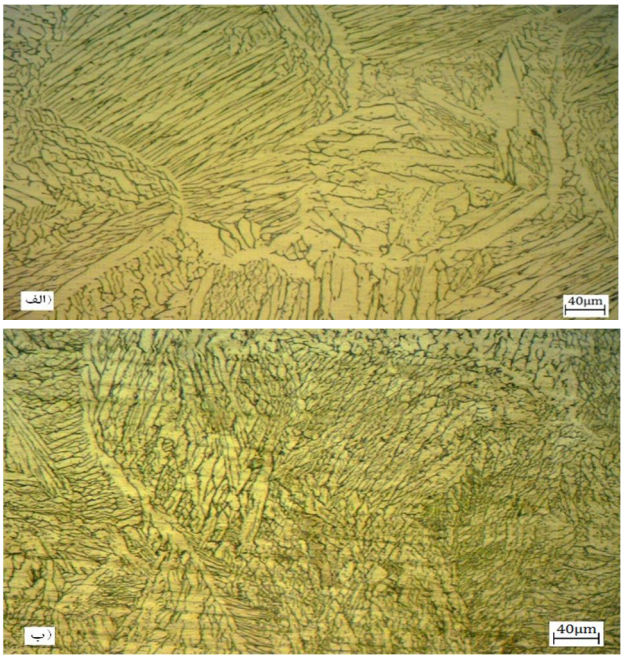
3-2- تعیین ترکیب شیمیایی و میزان فریت فلز جوش

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 (2،1) که مربوط به دیاگرام ساختاری WRC-1992 [9] است، به‌دست 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 اندازه‌گیری‌شده را به‌صورت درصد فریت نشان می‌دهد. این آزمایش دو مرتبه از هر نقطه گرفته شد که میانگین این دو اندازه‌گیری در جدول یادشده است. لازم به یاد است که رابطه مشخصی برای تبدیل عدد فریت به درصد فریت و برعکس وجود ندارد. در این پژوهش، این تبدیل به‌صورت تقریبی با رابطه (3) که توسط AWS [13] پیشنهاد شده، انجام شده است. Fe در فرمول درصد وزنی آهن موجود در ترکیب است.



شکل 8 ریزساختار فلز جوش با حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات، الف- نمونه 5 (سرعت جوش‌کاری 30 میلی‌متر بر دقیقه)، ب- نمونه 6 (سرعت جوش‌کاری 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 انتقال‌یافته 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 به‌واسطه افزایش سرعت جوش‌کاری و کاهش حرارت ورودی بر واحد طول، دارای فریت کمی بیشتر نسبت به نمونه‌های 2 و 5 است که می‌تواند به‌دلیل 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 جوش‌کاری 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.

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

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

جدول 5 درصد فریت فلز جوش نمونه‌ها توسط دستگاه فریت‌سنج مغناطیسی

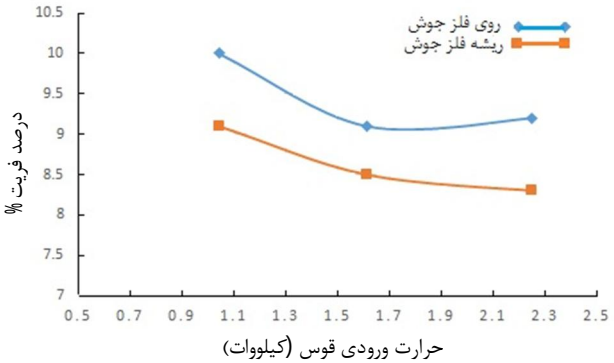
	درصد فریت (عدد فریت) سطح جوش	درصد فریت (عدد فریت) ریشه جوش
نمونه 1	10 (13/6)	9/1 (12/2)
نمونه 2	9/1 (12/2)	8/5 (11/4)
نمونه 3	9/2 (12/3)	8/3 (11/1)
نمونه 5	9/1 (12/2)	8/4 (11/3)
نمونه 6	9/9 (13/5)	8/6 (11/5)

در نهایت با مقایسه مقادیر فریت در نمونه‌های 1، 2 و 3 که حرارت ورودی قوس در آن‌ها به‌ترتیب افزایش یافته و همچنین مقایسه مقادیر فریت در نمونه‌های 5، 2 و 6 که سرعت جوش‌کاری در آن‌ها به‌ترتیب 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 انتقال‌یافته 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 جوش‌کاری 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 جوش‌کاری 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 شارپی دما پایین، بر نمونه‌های مختلف جوشی (معرفی شده در جدول 3) را نشان می‌دهد. از هر نمونه جوش دو تست ضربه



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

شکل 10 تغییرات درصد فریت با تغییر سرعت جوش‌کاری (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 به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافته و همچنین با افزایش حرارت ورودی قوس تا 2/25 کیلووات (150 آمپر) نیز، مقادیر انرژی ضربه به‌صورت جزیی 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 جوش‌کاری نمونه 1 با توجه به آمپراژ پایین آن، عیب ذوب ناقص[1] و عدم‌ایجاد خط جوش یکنواخت مشاهده شد.

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

	انرژی ضربه در دمای 170-°C برحسب ژول (تست اول)	انرژی ضربه در دمای 170-°C برحسب ژول (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

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 جوش‌کاری نمونه 4 با توجه به آمپراژ بسیار بالای آن، عیب بریدگی کناره[2] 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 جوش‌کاری با شرایط یادشده و سرعت جوش‌کاری ثابت 60 میلی‌متر بر دقیقه، حرارت‌های ورودی قوس بین 1/61-2/25 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 جوش‌کاری (افزایش نرخ انجماد) تا 120 میلی‌متر بر دقیقه، مقادیر انرژی ضربه دما پایین افزایش یافته است. ولی با افزایش بیشتر سرعت جوش‌کاری تا 240 میلی‌متر بر دقیقه، مقادیر انرژی ضربه افت پیدا کرده است (شکل 12).

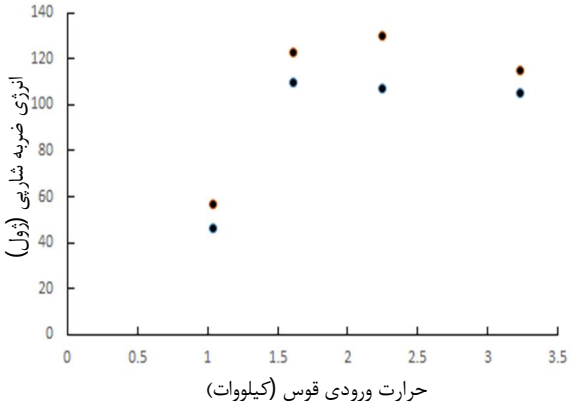
دلیل بهبود خواص ضربه از سرعت جوش‌کاری 30 تا 120 میلی‌متر بر دقیقه به کاهش اندازه دانه‌ها و ریزتر شدن ریزساختار بازمی‌گردد. با افزایش سرعت جوش‌کاری (افزایش نرخ انجماد)، فلز جوش سریع‌تر منجمد شده و فرصت کمتری برای رشد دندریت‌ها وجود داشته؛ بنابراین ساختاری ریزدانه‌تر با فریت‌های گسسته و بازوهای دندریتی ظریف‌تری حاصل شده است، اما در نمونه 7، به‌دلیل سرعت حرکت بیش از حد قوس، همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود، عیوب ذوب نشدن لبه جوش[3] و پرنشدگی[4] ایجاد شده است. همچنین به‌دلیل 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 جوش‌کاری 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 جوش‌کاری با شرایط مذکور و حرارت ورودی ثابت قوس 1/61 کیلووات، سرعت‌های جوش‌کاری در محدوده تقریبی 120 میلی‌متر بر دقیقه، می‌تواند خواص ضربه مطلوبی را فراهم کند.

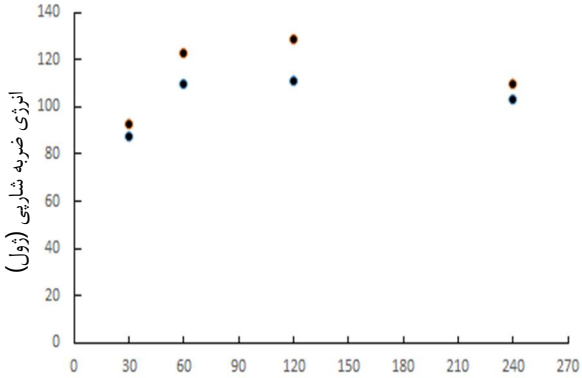
4- انتخاب پارامترهای بهینه و نتایج تست‌های مربوطه

در نمونه‌های 2، 3 و 6 بیشترین مقادیر انرژی ضربه به‌دست آمد و با مقایسه تمام مقادیر، ملاحظه شد که حرارت‌های ورودی قوس بین 1/61 تا 2/25 کیلووات و سرعت جوش‌کاری 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 جوش‌کاری، به‌ترتیب 1/67 کیلووات (130 آمپر) و 120 میلی‌متر بر دقیقه، به‌عنوان 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.

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



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



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

همان‌طور که از پیش بیان شد، پس از تعیین پارامترهای جوش‌کاری بهینه (از نظر مقاومت ضربه دما پایین) حرارت ورودی قوس و سرعت جوش‌کاری، یک نمونه هم با انجام عملیات پس‌گرم (با مشخصات جوش‌کاری 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 می‌توان به کاهش فریت (تبدیل فریت باقی‌مانده به آستنیت) در فلز جوش نسبت داد.

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

ردیف	موقعیت شیار	انرژی ضربه در دمای -170°C برحسب 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 برحسب 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 درشت‌دانگی، به‌واسطه چرخه‌های حرارتی جوش‌کاری 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 گلویی شدن و شکست ابتدا در مناطق ضعیف‌تر رخ می‌دهد، نتیجه گرفته می‌شود که استحکام فلز جوش از فلز پایه بیشتر بوده و در

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 جوش‌کاری نیز از طرفی می‌تواند بر میزان فریت تأثیر داشته و سبب افزایش جزیی 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 جوش‌کاری 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 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.