E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 2, 2024



Brazing of 17-4 PH stainless steel to Ti-6Al-4V alloy using BNi-2 filler metal

A. Ardalani , H. Naffakh-Moosavy*
Material Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received 12 October 2023 ; Accepted 28 November 2023

Abstract

In this research, the effect of temperature and time parameters are investigated on the microstructure and mechanical properties of dissimilar brazing of 17-4 PH stainless steel and Ti-6Al-4V alloy with BNi-2 filler metal. The microstructure of the joint is evaluated with optical and scanning electron microscopes and the mechanical properties of the joint are also evaluated with tensile-shear and microhardness tests. It can be seen that at a constant temperature of 1050°C, increasing the time from 15 to 30 minutes decreases the shear strength from 34.66 to 29.39 MPa. Formation of brittle intermetallic compounds like NiTi2 and FeTi2 increase strength and promote brittle fracture.At a fixed time of 15 minutes, increasing the temperature from 1050 to 1100 °C causes the strength to increase from 34.66 to 38.46 MPa. Also, the increase in temperature and time increases the ISZ thickness formed in the joints on the side of the filler metal - Ti-6Al-4V from 41.40 to 81.48 microns. The increase in temperature and time also causes more diffusion of boron into the SS-filler joint, which forms various boron compounds and widens this region.

Keywords:Brazing,microstructure,mechanical properties,17-4 PH Stainless steel,Ti-6Al-4V.

Corresponding Author: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402



لحیمکاری سخت فولاد 17-4PH به آلیاژ Ti-6Al-4V با فلزپرکننده BNi-2

امیررضا اردلانی، همام نفاخ موسوی *

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1402/06/29 ؛ پذیرش مقاله: 1402/08/30

چکیده

در این پژوهش به بررسی پارامترهای دما و زمان بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد 17-4PH و آلیاژ Ti-6Al-4V با فلزپرکننده BNi-2 و به روش لحیمکاری سخت پرداخته می‌شود. ریزساختار اتصال با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و خواص مکانیکی اتصال نیز با تست کشش - برش و میکروسختی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مشاهده می‌شود که در دمای ثابت 1050°C، افزایش زمان از 15 به 30 دقیقه باعث کاهش استحکام برشی از 34/66 به 29/39 مگاپاسکال می‌شود. وجود ترکیبات ترد بین فلزی مانند $NiTi_2$ و $FeTi_2$، باعث شکست ترد و کاهش استحکام می‌شوند. در زمان ثابت 15 دقیقه، افزایش دما باعث می‌شود که استحکام از 34/66 به 38/46 مگاپاسکال افزایش یابد. همچنین افزایش دما– زمان باعث افزایش پهنای ISZ تشکیل شده در اتصالات در سمت فلزپرکننده Ti-6Al-4V از 41/40 به 81/48 میکرون می‌شود. افزایش دما– زمان همچنین موجب نفوذ بیشتر بور به فصل مشترک فولاد– فلزپرکننده شده که ترکیبات بورایدی مختلفی را تشکیل می‌دهد و باعث عریض‌تر شدن این ناحیه می‌شود.

کلمات کلیدی: لحیمکاری سخت، ریزساختار، خواص مکانیکی، فولاد 17-4PH، Ti-6Al-4V.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

1- مقدمه

امروزه اتصال بین آلیاژ Ti-6Al-4V و فولادهای زنگ‌نزن به روش لحیمکاری سخت، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. پارامترهای مختلفی از جمله ترکیب شیمیایی فلزپایه و پرکننده، دما و زمان لحیمکاری، روش حرارت دهی، اتمسفر و فلاکس بر خواص اتصال تاثیر می‌گذارند [1]. لحیمکاری فرایند ساده‌ای دارد و یک اتصال اقتصادی با استحکام و چقرمگی مناسب تشکیل می‌دهد اما به دلیل تفاوت در ضریب هدایت حرارتی مواد، تنش‌های پسماند نیز در کنار ترکیبات ترد بین فلزی در اتصال ایجاد می‌شوند [2و3].

فلزات پرکننده با ترکیبات مختلفی در لحیمکاری قابل استفاده می‌باشند. دسته‌بندی این فلزات و کاربرد آن‌ها در استانداردهای AWS A5.8 و ISO 17672 آورده شده است [4و5]. فلزات پرکننده با ترکیبات آلیاژی نسبت به ترکیبات تک عنصره، خواص مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند [6]. ترکیبات یوتکتیکی به دلیل نقطه ذوب پایین و ایجاد اتصال چقرمه، در لحیمکاری کاربرد گسترده‌ای دارند [7]. فلزات پرکننده پایه نیکل عموما به دلیل دربرداشتن مقاومت به خوردگی و حرارتی بالا، کاربرد گسترده‌ای دارند. اتصالات انجام شده با این فلزات‌پرکننده می‌تواند در دماهای بالا، دماهای محیط و دماهای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

برابر با اکسیژن مایع، هلیوم یا نیتروژن مورداستفاده قرار گیرد.

فولاد PH 17-4 یکی از فولادهای پراستفاده با ساختار مارتنزیتی و از دسته فولادهای زنگ‌نزن رسوب‌سخت‌شونده با کروم - مس است که در صنایع مختلف و دما بالا از جمله نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع هسته‌ای، کارخانه‌جات کاغذسازی و موتورهای جت کاربرد گسترده‌ای دارد [7].

در آلیاژ Ti-6Al-4V، عنصر وانادیوم به عنوان پایدارکننده فاز بتا و انحلال آلومینیوم به عنوان پایدارکننده فاز آلفا عمل می‌کند. بنابراین این آلیاژ به دسته آلیاژهای آلفا-بتا تعلق دارد و به روش‌های محلول‌سازی یا پیرسازی می‌توان استحکام آن‌را افزایش داد [8،9].

به دلیل اینکه عملیات لحیمکاری در دماهای بالا انجام می‌شود، ریزساختار فلزپایه می‌تواند دچار تغییر شود. برای آلیاژهای تیتانیوم بتا، آلفا و نزدیک به آلفا، عملیات لحیمکاری باید در دمایی کمتر از دمای استحاله بتا انجام شود تا از استحاله فازی که موجب تغییر در خواص ماده و اتصال می‌شود، جلوگیری شود. در خصوص آلیاژهای آلفا- بتا مانند آلیاژ Ti-6Al-4V، لحیمکاری در دماهای بالای استحاله بتا بحرانی نیست، زیرا کاهش چقرمگی و خواص مکانیکی فلزپایه می‌تواند با عملیات حرارتی بعد از لحیمکاری جبران شود [10]. اتصالات مختلفی بین این دو آلیاژ صورت‌گرفته است. اتصالات جوشکاری بین این دو می‌تواند با لایه واسطه از جنس وانادیوم یا مس انجام شود. وجود ترکیبات ترد بین‌فلزی مانند FeTi و Fe_2Ti، موجب تجمع تنش و رشد ترک در جوشکاری این دو آلیاژ می‌شود [11].

وانادیوم نقش مهمی در جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی دارد [12]. همچنین استفاده از مس باعث حذف ترک‌های ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی در حوضچه جوش می‌شود [13]. شیو و همکارانش [14] در پژوهشی دریافتند که وجود یک پوشش rC/Ni بر سطح فولاد می‌تواند استحکام اتصال لحیمکاری بین فولاد PH 17-4و آلیاژ Ti-6Al-4V با فلزپرکننده پایه نقره را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. میانگین استحکام برشی این اتصال بدون استفاده از پوشش Ni/Cr از 22 تا 96MPa در دما و زمان‌های مختلف متغیر است. استفاده از پوشش Ni/Cr می‌تواند استحکام برشی این اتصال را به 233MPa نیز برساند. به دلیل مشکلات جوشکاری بین این دو آلیاژ، از روش اتصال نفوذی و با استفاده از یک لایه واسطه از جنس آلیاژ نیکل استفاده شد. مشخص شد که تا دمای 900°C و زمان 15 دقیقه، لایه واسطه می‌تواند از نفوذ آهن به آلیاژ تیتانیوم و نفوذ تیتانیوم، وانادیوم و آلومینیوم به داخل فولاد جلوگیری کند اما در دما و زمان بیشتر، لایه واسطه نمی‌تواند نقش خود را به‌خوبی اجرا کند و موجب تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلفی مانند λ+Fe_2Ti وNi_3Ti می‌شود [15].

به طور کلی ناحیه اتصال از سه قسمت تشکیل می‌شود: منطقه متاثر از نفوذ، منطقه انجمادی همدما و منطقه انجمادی حرارتی. با افزایش زمان لحیمکاری، مقادیر فازهای ترد در ASZ کاهش می‌یابد [16]. همچنین افزایش زمان – دمای لحیمکاری با فویل BNi-2، باعث تشکیل ترکیبات یوتکتیک غنی از کروم و بور در مرکز ISZ شده و به تدریج باعث حذف ASZ می‌شود [17].

با وجود مشکلاتی در جوشکاری آلیاژ Ti-6Al-4V به فولاد PH 17-4 مانند تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد، مستعد بودن به جذب اکسیژن و تفاوت در ضریب هدایت حرارتی، نیازمندی به روش جدیدی برای اتصال این دو آلیاژ حس می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از فلزپرکننده BNi-2 به‌منظور تشکیل یک اتصال قابل‌قبول بین آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد PH 17-4 و رسیدن به یک دما و زمان بهینه برای تشکیل این اتصال بین این دو آلیاژ می‌باشد.

2-روش انجام آزمایش

در این پژوهش از آلیاژهای Ti-6Al-4V و فولاد PH 17-4 به‌عنوان فلزات پایه و از فلزپرکننده BNi-2 استفاده شده است که ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول‌های(3-1) آورده شده است.

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد PH 17-4.

%	Fe	C	Mn	Cr	Ni	Cu
17-4 PH	پایه	0/036	0/68	15/7	4/5	3/8

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

جدول2-ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V.

%	Ti	Na	Al	Si	V
Ti-6Al-4V	پایه	0/506	5/56	0/137	3/075

جدول3-ترکیب شیمیایی فلزپرکننده BNi-2.

%	Ni	Fe	Cr	Si	B
BNi-2	پایه	2/97	6/63	4/59	3/06

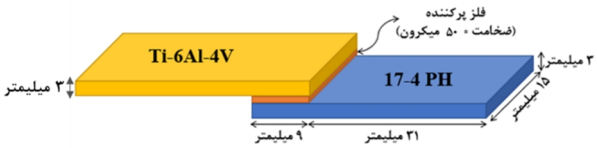
فویل پایه نیکل BNi-2 (Ni-(6-8)Cr-(2.75-3)B-(2.5-3.5)Fe)، بازه دمایی کوچک و سیلان بهتری نسبت به فویل BNi-1 دارد. دمای لیکوئیدوس، سالیدوس و بازه دمایی مناسب لحیمکاری برای این فلزپرکننده در جدول مشخص شده است [4].

جدول4 - بازه‌های دمایی فویل BNi-2.

	دمای سالیدوس °C	دمای لیکوئیدوس °C	بازه دمایی لحیمکاری °C
فویل BNi-2	971	999	1205-1080

وجود بور و سیلیکون در ترکیب فویل BNi-2، اگرچه به‌عنوان عناصر کاهنده نقطه ذوب عمل می‌کنند؛ اما احتمال تشکیل فازهای ترد و شکننده را بیشتر می‌کنند که باعث افت خواص مکانیکی نیز می‌شوند [7].

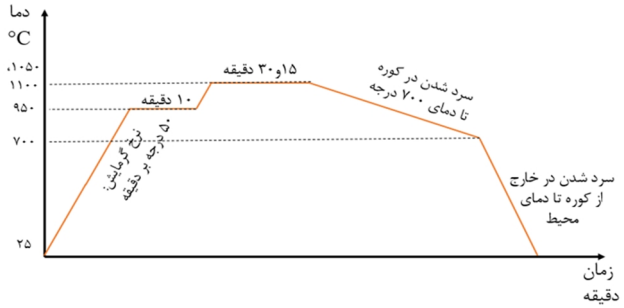
عدد سختی اولیه برای فولاد PH 4-17 برابر 334 و برای آلیاژ Ti-6Al-4V برابر 303 ویکرز می‌باشد. اتصالات در کوره و تحت اتمسفر گاز آرگون و در دماهای 1050 و 1100°C و در زمان‌های 15 و 30 دقیقه صورت‌گرفته است. طرح اتصال نمونه‌ها و ابعاد موردنیاز برای آزمون برشی طبق استاندارد JIS Z3192 [18] بوده و به‌صورت زیر می‌باشد:



شکل 1- طرح اتصال مورداستفاده در این پژوهش.

طرح اتصال به صورت لبه روی هم می‌باشد. سیکل حرارتی پیاده شده بر روی اتصالات در شکل(2) آورده شده است.

نگهداری به مدت زمان 10 دقیقه در دمای 950°C، به منظور رسیدن دمای واقعی کوره به دمای اسمی می‌باشد.



شکل 2- سیکل حرارتی کوره.

بررسی ریزساختار به‌وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت‌گرفته است. به‌منظور مشخص‌شدن ریزساختار فلزات پایه، از محلول‌های حکاکی Kroll و Frey به مدت‌زمان 45 و 15 ثانیه و به ترتیب برای آلیاژ Ti-6Al-4V و فولاد PH 4-17 استفاده شد. ترکیبات این دو محلول در جدول(5) آورده شده است.

جدول5 - ترکیبات محلول‌های حکاکی استفاده شده.

محلول	ترکیب شیمیایی
Kroll	HNO_3-HF :92:6:2-آب‌مقطر
Frey	HCl-CuCl2(g)-آب‌مقطر : 20:2,5:15:13 الکل

همچنین برای ارزیابی خواص مکانیکی، از میکروسختی سنجی ویکرز و آزمون برشی استفاده شد از هر اتصال، سه نمونه برای تست برشی و یک نمونه برای بررسی‌های ریزساختاری انتخاب و در کوره قرار گرفته شد.

3-نتایج و بحث

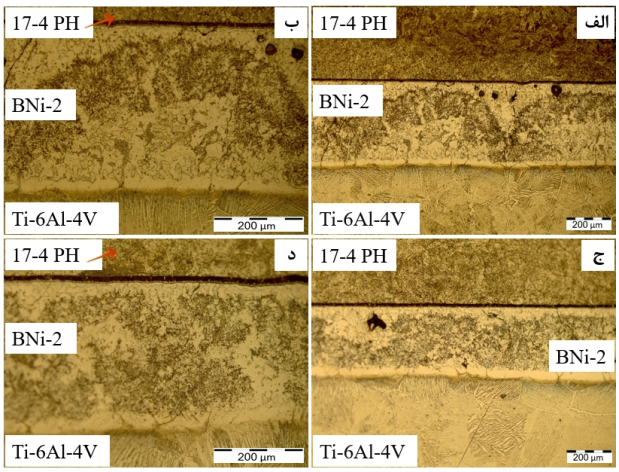
3-1-بررسی ریزساختاری اتصالات انجام شده

تصاویر میکروسکوپ نوری اتصالات انجام شده در دمای 1050°C در شکل(3) آورده شده است.

مقایسه بین زمان‌های 15 و 30 دقیقه در دمای ثابت 1050°C نشان می‌دهد که تیتانیوم، به مقدار بیشتری نسبت به آهن در فلزپرکننده حل شده و فاز بتا تشکیل داده است [15]. حفرات مختلفی که در ناحیه اتصال دیده می‌شوند، ناشی از موارد

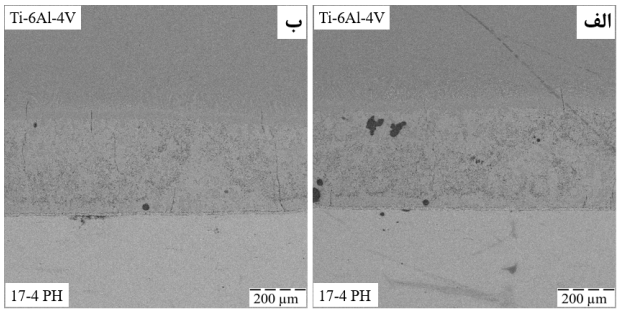
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

مختلفی می‌باشند. برخی از حفرات ریز، به دلیل وجود اثر کرکندال می‌باشند. به دلیل بیشتر بودن نفوذپذیری نیکل نسبت به تیتانیوم، در سمتی که نیکل وجود دارد، حفرات کوچکی تشکیل می‌شوند [20،19]. البته در زمان 15 دقیقه نسبت به زمان 30 دقیقه، حفرات کرکندال بسیار کمتری وجود دارد و می‌توان گفت که عملا این حفرات کرکندال تشکیل نمی‌شوند. درصد دیگری از این حفرات، ناشی از تبخیر برخی از ترکیبات با دمای ذوب پایین است که موجب ایجاد تخلخل در ناحیه اتصال می‌شود. برخی دیگر از حفرات، حفرات انقباضی می‌باشند که در زمان انجماد فلزمذاب و به دنبال آن، کاهش حجم به وجود می‌آیند. همچنین افزایش زمان در دمای ثابت، موجب افزایش حجم ترکیبات بین‌فلزی شده که موجب کاهش استحکام نیز می‌شود [21].



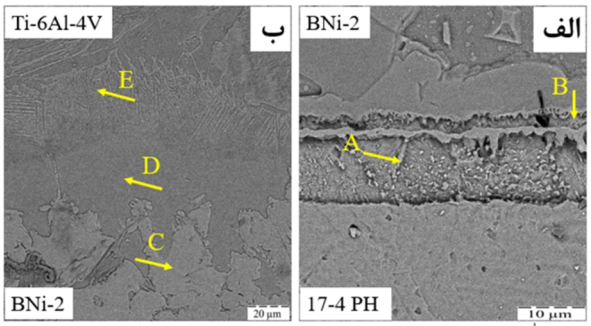
شکل 3- ریزساختار اتصالات انجام شده در دمای 1050°C و زمان‌های الف و ب-15 ج و د-30 دقیقه.

در فصل مشترک فلزپرکننده و فولاد 17-4 PH، یک لایه تشکیل شده که نشان‌دهنده‌ی ترکیب بین‌فلزی Fe_2Ti و ترکیبات غنی از کروم است. وجود تیتانیوم در این منطقه، نشان‌دهنده حلالیت زیاد تیتانیوم در نیکل است که این میزان به 10 درصد برای فاز بتا تیتانیوم می‌رسد [22]. از طرفی در فصل مشترک فولاد – فلزپرکننده نیز حفرات کرکندال وجود دارند. علت وجود این حفرات در آن منطقه، تفاوت در نفوذپذیری بور، نسبت به آهن و کروم است که موجب می‌شود بور با نرخ بیشتری در فولاد نفوذ کند، در حالی‌که آهن وکروم با نرخ کمتر در فلز پرکننده نفوذ می‌کنند. همین اتفاق موجب به وجود آمدن حفرات کرکندال در ناحیه اتصال می‌شود [23]. نفوذ بور در دو سمت، باعث تشکیل یک لایه از ترکیبات بور در فصل مشترک می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی اتصال انجام شده در دمای 1050 °C و زمان 15 دقیقه به‌صورت زیر می‌باشد.



شکل 4- تصاویر SEM از اتصال انجام شده در دمای 1050°C و زمان 15 دقیقه.

وجود برخی از حفرات بزرگ در ناحیه اتصال، به دلیل انجام عملیات لحیمکاری در دمای بالا است [24]. برخی دیگر از این حفرات بزرگ نیز به دلیل کنده شدن ترکیبات بین فلزی به وجود می‌آیند. به منظور بررسی ترکیب شیمیایی در ناحیه اتصال، از آنالیز EDS استفاده شده است که نتایج آن به‌صورت زیر می‌باشد:



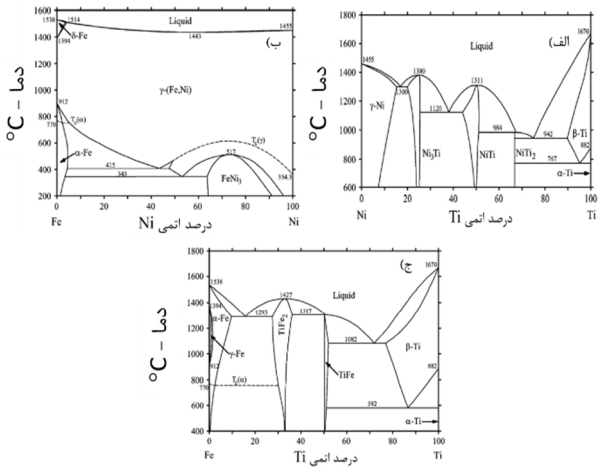
Cu	Ni	Fe	Cr	V	Ti	Si	Al	At.%
۸/۵	۳/۱	۵۴/۳	۱۹/۷	۲/۰	۶/۵	۲/۸	۲/۷	A
۲/۷	۴/۹	۴۶/۳	۷/۸	۰	۲۸/۵	۵/۱	۴/۲	B
۲/۵	۱۸/۴	۸/۲	۳/۱	۰	۵۴/۸	۳/۵	۹/۲	C
۱/۸	۴/۴	۴/۵	۳/۵	۴/۲	۶۵/۱	۲/۸	۱۳/۲	D
۱/۵	۳/۳	۲/۱	۱/۱	۳/۱	۷۲/۷	۲/۲	۱۳/۵	E

شکل 5 - آنالیز EDS نقطه‌ای از فصل مشترک فلزات پایه با فلزپرکننده در اتصال با دمای 1050°C و زمان 15 دقیقه.

عناصر کربن و بور به دلیل سبک بودن، در آنالیز EDS مشارکت نمی‌کنند. مشخص است که در سمت فولاد، احتمالا ترکیبات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

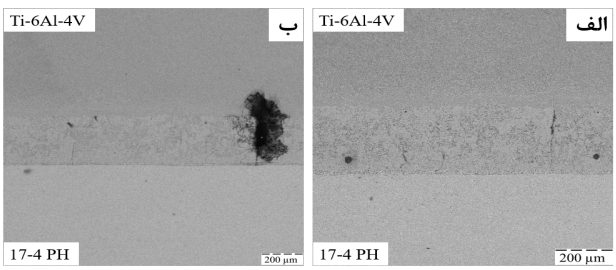
بورایدی (نقطه A)، ترکیبات غنی از کروم و ترکیبات ترد بین فلزی Fe-Ti (نقطه B) تشکیل شده است که می‌تواند بر خواص اتصال، اثر منفی بگذارد. این ترکیبات می‌توانند در ساختار خود کربن و بور را نیز داشته باشند. همچنین در سمت Ti-6Al-4V، ترکیب بین فلزی Ti_2Ni (نقطه C) مشاهده می‌شود که از یک استحاله حالت جامد به وجود می‌آید [25]. طبق دیاگرام فازی دوتایی Ni-Ti، پایداری این فاز دردماهای پایین‌تر از 984°C است که نشان می‌دهد این فاز در حین سرمایش تشکیل شده است [22]. وجود این ترکیبات باعث افزایش تردی اتصال خواهد شد.



شکل 6- دیاگرام فازی دوتایی الف- Ni-Ti ب- Fe-Ni ج- Fe-Ti [22].

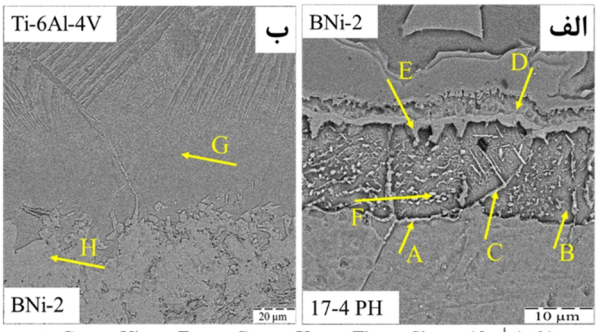
به دلیل نفوذ شدید بور از فلزپرکننده به داخل فولاد، یک تخلیه اتفاق می‌افتاد که همین موجب تشکیل ترکیبات Fe-Cr-B در ناحیه فصل مشترک می‌شود [23] که در شکل(5) با نقطه A مشخص است.

برای اتصال انجام شده در دمای 1050°C و زمان 30 دقیقه، تصاویر SEM به‌صورت زیر می‌باشد.



شکل 7- تصاویر SEM از اتصال انجام شده در دمای 1050°C و زمان 30 دقیقه.

آنالیز ترکیب شیمیایی توسط EDS نقطه‌ای در شکل(8) آورده شده است.



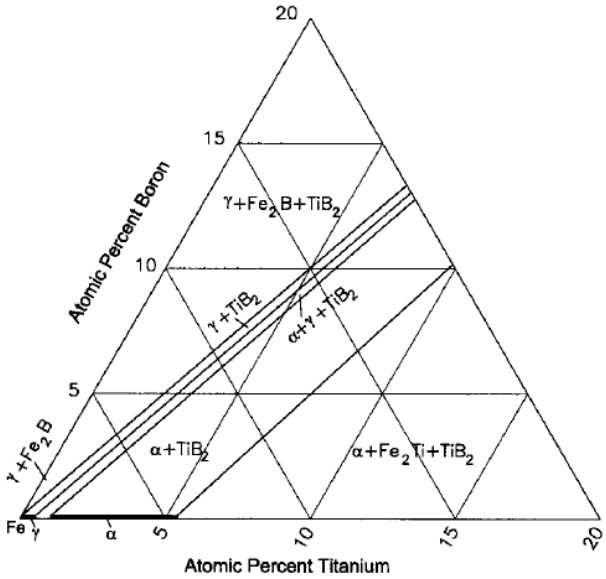
At.%	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Cu
A	۴/۱	۴/۶	۵/۹	۰	۱۴/۹	۵۵/۰	۴/۶	۱۰/۷
B	۳/۵	۳/۷	۴/۴	۲/۹	۱۹/۵	۶۰/۸	۴/۰	۵/۳
C	۴/۳	۳/۹	۷/۱	۰	۱۸/۰	۵۴/۳	۳/۹	۸/۱
D	۴/۲	۵/۷	۲۸/۵	۰	۸/۶	۴۴/۸	۴/۲	۳/۶
E	۳/۴	۳/۹	۱۰/۴	۰	۱۹/۸	۵۴/۲	۳/۲	۴/۸
F	۵/۶	۵/۲	۷/۹	۰	۱۳/۸	۳۴/۸	۵/۳	۲۸/۱
G	۸/۴	۴/۰	۵۴/۹	۰	۳/۷	۹/۸	۱۹/۰	-
H	۱۳/۸	۲/۸	۶۴/۳	۴/۱	۴/۱	۵/۶	۵/۸	-

شکل 8- آنالیز EDS نقطه‌ای از فصل مشترک فلزات پایه با فلزپرکننده در اتصال با دمای 1050°C و زمان 30 دقیقه.

نقاط A و B، نشان‌دهنده ترکیبات بورایدی هستند که در مقایسه با شکل(5)، مشخص است که حجم بیشتری دارند. طبق دیاگرام دوتایی Fe-Ni می‌توان گفت که دو عنصر آهن و نیکل، فقط یک ترکیب بین‌فلزی $FeNi_3$ تشکیل می‌دهند که پایداری آن در دمای کمتر از 517°C است که در این اتصالات مشاهده نمی‌شوند. عناصر آهن و نیکل در این اتصالات به‌صورت محلول جامد γ-(Fe,Ni) حضور دارند [22]. ترکیبات کروم-بوراید و نیکل-بوراید نیز در اتصال تشکیل می‌شوند. مشخص است که افزایش زمان، حجم بیشتری از ترکیبات را در ناحیه فصل مشترک فولاد – فلزپرکننده تشکیل می‌دهد که همین اتفاق می‌تواند دلیل کاهش استحکام اتصالات در دمای ثابت و زمان بیشتر باشد. از طرفی نفوذ آهن در فلزپرکننده نیز مشاهده می‌شود که به دلیل وجود تیتانیوم در آن منطقه، ترکیب لاوه غنی از آهن Fe_2Ti تشکیل می‌شود که می‌تواند Si و Al را تا مقادیر زیادی در خود حل کند [26]. از آنجایی‌که عناصر بور و کربن در آنالیز EDS مشارکت نمی‌کنند، می‌توان گفت که ترکیبات Fe_2Ti می‌توانند شامل کربن و بور در ساختار خود نیز باشند. همان‌طور که در شکل(9) مشخص است، ترکیبات Ti-B و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

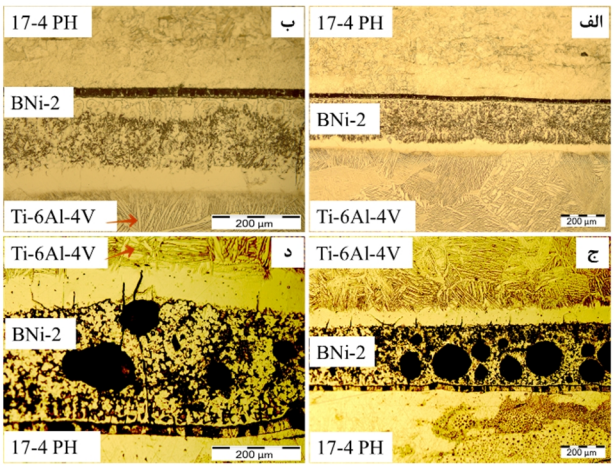
Fe-B نیز امکان تشکیل را دارند. عمده این ترکیبات، فاز ترد TiB_2 می‌باشند.



شکل 9- دیاگرام سه‌تایی Fe-Ti-B در دمای 1000°C [27].

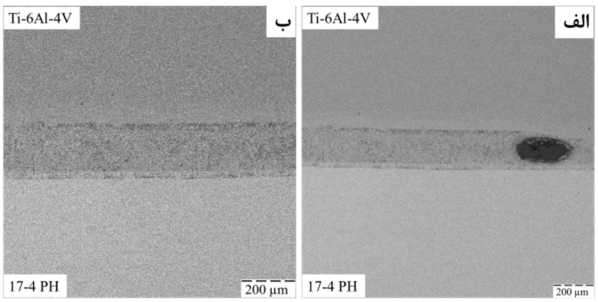
نقاط C و E، نشان‌دهنده ترکیبات Fe-Cr-B می‌باشند که ناشی از نفوذ بور به فصل مشترک فولاد – فلز پرکننده است. نقطه D، ترکیب بین فلزی Fe_2Ti را نشان می‌دهد. نقطه F ذرات مس موجود در ترکیب فولاد را نشان داده که با بور و آهن، در فصل مشترک ترکیب تشکیل داده‌اند. نقاط G و H نیز ترکیب نزدیک به آلیاژ Ti-6Al-4V را دارند.

تصاویر میکروسکوپ نوری از اتصالات انجام شده در دمای 1100°C به‌صورت زیر است.

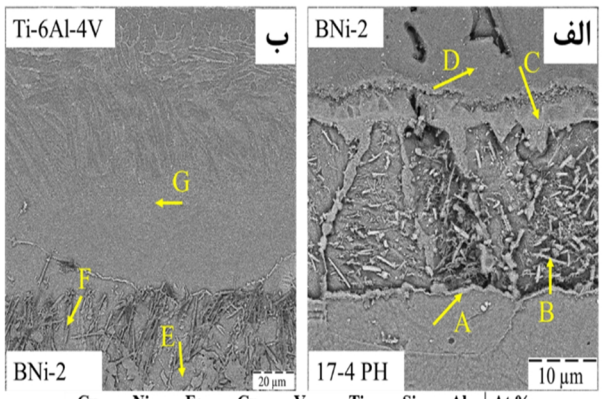


شکل 10- ریزساختار اتصالات انجام شده در دمای 1100°C و زمان‌های الف و ب-15 ج و د-30 دقیقه.

افزایش بیش‌از حد دما – زمان، موجب ایجاد حفره‌های بیشتر شده که این اتفاق، با افزایش بیشتر زمان (در دمای ثابت)، خود را بیشتر نشان می‌دهد. افزایش زمان لحیمکاری، موجب کمتر شدن ترکیب CrB در ناحیه اتصال و نفوذ بیشتر بور به فصل مشترک‌ها شده که همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، لایه بورایدی را ضخیم‌تر می‌کند [25]. مشخص است که افزایش زمان، اثر بیشتری نسبت به افزایش دما بر ریزساختار دارد. ریزساختار آلیاژ Ti-6Al-4V متشکل از فاز آلفا در مرزدانه‌های بتا است. فولاد PH 17-4 هم تحت عملیات انحلال قرار گرفته و ساختار فریت گاما در مارتنزیت لایه‌ای مشاهده می‌شود. حفرات کرکندال نیز همانطورکه اشاره شد در اتصال وجود دارند.



شکل 11- تصاویر SEM از اتصال انجام شده در دمای 1100°C و زمان 15 دقیقه.

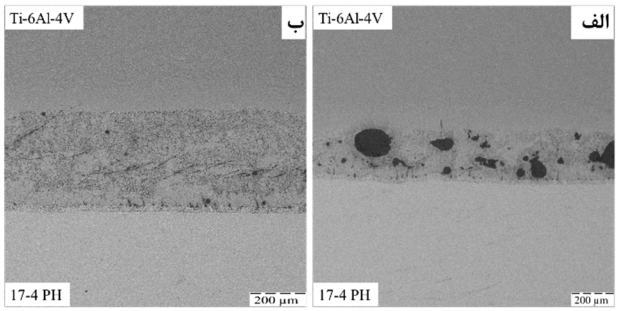


Cu	Ni	Fe	Cr	V	Ti	Si	Al	At.%
۱۲/۳	۶/۵	۴۶/۸	۱۵/۳	۰	۷/۹	۵/۵	۵/۴	A
۲۴/۳	۵/۸	۳۶/۵	۱۳/۳	۰	۸/۱	۵/۴	۶/۴	B
۴/۴	۴/۴	۴۶/۶	۹/۹	۰	۲۳/۴	۷/۳	۳/۹	C
۵/۶	۱۱/۵	۱۹/۶	۴/۶	۲/۳	۴۴/۸	۳/۵	۷/۷	D
-	۴/۶	۷/۸	۳/۹	۳/۶	۶۶/۴	۲/۵	۱۱/۰	E
-	۱/۵	۲/۶	۲/۰	۶/۱	۷۴/۸	۲/۴	۱۰/۴	F
-	۳/۳	۵/۳	۲/۵	۳/۵	۷۱/۲	۲/۲	۱۱/۹	G

شکل 12- آنالیز EDS نقطه‌ای از فصل مشترک فلزات پایه با فلزپرکننده در اتصال با دمای 1100°C و زمان 15 دقیقه.

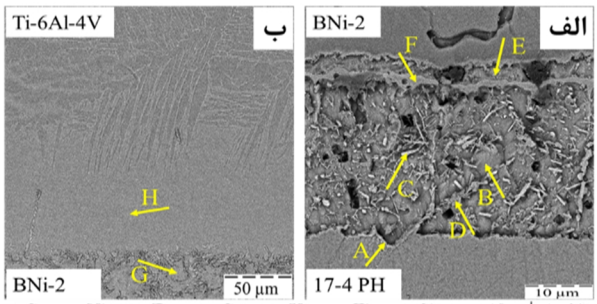
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]



شکل 13- تصاویر SEM از اتصال انجام شده در دمای 1100°C و زمان 30 دقیقه.

به دلیل آنکه اثر کرکندال یک پدیده نفوذی است، به‌شدت وابسته به دما و زمان است. به همین دلیل انتظار می‌رود که با افزایش دما و زمان، اندازه حفرات کرکندال بیشتر شود [28]. خطوط لایه‌ای و مواج در فلزپرکننده می‌تواند ناشی از تشکیل فریت دلتا به دلیل وجود آهن باشد. مشاهده می‌شود که افزایش دما – زمان، موجب نفوذ بیشتر بور به فصل مشترک و تشکیل ترکیبات Fe-Cr-B می‌شود. نفوذ بور از ناحیه اتصال به سمت فولاد، نسبت به Si، تاثیر بیشتری بر روی تشکیل رسوبات داشته و بورایدهای غنی از کروم و آهن بلوکی و سوزنی تشکیل می‌دهد [29]. آنالیز EDS این اتصال در شکل(14) آورده شده است.



	Cu	Ni	Fe	Cr	V	Ti	Si	Al	At.%
A	۶/۰	۴/۸	۶۲/۸	۱۵/۶	۰	۳/۷	۳/۹	۳/۱	
B	۴/۲	۳/۶	۵۸/۶	۱۹/۵	۲/۶	۳/۶	۳/۷	۴/۲	
C	۲۸/۵	۴/۹	۳۳/۱	۱۳/۹	۰	۷/۴	۵/۶	۶/۵	
D	۱۵/۳	۴/۳	۳۴/۵	۹/۱	۰	۲۴/۹	۶/۳	۵/۵	
E	۲/۷	۳/۸	۴۷/۹	۹/۰	۱/۷	۳۱/۲	۲/۰	۱/۷	
F	۴/۳	۳/۷	۵۱/۳	۱۹/۸	۰	۱۱/۹	۴/۸	۴/۰	
G	–	۱۲/۲	۱۸/۸	۴/۹	۲/۱	۵۰/۱	۲/۴	۹/۳	
H	–	۳/۷	۵/۸	۳/۸	۳/۳	۶۶/۶	۲/۵	۱۴/۲	

شکل 14- آنالیز EDS نقطه‌ای از فصل مشترک فلزات پایه با فلزپرکننده در اتصال با دمای 1100°C و زمان 30 دقیقه.

تغییرات پهنای فصل مشترک فولاد – فلزپرکننده برحسب دما و زمان‌های مختلف به‌صورت زیر می‌باشد.

جدول6- تغییرات پهنای فصل مشترک فولاد – فلزپرکننده و ISZ با تغییر دما و زمان.

دما و زمان اتصال		پهنای فصل مشترک فولاد – فلز پرکننده (µm)	پهنای ISZ (µm)
1050°C	15 دقیقه	13/48 ± 1/02	41/40 ± 2/45
	30 دقیقه	15/83 ± 0/60	51/70 ± 3/12
1100°C	15 دقیقه	24/57 ± 1/34	56/66 ± 6/87
	30 دقیقه	27/22 ± 0/65	81/48 ± 15/75

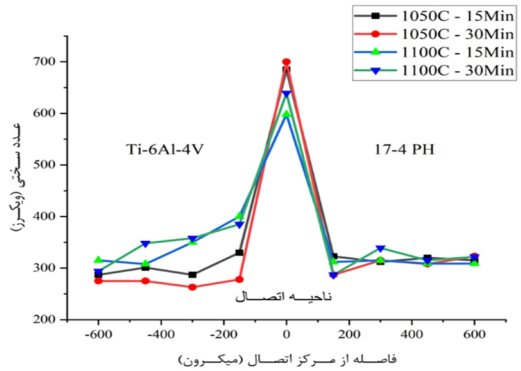
به‌طور کلی می‌توان گفت که مکانیزم اتصال از سه بخش تشکیل شده است:

- انحلال و پهن‌شدگی محل اتصال [30].
- انجماد همدما و آغاز فرایند نفوذ در هم فلزات پایه در فلزپرکننده و بالعکس، در حالت جامد.
- کاهش دمای عملیات و انجماد غیر همدما و تکمیل نفوذ حالت جامد. افزایش دما، تاثیر بسزایی بر نفوذ تیتانیوم در نیکل دارد.

این امر باعث می‌شود که با افزایش دما، اختلاط بیشتر شده و محل اتصال، پهن‌شدگی از خود نشان دهد. مشاهده می‌شود افزایش دما و زمان باعث افزایش پهنای فصل مشترک فولاد – فلزپرکننده و ISZ می‌شود [23].

3-2-بررسی خواص مکانیکی اتصالات انجام شده

از سختی‌سنجی و تست کشش به‌منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال استفاده شده است. نتایج تست میکروسختی به‌صورت زیر می‌باشد:

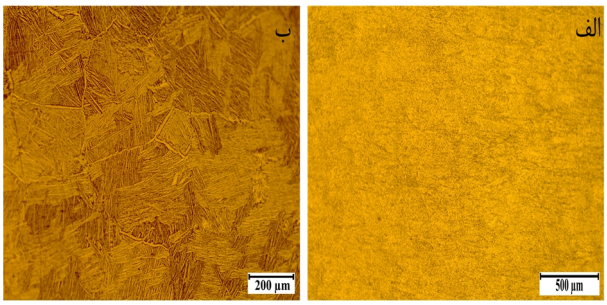


شکل 15- توزیع سختی در نواحی مختلف اتصالات انجام شده در دما و زمان‌های مختلف.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

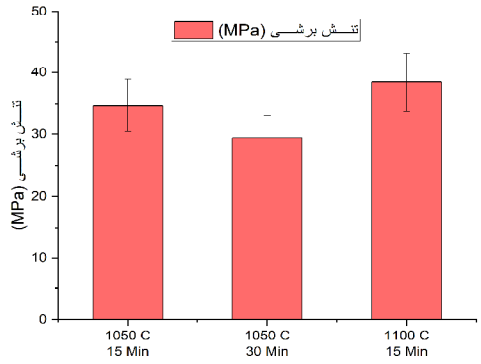
مشاهده می‌شود به دلیل وجود ترکیبات بین فلزی مختلف در ناحیه اتصال، سختی در مرکز اتصال تا حدود 700 ویکرز نیز می‌رسد. همچنین به دلیل قرار گرفتن در کوره، عدد سختی فلزات پایه نیز دچار تغییر شده که به دلیل رخ دادن عملیات حرارتی می‌باشد. افزایش سختی در ناحیه اتصال ناشی از وجود ترکیبات بورایدی و سایر ترکیبات بین فلزی می‌باشد. هرچه اندازه ترکیبات بورایدی کمتر باشد، سختی در محل اتصال نیز کمتر خواهد بود [31]. فازهای ترد تشکیل شده در مرکز اتصال، علاوه بر بالابردن سختی، محل‌های مناسبی برای شروع ترک می‌باشند [32]. تغییرات سختی در آلیاژ Ti-6Al-4V می‌تواند به دلیل تفاوت ساختار از هم‌محور به ویدمن‌اشتاتن باشد [33] که در شکل(16) آورده شده است.



شکل 16- الف-ساختار آلفا - بتا هم‌محور ب-ساختار

ویدمن‌اشتاتن در آلیاژ Ti-6Al-4V بعد از عملیات لحیمکاری کاهش سختی در فولاد PH 17-4 بعد از اتصال می‌تواند ناشی از عملیات رسوب سختی و تشکیل آستنیت باقیمانده باشد. همانطور که میرزاده و همکارانش [34] بررسی کرده‌اند، این اتفاق می‌تواند به دلایلی از جمله بزرگتر شدن رسوبات مس، عملیات بازیابی و تشکیل آستنیت باقیمانده مرتبط باشد. بیشینه استحکام اتصالات به‌صورت زیر می‌باشد (اتصال انجام شده در دمای 1100°C و زمان 30 دقیقه هیچ‌گونه استحکامی از خود نشان نداده است):

به‌طورکلی افزایش دما در زمان ثابت، می‌تواند باعث افزایش استحکام شود. اما افزایش زمان در دمای ثابت، باعث بیشترشدن حفرات و به دنبال آن، کاهش استحکام اتصال شود. همانطور که در شکل(17) مشاهده می‌شود، افزایش زمان اتصال موجب کاهش استحکام شده است که این اتفاق، می‌تواند ناشی از افزایش ترکیبات بین‌فلزی Fe-Ti باشد. همانطور که ژائو و همکارانش [35] بررسی کرده‌اند، افزایش زمان اتصال موجب می‌شود که نفوذ Fe و Ti در فلزپرکننده بیشتر شده و ترکیبات بین فلزی Fe-Ti بیشتر شوند.



شکل 17- استحکام برشی اتصالات انجام شده در این پژوهش.

در پژوهشی که جیانگ و همکارانش [36] بر روی تاثیر زمان لحیمکاری بر استحکام اتصال فولاد زنگ‌نزن با فلزپرکننده BNi-2 انجام داده‌اند، مشخص شده است که افزایش بیش از حد زمان نگهداری موجب حل شدن مجدد ترکیبات بورایدی می‌شود که در فولاد نفوذ کرده بوده‌اند. این اتفاق موجب می‌شود که بور، ترکیبات بورایدی بیشتری تولید کرده و کاهش استحکام را به دنبال خواهد داشت. همچنین با افزایش زمان نگهداری، میزان حفرات در ساختار افزایش می‌یابند. زمان نگهداری باید به مقداری باشد که بور به مقدار کافی نفوذ کند اما فلزپایه به مقداری اضافی در فلزپرکننده حل نشود.

4-جمع‌بندی

اتصال بین فولاد PH 17-4 و آلیاژ Ti-6Al-4V با فویل BNi-2 می‌تواند انجام شود. ضریب نفوذ بالای تیتانیوم در فلز پرکننده و اختلاط این دو با هم، موجب تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی می‌شود که کاهش استحکام را به همراه دارند. افزایش دمای لحیمکاری می‌تواند باعث افزایش واکنش فلزپرکننده و آلیاژ Ti-6Al-4V شود که می‌تواند استحکام را افزایش دهد. افزایش دما باعث افزایش نفوذپذیری عناصر شده و همین امر باعث افزایش پهنای فصل مشترک می‌شود. از طرفی افزایش زمان، می‌تواند

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

باعث ضخیم‌شدن بیش از حد ترکیبات بین فلزی شده که باعث کاهش استحکام می‌شوند. به‌طورکلی، افزایش دما در زمان ثابت، می‌تواند باعث حل‌شدن ترکیبات بورایدی شده که کاهش سختی در ناحیه اتصال را به دنبال دارد. حل‌شدن ترکیبات بورایدی باعث می‌شود که بور به فصل مشترک نفوذ کرده و پهنای فصل مشترک را افزایش دهد و ترکیبات Fe-Cr-B بیشتری در آن ناحیه تشکیل شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش زمان، اختلاط تیتانیوم در نیکل بیشتر شده که همین موجب افزایش حجم فازهای ترد $NiTi_2$ و Fe_2Ti می‌شود.

منابع

1-I. Kawakatsu and Y. Suezawa, "Effects of surface preparations of base metal on the brazed joint strength," *Transactions of the Japan Welding Soeiet*, vol. 3, no. 1. 1972.

2-Lucas Milhaupt, "The Brazing Book," *Lucas Milhaupt*, 2004.

3-C. C. Liu, C. L. Ou, and R. K. Shiue, "The microstructural observation and wettability study of brazing Ti-6Al-4V and 304 stainless steel using three braze alloys," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 2225–2235, 2002, doi: 10.1023/A:1015356930476.

4-A. A. 8M/A5. 8:201.-A. 1 and A. A. N. Standard, "Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding," *Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding*. 2019.

5-International Standards, "ISO 17672:2016 - Brazing — Filler metals." 2016, doi: 10.1016/b978-0-08-026169-0.50011-6.

6-Rob Snell, "novel brazing alloy," University of Sheffield, 2017.

7-M. M. Shwartz, "Brazing: Second edition." 2003.

8-J. D. Destefani, "Introduction to Titanium and Titanium Alloys," *Prop. Sel. Nonferrous Alloy. Spec. Mater.*, pp. 586–591, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v02.a0001080.

9-C. T. Chang and R. K. Shiue, "Infrared brazing Ti–6Al–4V and Mo using the Ti–15Cu–15Ni braze alloy," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 161–170, May 2005, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2005.01.002.

10-A. E. Shapiro, "Brazing of Conventional Titanium Alloys," *Welding, Brazing, Solder.*, pp. 1–25, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v06.a0009239.

11-Y. Gao, T. Tsumura, and K. Nakata, "Dissimilar welding of titanium alloys to steels," *Trans. JWRI*, vol. 41, no. 2, pp. 7–12, 2012.

12-N. K. Adomako, J. O. Kim, S. H. Lee, K. H. Noh, and J. H. Kim, "Dissimilar welding between Ti–6Al–4V and 17-4PH stainless steel using a vanadium interlayer," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 732, pp. 378–397, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.07.015.

13-A. Y. A. Mahdavi Shaker, H. Momeni, A.Khorram, "The effect of electron beam welding parameters on the microstructural characteristics and mechanical properties of dissimilar joint between 17-4PH steel and Ti6Al4V alloy," *J. Weld. Sci. Technol. ofIran*, vol. 9, no. 1, 2023.

14-R. K. Shiue, S. K. Wu, and J. Y. Shiue, "Infrared brazing of Ti-6Al-4V and 17-4 PH stainless steel with (Ni)/Cr barrier layer(s)," *Materials Science and Engineering A*, vol. 488, no. 1–2. pp. 186–194, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.10.075.

15-S. Kundu, B. Mishra, D. L. Olson, and S. Chatterjee, "Interfacial reactions and strength properties of diffusion bonded joints of Ti64 alloy and 17-4PH stainless steel using nickel alloy interlayer," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 714–722, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.088.

16-Q. Sun and S. Lu, "Elements diffusion and mechanical properties of 15-5PH stainless steel joint brazed with BNi-2 filler metal," *Mater. Sci. Forum*, vol. 850, pp.700–705, 2016, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.850.700.

17-A. Doroudi, A. E. Pilehrood, M. Mohebinia, A. Dastgheib, A. Rajabi, and H. Omidvar, "Effect of the isothermal solidification completion on the mechanical properties of Inconel 625 transient liquid phase bond by changing bonding temperature," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 10355–10365, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.015.

18-"JIS Z 3192：1999 Methods of tensile and shear tests for brazed joint.pdf." [Online]. Available: http://kikakurui.com/z7/Z7311-2010-01.html.

19-G. F. Bastin and G. D. Rieck, "Diffusion in the Titanium-Nickel Systems--1, 2. Occurence and Growth of the Various Intermetallic Compounds.," *Met. Trans*, vol. 5, no. 8, pp. 1817–1831, 1974, doi: 10.1007/bf02644146.

20-S. V. Divinski, I. Stloukal, L. Kral, and C. Herzig, "Diffusion of Titanium and Nickel in B2 NiTi," *Defect Diffus. Forum*, vol. 289–292, pp. 377–382, Apr. 2009, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.289-292.377.

21-A. Elrefaey and W. Tillmann, "Brazing of titanium to steel with different filler metals: Analysis and comparison," *J. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 16, pp. 4332–4338, 2010, doi: 10.1007/s10853-010-4357-z.

22-T. Bertilsson Supervisor, H. Sina, and S. Iyengar, "Intermetallic Compound Formation in Ni-Ti-Fe(Cu) Powder Mixtures."

23-C. L. Ou, D. W. Liaw, Y. C. Du, and R. K. Shiue, "Brazing of 422 stainless steel using the AWS classification BNi-2 Braze alloy," *Journal of Materials Science*, vol. 41, no. 19. pp. 6353–6361, 2006, doi: 10.1007/s10853-006-0709-0.

24-B. Szwed and M. Konieczny, "Structural changes during the formation of diffusion bonded joints between titanium and stainless steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 461, p. 012082, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/461/1/012082.

25-Lin, Shiue, Wu, and Lin, "Dissimilar Infrared

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]

with GH3039 superalloy using BNi2 interlayer: Microstructure and mechanical properties," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 949–957, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.041.
32-M. A. Mofid, R. Barazandeh, and M. Jafarzadegan, "Vacuum Brazing of NIMONIC 105 Superalloy Using W-Rich BNi-10 and Conventional BNi-2 Fillers," *Jom*, 2023, doi: 10.1007/s11837-023-05944-x.
33-H. Carreon, A. Ruiz, and B. Santoveña, "Study of aging effects in a Ti-6AL-4V alloy with widmanstätten and equiaxed microstructures by non-destructive means," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1581 33, pp. 739–745, 2014, doi: 10.1063/1.4864894.
34-H. Mirzadeh and A. Najafizadeh, "Aging kinetics of 17-4 PH stainless steel," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 116, no. 1, pp. 119–124, 2009, doi: 10.1016/j.matchemphys.2009.02.049.
35-B. Zhao, D. Jian, L. Ma, Y. Ding, and L. Zhou, "Precipitation of intermetallic compounds in brazing of titanium and steel using brass filler," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 285, p. 116730, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116730.
36-W. Jiang, J. M. Gong, and S. T. Tu, "Effect of holding time on vacuum brazing for a stainless steel plate-fin structure," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 4, pp. 2157–2162, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.001.
Brazing of CoCrFe(Mn)Ni Equiatomic High Entropy Alloys and 316 Stainless Steel," *Crystals*, vol. 9, no. 10, p. 518, Oct. 2019, doi: 10.3390/cryst9100518.
26-S. B. Jung, T. Yamane, Y. Minamino, K. Hirao, H. Araki, and S. Saji, "Interdiffusion and its size effect in nickel solid solutions of Ni-Co, Ni-Cr and Ni-Ti systems," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 11, no. 20, pp. 1333–1337, 1992, doi: 10.1007/BF00729354.
27-V. Raghavan, "B-Fe-Ti (Boron-Iron-Titanium)," *J. Phase Equilibria*, vol. 24, no. 5, pp. 455–456, May 2003, doi: 10.1361/105497103770330145.
28-C. L. Ou and R. K. Shiue, "Microstructural evolution of brazing 422 stainless steel using the BNi-3 braze alloy," *J. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 11, pp. 2337–2346, 2003, doi: 10.1023/A:1023928312572.
29-B. Binesh and S. Mirzaei, "Effect of bonding temperature on the microstructure and electrochemical corrosion behavior of TLP bonded AISI 304L stainless steel," 2022.
30-A. M. Atieh and T. I. Khan, "Transient liquid phase (TLP) brazing of Mg–AZ31 and Ti–6Al–4V using Ni and Cu sandwich foils," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 19, no. 4, pp. 333–342, May 2014, doi: 10.1179/1362171814Y.0000000196.
31-L. X. Zhang, Z. Sun, Q. Xue, M. Lei, and X. Y. Tian, "Transient liquid phase bonding of IC10 single crystal

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.09]