



Article Info

Received: 2021-7-12
Accepted: 2022-1-26

Keywords

Brazing, Austenitic stainless steel, Filler metal, BNi2, Tensile strength

How to cite this article

Yaser Vahidshad, Faegheh Soltan Mohammad, "Effect of Brazing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel 316 Joint Brazed by BNi2", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (2), p.: 1-9, 2022.

Effect of Brazing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel 316 Joint Brazed by BNi2

Yaser Vahidshad ^{*,1}, Faegheh Soltan Mohammad²

- 1, *. Space Transportation Research Institute, Tehran, Iran, y.vahidshad@isrc.ac.ir, Corresponding author
2. Space Transportation Research Institute, Tehran, Iran, f.soltanmohammad@isrc.ac.ir

Abstract

Many factors affect the quality of brazing process, including temperature, time, clearance, surface roughness and alloy elements. Actually, they influence on the formation of intermetallic compounds in brazed joints. Since intermetallic compounds are brittle, they considerably degrade the mechanical properties of joints. In this study, the mechanical strength and microstructural characterization of AISI 316 brazed joints with BNi2 filler metal in different temperature has been investigated. Brazing temperatures changed from 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C and 1200 °C for a holding time of 60 min then, the influence of this variable on the brazing strength were examined. Tensile test samples were evaluated at room temperature and metallography samples and fractured tensile sample scanned by a microscope. The results showed that the higher brazing temperature leads to diffusion of boron element into base metal and less volume formation of intermetallic compound phase in the brazing joint and consequently more tensile strength.

اثر دمای لحیم کاری سخت بر روی ریزساختار و استحکام مکانیکی اتصال نمونه‌های فولادی AISI 316 لحیم شده با پُرکننده BNi2

یاسر وحیدشاد^{۱*}، فائقه سلطان محمد^۲

۱. * گروه سیستم‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی،

y.vahidshad@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. گروه سیستم‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، f.soltanmohammad@isrc.ac.ir



دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۲، صفحه ۹-۱
پاییز و زمستان ۱۴۰۰

دسترسی پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir/article_146829.html

DOI:

10.22034/jssta.2022.294770.1026

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶

واژه‌های کلیدی

لحیم کاری سخت، فولاد زنگ نزن
، BNi2 آستنیتی، پُرکننده
استحکام کششی

نحوه استناد به این مقاله

یاسر وحیدشاد، فائقه سلطان محمد، " اثر دمای لحیم کاری سخت بر روی ریزساختار و استحکام مکانیکی اتصال نمونه‌های فولادی AISI 316 لحیم شده با پُرکننده BNi2 "، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره دوم، صفحات ۱-۹، ۱۴۰۰.

چکیده

عوامل بسیاری بر کیفیت فرایند لحیم کاری سخت تاثیر می گذارند که می توان به دما، زمان، فاصله، کیفیت سطحی و عناصر آلیاژی اشاره نمود. عوامل ذکر شده با تاثیر بر تشکیل فازهای بین فلزی شکننده، نقش مهمی در استحکام اتصال ایجاد شده دارند، چنانچه افزایش دمای لحیم کاری سخت منجر به حذف فازهای بین فلزی شده و استحکام منطقه اتصال دو فلز را افزایش می دهد. در این تحقیق، اتصال قطعات فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ به یکدیگر با لایه پُرکننده پایه نیکل به روش لحیم کاری سخت مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، از فلز پُرکننده BNi2 در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۶۰ دقیقه برای لحیم کاری نمونه‌های کشش گرد استاندارد استفاده شده و سپس خواص مکانیکی و ریزساختار منطقه اتصال با آزمایش کشش دمای محیط و متالوگرافی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش دما، استحکام کشش منطقه اتصال بهبود می یابد. این افزایش استحکام به دلیل نفوذ عنصر بور به داخل فلز پایه و کاهش فازهای تُرد و مضر بین فلزی بوریید در منطقه اتصال است.

۱- مقدمه

نیویوم توسط ناسا، اتصال قطعات سوپرآلیاژ موتورهای RS-25 به عنوان موتور اصلی شاتل و نیز لحیم‌کاری انژکتور پیش‌رانش رانشگرهای ۲، ۵ و ۲۰۰ نیوتنی تک مولفه با سوخت هیدرازین در پایگاه چند مأموریتی آژانس فضایی برزیل اشاره نمود [۱، ۴-۳]. فرایند لحیم‌کاری سخت در محدوده دمایی جامد-مذاب انجام می‌شود از این‌رو، در این محدوده با استفاده از خاصیت ترشوندگی فضای فصل مشترک را پر کرده و سپس با نفوذ عناصر آلیاژ فلز پرکننده با دو سطح اتصال پیوند برقرار می‌کند. دما و زمان دو عامل مهم در فرایند نفوذ فلز پرکننده به درون فلز پایه است. بنابراین، بررسی اثر دما و زمان فرایند لحیم‌کاری یکی از عوامل مهم فرایند بوده که بر روی استحکام و سلامت موضع اتصال نقش مهمی دارد [۱].

در این تحقیق، با انتخاب یکی از متداول‌ترین گروه فلزات و نیز ماده پرکننده، فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به‌عنوان فلز پایه و ماده پرکننده پایه نیکل BNi2، به بررسی اثر دما بر استحکام مکانیکی اتصال حاصل از لحیم‌کاری سخت به روش کوره‌ای پرداخته شده است. نکته قابل توجه اینکه، قطعات لحیم‌کاری شده با استفاده از پرکننده پایه نیکل در کوره و مورد استفاده در صنایع فضایی نمونه‌های بسیار خوبی از کارکرد و تاب‌آوری قطعات در شرایط افزایش دمای ناگهانی (بالتر از دمای لحیم‌کاری) هستند [۶-۵]. با توجه به برخی محدودیت‌ها در استفاده از کوره خلاء و هزینه بالای آن، بررسی‌ها در کوره با اتمسفر آرگون انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

به دلیل کاربرد فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در ساخت قطعات فضایی مانند انژکتورها، اتصالات سنسورهای دما و فشار و نیز اتصال انژکتورها به بدنه‌های تراستر با جنس متفاوت، در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با ترکیب شیمیایی جدول ۱ طبق استاندارد ASTM A370-E8M استفاده شده است (شکل ۱).

واژه لحیم‌کاری سخت می‌تواند به هر فرایندی که سبب اتصال فلزات مشابه یا غیرمشابه با استفاده از حرارت و یک پرکننده فلزی که دارای دمای ذوب بالای 450°C و زیر نقطه ذوب فلز پایه است اطلاق شود. در واقع، فرایند لحیم‌کاری سخت مدرن تعریف گسترده‌تری دارد که شامل اتصال فلز به فلز، فلز به غیرفلز شامل شیشه و فلزات دیرگداز نیز می‌شود. برای ایجاد یک اتصال لحیم، علاوه بر دو رکن اصلی یعنی فلز پایه و ماده پرکننده، نیاز به یک منبع حرارت‌دهی مناسب نیز است که به صورت موضعی یا کلی قطعه را گرم کند. روش‌های لحیم‌کاری شعله‌ای^۱، القایی^۲، مقاومتی^۳ باریکه لیزر^۴ یا باریکه الکترون^۵ و روش‌های لحیم‌کاری مادون سرخ^۶ به صورت موضعی و روش کوره‌ای، غوطه‌وری شیمیایی^۷، نفوذی^۸ و فاز بخار^۹ یا مادون سرخ به صورت گرم کردن کل قطعه است. روش کوره‌ای به دلیل شرایط محیطی خنثی و یکنواختی گرم و سرد کردن و نیز تکرارپذیری مناسب، از روش‌های متداول حرارت‌دهی در فرایند لحیم‌کاری سخت، به‌خصوص در کاربردهای فضایی است. کوره‌های استفاده شده ممکن است انواع مختلفی داشته باشند اما همه آن‌ها باید قابلیت ایجاد فضای خلاء، خنثی یا محیط احیا کننده را داشته باشند. یک اتصال لحیم‌کاری موفق، حاصل یک پیوند متالورژیکی با استحکام مشابه فلز پایه و حتی در مواردی مستحکم‌تر از آن است که طبق تحقیقات انجام شده این اتصال بین هر گروه مواد پایه‌ای که باشد تحت تاثیر پارامترهایی مانند دما، زمان، فاصله اتصال، نوع و کیفیت ماده پرکننده قرار دارد [۲-۱].

بعضی از روش‌های اتصال مانند اتصال ذوبی (جوشکاری) یا پیوند چسبی (دارای مواد آلی) برای کاربردهای فضایی امکان‌پذیر نیست به همین دلیل فرایند لحیم‌کاری سخت و نرم همچنان گزینه قابل دوامی بر اتصال قطعات مورد کاربرد در صنایع فضایی است. از بارزترین نمونه‌های کاربردهای لحیم‌کاری سخت در صنایع فضایی می‌توان به اتصال قطعات رانشگر ۲۰۰ نیوتنی دو مولفه از جنس رنیوم به فولاد زنگ‌نزن 304L، هستلوی B2 و

6 Infrared
7 Chemical Dip, Molten Metal Dip
8 Reaction Diffusion, Transient Liquid-Phase Bonding
9 Vapour-Phase

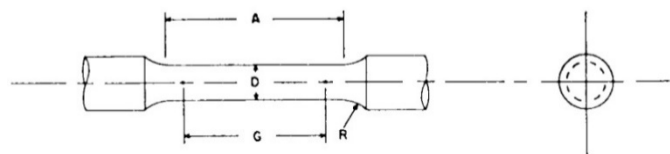
1 Torch
2 Induction
3 Resistance
4 Laser Beam
5 Electron Beam

برای انجام تحقیق مورد نظر، ابتدا گرده‌های فولاد زنگ‌نزن مطابق با استاندارد نمونه گرد تراشکاری شده، سپس از وسط به دو نیم شدند. از آنجایی که آلودگی‌های سطحی می‌تواند نقش منفی در لحیم‌کاری قطعات داشته و سبب ایجاد عیوبی در اتصال شود [۷]، این دو قطعه همراه استوانه کوچکی (به قطر نمونه‌های کشش برای بررسی متالوگرافی) قبل از جای‌گیری داخل فیکسچر به طور کامل با حلال استون شستشو و چربی‌گیری شده و توسط حرارت خشک شدند. ماده پُرکننده BNi2 نواری به اندازه مقطع نمونه کشش آماده و در فصل مشترک اتصال قرار گرفت. سپس قطعات مطابق شکل ۳ در فیکسچر قرار داده شدند. برای دستیابی به حداکثر هم‌راستایی و نیز تثبیت قطعات در حین حرارت‌دهی، از قطعه پشت‌بند در فیکسچر استفاده شد.

سپس نمونه‌های قرار گرفته در فیکسچر درون یک کوره لوله‌ای (شرکت یاران گروه مدل YTF 1700) قرار گرفته (شکل ۴) و نمونه‌ها با نرخ مشخصی گرم شده و سپس در دمای مورد نظر به مدت ۱ ساعت باقی ماندند و در نهایت با نرخ معینی سرد شدند (شکل ۵). برای انتقال بهتر دما به قطعات درون کوره، از یک لوله از جنس کوارتز استفاده شد. به منظور جلوگیری از اکسید شدن قطعات، حرارت‌دهی نمونه‌ها تحت گاز آرگون ۹۹/۹۹٪ انجام شد. پس از هر مرحله لحیم‌کاری، نمونه‌ها مورد آزمایش خواص مکانیکی در دمای محیط و متالوگرافی قرار گرفتند. نمونه‌های مورد آزمایش به وسیله دستگاه Shimadzu 25t و طبق استاندارد ASTM E8 مورد کشش قرار گرفتند و نمونه‌های لحیم شده برای متالوگرافی، برش خورده و سپس مانت سرد شدند. برای آماده‌سازی این قطعات از سنباده‌هایی با مش ۱۰۰۰-۱۸۰ استفاده شد. همچنین، برای بررسی نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری مدل Lieca DM 4000 M استفاده شد. در این مرحله کیفیت اتصال و رفتار فلز پُرکننده مشاهده و میزان نفوذ در فلز پایه، عیوب احتمالی اتصال و شناسایی فازهای تشکیل شده بررسی شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی AISI 316

Fe	S	P	Ni	Si	Mg max	Mo max	C max	درصد وزنی در فلز پایه
base	0.03	0.045	10-14	1.0	2	2-3	0.08	AISI 316



D	G	R	A
mm			
6.0±0.1	30±0.1	6	36

شکل ۱. نقشه نمونه کشش مطابق استاندارد ASTM E8

با توجه به تحقیقات انجام شده ماده پُرکننده AWS A5.8 CLASS BNi2 که در صنعت به نام AMS4777 شناخته می‌شود، نمونه‌ای از فلزات پُرکننده متداول پایه نیکلی است که تقریباً ۳/۵ درصد بور به عنوان عامل کاهنده دما برای کاهش نقطه ذوب به آن اضافه شده است (جدول ۲). این ماده به شکل نواری، خمیری و فویل قابل تهیه است که در این تحقیق نوع نواری آن انتخاب و تهیه شد (شکل ۲) [۵-۶].

جدول ۲. درصد ترکیب شیمیایی ماده پُرکننده BNi2

Others	C	Fe	Si	B	Cr	ماده پُرکننده
0.5 (max)	0.06	2.5-3.5	4-5	2.75-3.5	6-8	BNi2

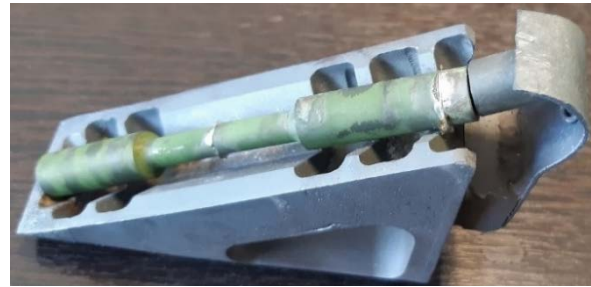


شکل ۲. نوار تهیه شده از ماده پُرکننده پایه نیکل BNi2

۳- یافته‌ها

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی مقطع نمونه‌های لحیم کاری شده در دماهای 1050°C تا 1200°C با دوره دمایی 50°C را نمایش می‌دهد. چنانچه در تصویر مشاهده می‌شود با افزایش دمای لحیم کاری، از میزان فازهای یوتکتیک شکننده برمید نیکل (خاکستری روشن) و کروم (خاکستری تیره) کاسته شده است. در واقع، با افزایش دما، بور بیشتری از فصل مشترک خارج شده و بنابراین فازهای یوتکتیک شکننده کمتری تشکیل می‌شود. این پدیده با توجه به ساختار آلیاژ قابل توجه و تحلیل است. به آلیاژ پُرکننده پایه نیکل BNi2 تقریباً $3/5$ درصد عنصر بور به‌عنوان عامل کاهنده دما برای کاهش نقطه ذوب اولیه اضافه شده است (این امر با تشکیل ترکیبات یوتکتیک با نقطه ذوب پایین انجام می‌شود) اتم بور در مقایسه با اتم های نیکل، کروم، آهن و سیلیسیوم موجود در آلیاژ بسیار کوچکتر است [۱ و ۶]. بنابراین، اتم بور به‌عنوان اتم جانشین در زمینه آلیاژ قرار نمی‌گیرد بلکه به‌عنوان اتم درون شبکه‌ای یا بین‌نشین شناخته شده و در فضای کوچک بین اتم‌های بزرگتر می‌نشیند. اتم‌های بین‌نشین پیوند محکمی با اتم‌های جانشین در زمینه نداشته و از این رو قادرند خیلی راحت‌تر وارد شده یا زمینه را ترک کنند. با افزایش دما به دلیل لرزش و نوسان بیشتر اتم‌ها، انبساط اتفاق افتاده و فضای بین اتم‌ها با افزایش دما، افزایش می‌یابد. در این شرایط اتم‌های کوچک بور به دلیل اندازه کوچک و پیوند ضعیف با اتم‌های زمینه (بعنوان اتم بین‌نشین) و نیز با توجه به فضای باز ایجاد شده بین اتم‌های اصلی، شرایط کافی برای خروج از زمینه را به‌دست می‌آورند و در نتیجه میزان تشکیل فازهای یوتکتیک و شکننده برمید کروم و برمید نیکل در فلز پُرکننده (محل اتصال)، در نبود عنصر بور کاهش می‌یابد.

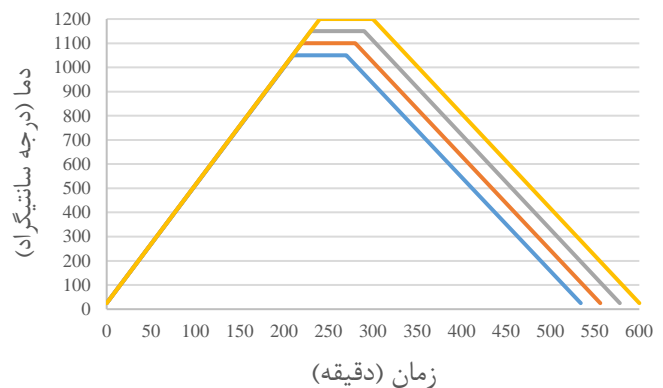
علاوه بر این و از آنجایی که بور برای کاهش نقطه ذوب به آلیاژ اضافه شده است، با خروج بور از آلیاژ (نفوذ به فلز پایه) و دور شدن ترکیب شیمیایی آلیاژ از نقطه یوتکتیک، دمای نقطه ذوب مجدداً افزایش می‌یابد. بنابراین، در حین لحیم کاری و در حالی که قطعات به اندازه کافی در دمای موجود کوره نگه داشته شده‌اند، قسمتی از فلز پُرکننده می‌تواند کامل انجماد پیدا کند. در حقیقت فرایند انجماد فلز پُرکننده در حالتی که کوره در دمای ثابت نگهداشته شده است، اتفاق می‌افتد (انجماد هم‌دما). در حقیقت نفوذ بور تا



شکل ۳. طرح نهایی فیکسچر با استفاده از فنر و قطعه پشت‌بند

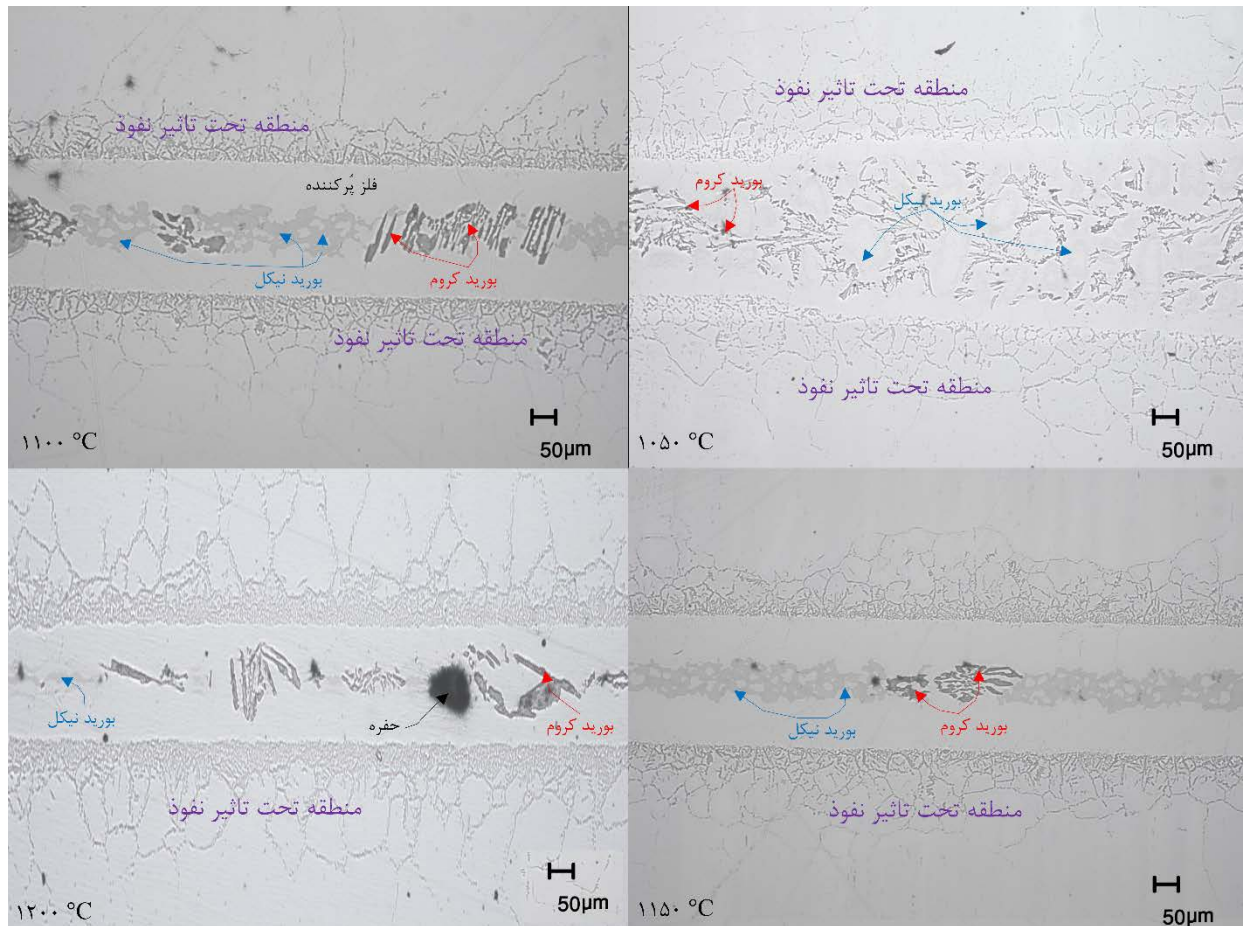


شکل ۴. کوره مدل یاران تحت گاز آرگون



شکل ۵. دماهای لحیم کاری سخت نمونه‌های فولاد زنگ نزن با فلز پُرکننده BNi2

مقدار تعادلی ادامه پیدا می کند و درصد وزنی آن در آلیاژ لحیم به صفر نمی رسد بنابراین باقی مذاب آلیاژ لحیم بعد از کاهش دمای کوره منجمد می شود (انجماد غیر هم دما) [۸].



شکل ۶. ریزساختار فلز پایه و محل اتصال لحیم کاری در دماهای مختلف با بزرگنمایی $\times 100$ (As Polished)

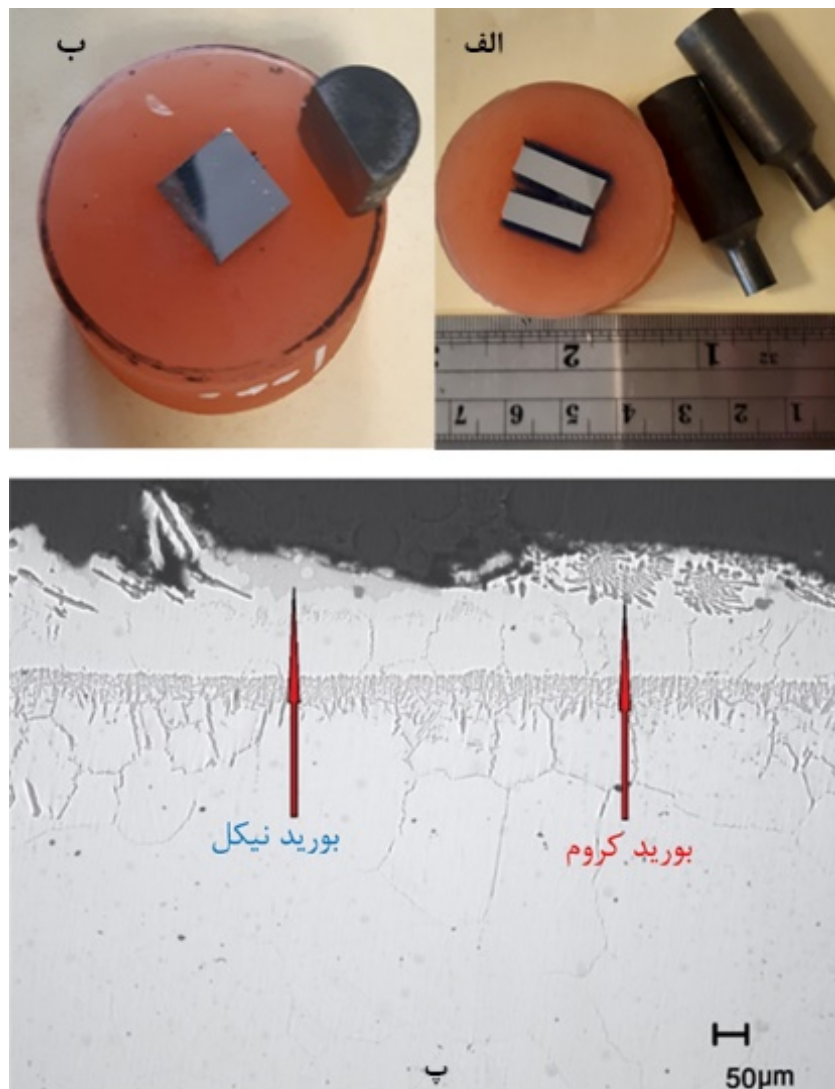
و شکننده آن‌ها، محل مناسبی برای شروع ترک و در نهایت عامل اصلی شکست نمونه‌های کشش است. بنابراین هم‌چنان که دمای لحیم کاری افزایش می‌یابد به دلیل پدیده نفوذ، عناصر بور و سیلیسیوم به داخل فلز پایه نفوذ کرده و از میزان فازهای شکننده بین‌فلزی در این مناطق کاسته شده و استحکام شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۸ و شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه شماره ۲ هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انجام آنالیز عنصری

از جمله اقدامات تکمیلی که در کنار بررسی‌های متالوگرافی انجام گرفت تحلیل شکست نمونه‌های کشش و بررسی مقاطع آن‌ها بود. به این منظور نمونه‌ای که تحت آزمون کشش قرار گرفته است، ابتدا به طور طولی برشکاری شده و سپس مانند سایر نمونه‌ها مانت و آماده‌سازی شد. در بررسی مقطع شکست نمونه‌ها مشاهده شد که شروع شکست از منطقه میانی اتصال لحیم اتفاق می‌افتد (شکل ۷). در این مناطق فازهای یوتکتیک بیشتری مشاهده شد که با توجه به ماهیت ترد

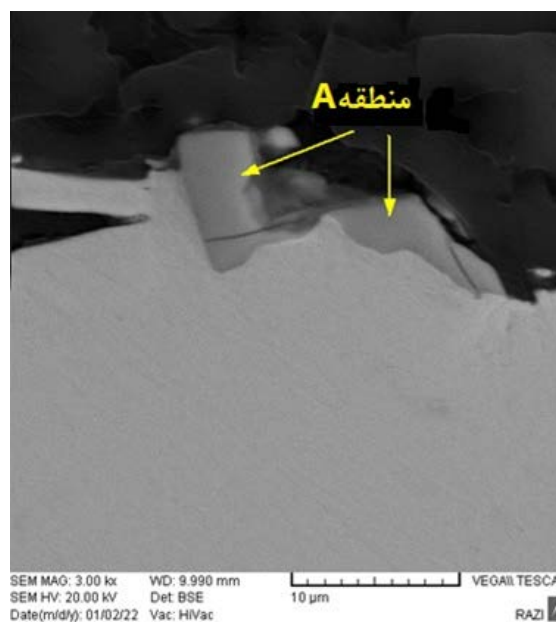
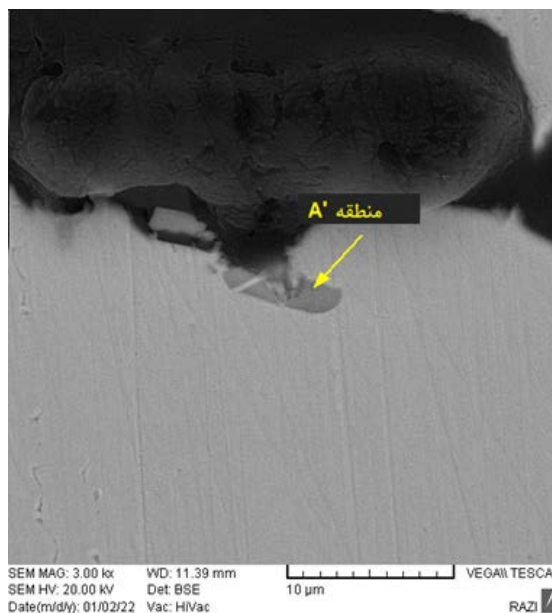
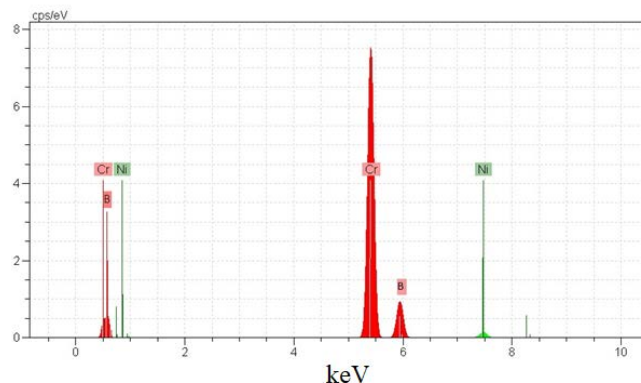
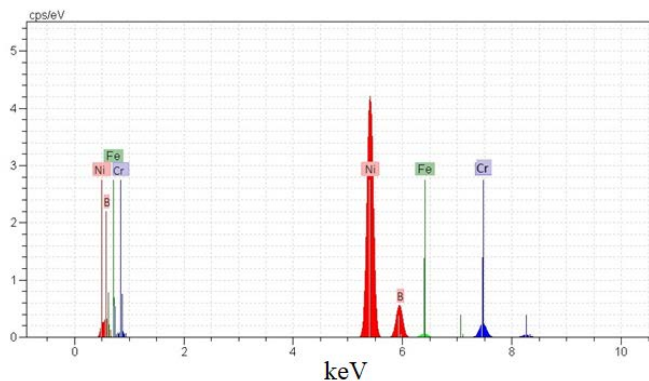
محل اتصال از 124 MPa تا 234 MPa افزایش می یابد. این دما حداکثر دمایی است که می توان با توجه به نوع فلز پُرکننده استفاده کرد. افزایش دمای لحیم کاری باعث خروج بیشتر و سریع تر عنصر بور (B) از فلز پُرکننده لحیم می شود. در نتیجه ترکیب های بین فلزی ترد مانند بورید کروم و بورید نیکل کمتری تشکیل شده و امکان جوانه زنی ترک در محل فصل مشترک زمینه و عناصر بین فلزی را کاهش می دهد و باعث افزایش استحکام محل اتصال لحیم کاری می شود [۱، ۶، ۱۱-۹].

بر روی ترکیب های بین فلزی در مقطع شکست، ترکیب بین فلزی بورید کروم (شکل ۸) و بورید نیکل (شکل ۹) شناسایی شده است. ترکیب شیمایی این عناصر نزدیک به ترکیب بین فلزی بورید کروم (جدول ۳) و بورید نیکل (جدول ۴) است.

نتایج بررسی استحکام کشش نمونه های لحیم کاری شده در چهار دمای 1050°C ، 1100°C ، 1050°C و 1200°C در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر این اساس، با افزایش دما استحکام کشش



شکل ۷. (الف) سطح مقطع نمونه متالوگرافی (ب) سطح مقطع شکست نمونه کشش (پ) فازهای شکننده در مقطع شکست نمونه دیده می شوند. $\times 100$ (As Polished)



شکل ۹. نتیجه بررسی SEM و شناسایی و آنالیز فاز بین فلزی Ni/B

شکل ۸. نتیجه بررسی SEM و شناسایی و آنالیز فاز اینترمتالیک Cr/B

جدول ۴. نتایج طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) منطقه A' نمونه شماره ۱ (ترکیب بین فلزی Ni/B)

درصد وزنی	سری طیف	عنصر
۹/۲۳	سری طیف K	کروم
۸۵/۴۰	سری طیف K	نیکل
۱/۹۶	سری طیف K	آهن
۳/۴۱	سری طیف K	بور
۱۰۰	درصد وزنی کل	

جدول ۳. نتایج طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) منطقه A نمونه شماره ۲ (ترکیب بین فلزی Cr/B)

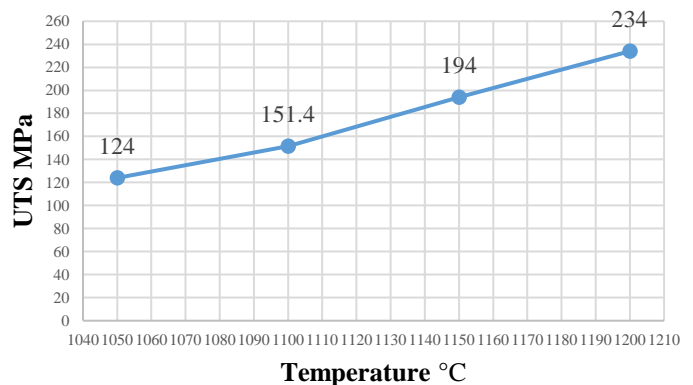
درصد وزنی	سری طیف	عنصر
۸۰/۵۸	سری طیف K	کروم
۳/۴۹	سری طیف K	نیکل
۱۵/۹۳	سری طیف K	بور
۱۰۰	درصد وزنی کل	

مراجع

- [1] E. B. W. Sandy Babich, "Development of Low Cost Braze Alloys for Aerospace Applications." San Luis Obispo, California Polytechnic State University, JUNE 2017.
- [2] D. Apelian, "Introduction to Furnace Brazing, Air Products and chemical Inc, April 2001.
- [3] NASA, "Aerojet rocketdyne plan busy RS-25 test schedule for 2021".
- [4] D. Krohn, space shuttle verier thruster long-life chamber development, Houston, Texas, 1990.
- [5] T. Hartmann, D.Nutzal, "Ni-Cr based amorphous brazing foils for continuous furnace brazing of stainless steel", 9th international conference of brazing, high temperature brazing and diffusion bonding, Aachen, Germany, 2010.
- [6] Y-W. Lee, J-H. Kim, "Mechanical strenght and microstructure characterization of SUS304 brazed joints with Bni2 filler metal: influence of brazing temperature and time," Sungkyunkwan University, Korea, 2007.
- [7] THESSCO.COM, Brazing Troubleshooting.
- [8] D. Kay, "Iso thermal solidification www.kaybrazing.com", 2013 [Online].
- [9] P. K.C haurasia, S. Murugesan., "Effect of brazing temperature on the microstructure of martensitic-austenitic steel joints," Metallurgy and Material group, center of Atomic Research, Kalpakkam, India, 2017.

[۱۰]. ا. توکلی الهی، ع. اکبری موسوی، "اتصال آلیاژ مومل ۴۰۰ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به روش لحیم کاری سخت در خلا و بررسی تاثیر دما بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال"، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی، تهران، ایران، ۱۳۹۸.

- [11] A. J. A. Buschinelli, L. F. L. Duarte, "High temperature brazing of Inconel and stainless steel composition for a satellite thruster propulsion", 18th international congress of mechanical engineering, 2005.



شکل ۱۰. افزایش استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش دمای لحیم کاری سخت

۴- نتیجه‌گیری

مطابق اقدامات و بررسی‌های انجام شده در این تحقیق بر روی لحیم کاری سخت نمونه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316 و سپس بررسی مکانیکی و متالوگرافی آن‌ها نتایج زیر حاصل شد:

۱. مطابق نتایج گزارش‌های کشش با افزایش دمای لحیم کاری استحکام مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
۲. عنصر بور موجود در آلیاژ پرکننده BNi2 در لحیم کاری نمونه‌های فولادی سبب تشکیل فازهای شکننده برمید کروم و نیکل در ساختار می‌شود.
۳. طبق بررسی‌های متالوگرافی، با بالا رفتن دمای لحیم کاری و نفوذ اتم‌های بور به فلز پایه، از میزان فازهای اینترمتالیک تُرد و شکننده در منطقه اتصال لحیم کاسته می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

با تشکر و قدردانی از جناب آقای مهندس فریدون طوسی نژاد کارشناس آزمایشگاه متالوگرافی و سرکار خانم مهندس سعیده کوشکی زمانی کارشناس آزمایشگاه مکانیکی پژوهشکده حمل و نقل پژوهشگاه فضایی ایران، که کمک شایانی در بررسی و تحلیل ریزساختاری و خواص مکانیکی این تحقیق انجام داده اند.



COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)