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

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

Volume 11, Number 1, 2025



Investigation on using Cu, Zn and α-brass interlayers in ultrasonic welding of CP-Ti to St12

F. Bashirzadeh, T. Saeid*
Faculty of Materials Engineering, Tabriz University of Technology, Tabriz, Iran.

Received 14 January 2025 ; Accepted 7 March 2025

Abstract

Unlike conventional welding methods, joining titanium alloys to steels using ultrasonic welding does not result in the formation of brittle intermetallic compounds and high torsion, causing a reduction in the mechanical properties of the joint. Ultrasonic welding of the St12-CP.Ti samples was performed at constant parameters of 7 bars, 2 s and 1 kW and variable parameter of interlayer material (Cu, 70B and Zn). The investigation of samples by OM, SEM, shear-tensile and microhardness tests revealed that Zn and Cu samples had the lowest and highest bond densities, with 42.2 and 80.6 percent, respectively. The bond density and the strength of the sample with greater interlayer deformability have higher values. Due to the high plastic deformation capability of copper, the Cu sample has generated more heat and deformation at the joint interface than in the other samples. As a result, the microstructure underwent recrystallization and grain growth after enduring severe plastic deformation. Also, the highest hardness of the steel side equal to 201 HV was for the Cu sample, followed by 70B and Zn, respectively.

Keywords: Ultrasonic Welding; Interlayer; CP-Ti, Low Carbon Steel.

*Corresponding Author: T. Saeid, saeid@sut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404



بررسی تاثیر لایه‌های میانی مس، روی و برنج آلفا در جوشکاری فراصوتی St12 به CP-Ti

فرید بشیرزاده، توحید سعید *

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1403/10/25 ؛ پذیرش مقاله: 1403/12/17

چکیده

برخلاف روش‌های جوشکاری معمول، جوشکاری فراصوتی آلیاژهای تیتانیمی به فولادی باعث تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد، پیچش زیاد و تضعیف خواص مکانیکی اتصال نمی‌شود. جوشکاری فراصوتی نمونه‌های St12-CP.Ti در پارامترهای ثابت فشار، زمان و توان جوشکاری به ترتیب برابر با هفت بار، دو ثانیه و یک کیلووات و پارامتر متغیر لایه‌های میانی Cu، 70B و Zn انجام شد. بررسی نمونه‌ها توسط آزمون‌های OM، SEM، کشش برشی و ریزسختی‌سنجی نشان‌دهنده کمترین و بیشترین چگالی باند به ترتیب برابر با 42/2 و 80/6 درصد برای نمونه‌های Zn و Cu است. چگالی باند و در نتیجه استحکام نمونه دارای لایه میانی با قابلیت تغییر شکل بیشتر مقادیر بالاتری دارند. در نمونه Cu به دلیل قابلیت تغییر شکل پلاستیک بالای مس، حرارت و تغییر شکل بیشتری در فصل مشترک اتصال نسبت به نمونه‌های دیگر ایجاد شده و در نتیجه ریزساختار دچار تبلور مجدد و رشد دانه پس از تحمل تغییر شکل پلاستیک شدید شده است. همچنین، بالاترین سختی طرف فولادی اتصال برابر با 201 ویکرز مربوط به نمونه Cu بوده و پس از آن به ترتیب B70 و Zn قرار دارند.

کلمات کلیدی: جوشکاری فراصوتی؛ لایه میانی؛ تیتانیم خالص تجاری؛ فولاد کم کربن.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: توحید سعید، saeid@sut.ac.ir.

1- مقدمه

اتصال‌های تیتانیم- فولاد (مخصوصا فولاد زنگ‌نزن) اهمیت خاصی برای صنایع پتروشیمی و هسته‌ای دارند. مخازن فرایند مورد استفاده در این صنایع از دو قسمت فولادی برای تحمل بار و تیتانیمی به منظور محافظت در برابر تخریب محیطی و حمله محلول‌های خورنده پایه آبی تشکیل می‌شوند [1]. علاوه بر آن، صفحات تیتانیم- فولاد زنگ‌نزن چشم انداز استفاده در تجهیزات مخازن، کانتینرها، لوله‌کشی و تولید لوله‌های درزدار را دارند. همچنین این مواد در سیستم‌های خنک کننده ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [2–4]. به دلیل محدودیت خیلی زیاد در انحلال تیتانیم در فولاد به صورت جامد (0/1 درصد اتمی) در شرایط معمول محیطی و از سوی دیگر، حلالیت دو طرفه کامل در حالت مایع، اتصال ذوبی تیتانیم به فولاد با محدودیت مواجه می‌شود. بنابراین، جلوگیری از کاهش شکل‌پذیری در حوضچه جوش اتصال غیرهمجنس تیتانیم به فولاد تقریباً غیرممکن است. این مسأله به همراه مشکلاتی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

همچون پیچش زیاد، منطقه متاثر از حرارت عریض و تشکیل ریزساختارهای ترد و شکننده (مانند ترکیبات بین فلزی) همراه با تنش‌های باقیمانده زیاد از موانع استفاده از روش‌های ذوبی محسوب می‌شوند [1،5،6]. مطالعات زیادی در زمینه‌ی اتصال ذوبی آلیاژهای تیتانیمی به فولادی با استفاده از روش‌های جوشکاری لیزری [7–13]، پرتوی الکترونی [14–16] و قوسی[17،18] انجام شده و در اکثریت قریب به اتفاق موارد، وجود ترکیبات بین فلزی ترد پایه Fe-Ti در ریزساختار فصل مشترک جوشکاری و در نتیجه تضعیف خواص مکانیکی و عملکردی آن گزارش شده است. از آنجایی که جوشکاری در حالت بدون استفاده از فلز پرکننده اتصال‌هایی با استحکام مد نظر تولید نمی‌کند، روش‌های متنوعی در طول دهه گذشته به منظور افزایش حد بالایی استحکام قابل دسترسی توسعه داده شده‌اند. به عنوان مثال، لایه‌های میانی از مواد دارای سازگاری زیاد با فلزات پایه مثل Mg [19]، Cu [20–22]، Nb [23–25] و Ta [5،21] استحکام اتصال را افزایش داده‌اند. با وجود این، به دلیل ناسازگاری یک یا چند عنصر از فلزات پایه با لایه میانی و تشکیل ترکیبات بین فلزی، جوش همچنان به حالت ترد (با درجه کمتر نسبت به حالت بدون لایه میانی) و در فصل مشترک ترکیب بین فلزی دچار شکست می‌شود.

با مشخص شدن مشکلات و محدودیت‌های فرایندهای جوشکاری ذوبی، مسیر توسعه جوشکاری غیرهمجنس آلیاژهای تیتانیمی به فولادی بیشتر بر پایه روش‌های حالت جامد دنبال می‌شود. تحولات ریزساختاری فلز جوش در فرایندهای حالت جامد ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا است. مشکلات جوشکاری آلیاژهای تیتانیمی به فولادی در بررسی‌های انجام شده با استفاده از روش‌های جوشکاری همزن اصطکاکی [26،27]، اصطکاکی [28،29] و نفوذی [30،31] کمتر شده اما به طور کامل رفع نشده است. با توجه به اینکه کل فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی در حالت جامد انجام می‌شود، این فرایند به کاهش تشکیل ترکیبات بین فلزی کمک می‌کند. با وجود این، ترکیبات بین فلزی FeTi و Fe_2Ti در اتصال آلیاژهای تیتانیمی به فولادی توسط این روش مشاهده شده است [26،27]. با توجه به عدم نیاز به ذوب فلزات پایه در جوشکاری اصطکاکی، عیوب جوشکاری مربوط به فرایندهای ذوبی کاملاً حذف شده و آلودگی‌های موجود در سطح فلزات نیز در اولین تماس از بین می‌روند. وجود ترکیبات بین فلزی ترد پایه Fe-Ti در ریزساختار فصل مشترک جوشکاری اصطکاکی در برخی مطالعات قبلی تایید [28] و در برخی دیگر نفی [29] شده است. در جوشکاری نفوذی، تغییرشکل فشاری ناشی از فرایند باعث ریزدانه شدن آلیاژ تیتانیم می‌شود. این مسأله باعث افزایش مرزدانه‌ها و در نتیجه افزایش مسیرهای نفوذ خواهد شد. اگرچه فرایند جوشکاری نفوذی ناسازگاری شیمیایی آلیاژهای تیتانیمی و فولادی را به حداقل می‌رساند؛ باعث حذف کامل ترکیبات بین فلزی نمی‌گردد. به طوری‌که ترکیبات بین فلزی FeTi و Fe_2Ti در اتصال آلیاژهای تیتانیمی به فولادی توسط این روش مشاهده شده است[31]. همچنین، وجود مقادیر بیشتری از این ترکیبات بین فلزی در جوشکاری‌های با زمان بالاتر تایید شده است [30].

در صورت نیاز به انجام جوشکاری‌های ظریف، استفاده از اکثر روش‌های جوشکاری حالت جامد دور از ذهن محسوب می‌گردد. با وجود این، جوشکاری فراصوتی به دلیل انرژی ورودی کم، سرعت بالا، عدم ایجاد آلودگی شیمیایی و امکان جوشکاری در ابعاد کوچک، یک روش مناسب برای جوشکاری ظریف آلیاژهای تیتانیمی به فولادی به نظر می‌رسد [32]. در این راستا، لین و همکاران [33] فولاد فوق کم کربن را به تیتانیم خالص تجاری (گرید 1) با فرایند فراصوتی جوشکاری کردند. اثر تو رفتگی هورن با افزایش زمان جوشکاری افزایش یافت که نمودی از افزایش تغییر شکل است. با افزایش زمان جوشکاری به بالاتر از سه ثانیه، شکست نمونه در حین جوشکاری اتفاق افتاد و ماده به هورن چسبید. بالاترین استحکام جوشکاری در نیروی 2000 N و زمان 2/5 ثانیه بدست آمد. شکست نمونه در این حالت و تحت اثر آزمون کشش برشی از قسمت فلزپایه اتفاق افتاد که نشان‌دهنده اتصال خوب با بالاترین استحکام است. لازم به ذکر است که فصل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

مشترک جوشکاری در این حالت دارای حفرات دایره‌ای با اندازه کمتر از یک میکرون بود. در تحقیق دیگری توسط این پژوهشگران [34] از لایه‌های میانی آلومینیم خالص و نیکل خالص در بین فولاد فوق کم کربن و تیتانیم خالص تجاری (گرید 1) استفاده شد. نتایج آزمون کشش برشی نشان‌دهنده رسیدن استحکام اتصال دارای لایه میانی آلومینیم به 1000 و 2000 نیوتن پس از زمان جوشکاری به ترتیب 0/1 و 0/25 ثانیه است. شکست این نمونه‌ها به ترتیب از فصل مشترک و فلز پایه اتفاق افتاد. پس از زمان 0/25 ثانیه افزایش قابل توجهی در استحکام اتصال مشاهده نشد. بدون استفاده از لایه میانی، استحکام اتصال در زمان جوشکاری 0/25 ثانیه به 700 نیوتن رسید. در هنگام استفاده از لایه میانی نیکلی، استحکام اتصال در زمان 1/5 ثانیه به حدود 1000 نیوتن (شکست از فصل مشترک) رسید. با افزایش زمان جوشکاری به دو ثانیه، استحکام اتصال 2000 نیوتن و حالت شکست از فلزپایه بدست آمد. تشکیل پیوند در اتصال فولاد کم کربن به تیتانیم خالص با لایه میانی نیکلی به پهن شدن ذرات فرسایشی در فصل مشترک آهن و نیکل و تشکیل فاز قابل تغییر شکل β-Ti در فصل مشترک نیکل و تیتانیم بستگی دارد. بنابراین، زمان جوشکاری طولانی خواهد بود. در یک مورد استفاده از آلیاژهای با استحکام بالاتر، آئو و همکاران [35] آلیاژ حافظه‌دار NiTi آستنیتی را به فولاد زنگ‌نزن AISI 304 با فرایند فراصوتی جوشکاری کردند. در این پژوهش از لایه میانی مس خالص استفاده شده است. هیچگونه ترکیب بین فلزی در ریزساختار اتصال مشاهده نشد. نتایج آزمون کشش برشی نشان‌دهنده افزایش استحکام اتصال با افزایش انرژی جوشکاری تا 750 ژول و سپس کاهش آن است. با افزایش انرژی جوشکاری تا 750 ژول، تولید حرارت افزایش یافته و نرم شدن ماده و تغییر شکل پلاستیک فلزات پایه باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد. با وجود این، انرژی ورودی 1000 ژول زیاد بوده و منجر به نازک شدن قابل توجه مواد در محل اتصال و اکستروژن فلزپایه بین الگوی نوک سونوترود و سندان می‌شود که کاهش استحکام اتصال را در بر خواهد داشت.

با توجه به سختی بالای آلیاژهای تیتانیمی و فولادی از یک سو و وابستگی جوشکاری فراصوتی به تغییر شکل فلزات پایه در فصل مشترک جوشکاری از سوی دیگر، استفاده از یک لایه میانی سازگار با فلزات پایه سودمند خواهد بود. لایه میانی مذکور قابلیت تغییر شکل فصل مشترک جوشکاری را افزایش داده و با قرار گرفتن در بین دو فلزپایه، از ایجاد تماس مستقیم و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد جلوگیری خواهد کرد. تغییر شکل پلاستیک لایه میانی بر قابلیت تغییر شکل فصل مشترک جوشکاری اثرگذار است. در پژوهش حاضر، تاثیر قابلیت تغییر شکل لایه‌های میانی مختلف بر تحولات ریزساختاری و استحکام فصل مشترک جوشکاری مورد بررسی قرار گرفته است.

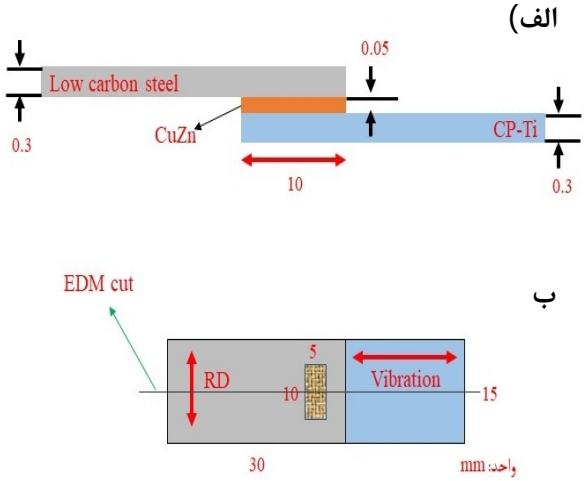
2- مواد و روش پژوهش

نمونه‌های مورد نیاز در این تحقیق از طریق انجام جوشکاری فراصوتی بر روی مواد اصلی DIN St12، CP-Ti Grade 2 و همچنین لایه‌های میانی Pure Cu، Pure Zn و 70B (C26000) در حالت خریداری شده تهیه گردید. با در نظر گرفتن ابزار و توان دستگاه جوشکاری فراصوتی فلزی ساخت شرکت فراصوت زاگرس (با توان اسمی 3 kW و فرکانس کاری 20 kHz)، نسبتی از ابعاد نمونه مورد استفاده در یکی از منابع مطالعاتی [35] به عنوان ابعاد نمونه تحقیق حاضر انتخاب شد. طرحواره‌ای از ابعاد، طرح اتصال و نمونه جوشکاری در شکل(1) ارائه شده است. با توجه به اینکه متغیر اصلی این تحقیق لایه میانی است، سایر پارامترهای جوشکاری فراصوتی ثابت بوده و با استفاده از منابع مطالعاتی قبلی و نمونه‌های اولیه بدست آمده است. بر این اساس، پارامترهای فشار جوشکاری هفت بار، زمان جوشکاری دو ثانیه و توان جوشکاری یک کیلو وات به عنوان پارامترهای اصلی و ثابت پژوهش انتخاب گردید. پس از انجام جوشکاری، برش نمونه‌ها از محل نشان داده شده در شکل(1) با هدف متالوگرافی انجام شد. مطابق با استاندارد ASTM E3، پولیش نمونه‌ها به ترتیب از سنباده 200 تا 4000 و سپس خمیر الماسه سه و یک میکرون انجام شد. مطالعه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی نمونه‌ها به ترتیب با دستگاه‌های Olympus DSX510 و TESCAN MIRA3 انجام گرفت. به منظور اندازه‌گیری چگالی باند و اندازه دانه از نرم‌افزار ImageJ مطابق با استاندارد ASTM E112 استفاده شده است. بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها توسط ریزسختی‌سنجی مطابق با استاندارد ASTM E384 و آزمون کشش برشی انجام شده است. در آزمون ریزسختی‌سنجی از فرورونده ویکرز با نیروی 10 گرم استفاده شد. همچنین، سرعت حرکت فک دستگاه در آزمون کشش برشی به صورت 0/2 mm/min تعیین شد. لازم به ذکر است که ابعاد نمونه‌های آزمون کشش برشی همان ابعاد و اندازه نمونه جوش اولیه است.

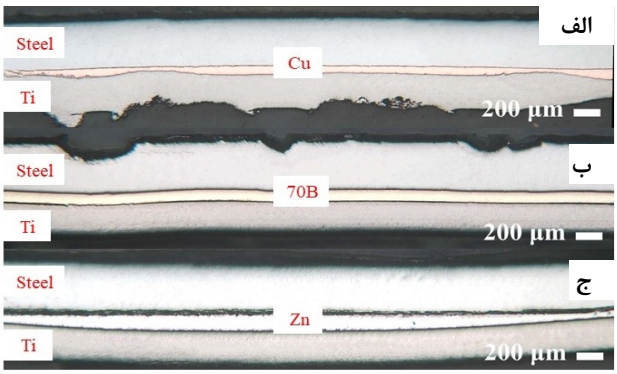


شکل1- طرح‌واره‌هایی از الف- طرح اتصال شامل ابعاد نمونه، نحوه قرارگیری و میزان روی هم افتادگی نمونه ها و ب- نمونه جوشکاری شامل محل جوش، ابعاد فصل مشترک جوشکاری و جهت گیری نمونه

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی درشت‌ساختاری و چگالی باند

تصاویر سطح مقطع نمونه‌ها پس از آماده‌سازی‌های معمول متالوگرافی و قبل از انجام اچ در شکل(2) نشان داده شده است. با توجه به شکل(2)، نمونه‌های Cu و 70B اتصال کامل، پیوسته و بدون حفره ایجاد کرده‌اند. وضعیت در مورد نمونه Zn به خوبی نمونه‌های دیگر دارای لایه میانی نیست و این نمونه از سمت تیتانیم دارای اتصال کامل و پیوسته با تعدادی کمی حفره و از سمت فولاد فاقد اتصال پیوسته است. به منظور بررسی کمی تاثیر وجود هر لایه میانی از پارامتر چگالی باند استفاده شد. با توجه به نمودار چگالی باند نمونه‌ها در شکل(3—الف)، نمونه‌ی Zn با 42/2 درصد و نمونه Cu با 80/6 درصد به ترتیب کمترین و بیشترین چگالی باند را داشتند. در بین این دو، نمونه 70B دارای چگالی باند 64/3 درصد بود. با توجه به سختی بالای هر دو فلزپایه و محدودیت در سیستم‌های لغزش تیتانیم، لایه میانی نقش زیادی در تغییر شکل فصل مشترک اتصال داشته و نمونه‌ها در نمودار به ترتیب قابلیت تغییر شکل قرار گرفته‌اند.

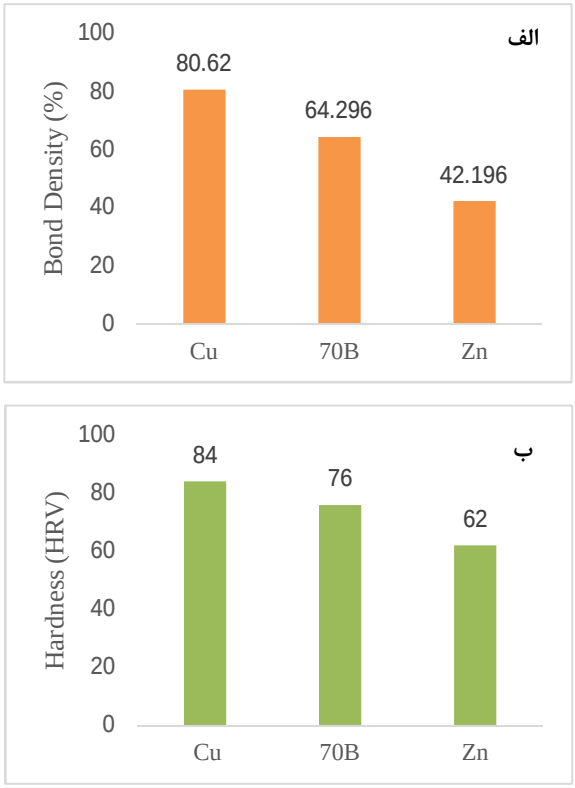


شکل2-سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری الف- با لایه میانی مس خالص، ب- با لایه میانی B70 و ج- با لایه میانی روی خالص قبل از اچ

با توجه به داده‌های سختی فلزات لایه میانی در شکل(3-ب)، بالاتر بودن چگالی باند نمونه Cu به سختی پایین آن مربوط نیست و اتفاقاً لایه میانی دارای کمترین سختی (Zn)، دارای کمترین چگالی باند است. بنابراین، دلیل کمتر بودن چگالی باند نمونه 70B از Cu، قابلیت تغییر شکل (انرژی نقص در چیده شدن) بیشتر در لایه میانی مس خالص خواهد بود. همچنین به دلیل قابلیت تغییر شکل پایین در نمونه Zn ناشی از محدودیت در سیستم‌های لغزش hcp، این نمونه علی رغم سختی کم دارای کمترین مقدار چگالی باند در بین نمونه‌های دارای لایه میانی است. به منظور بررسی بیشتر تغییر شکل لایه‌های میانی در امتداد نیروی عمودی وارد شده از سمت سونوترود، ضخامت نهایی لایه‌های میانی اندازه‌گیری شد (شکل 4). با توجه به شکل(4)، کاهش بیشتر در ضخامت لایه میانی با افزایش قابلیت تغییر شکل آن به وضوح قابل مشاهده است. اعداد اندازه‌گیری شده از ضخامت لایه‌های میانی پس از جوشکاری (شکل 4-د) نیز تاییدی دیگر بر مشاهدات محسوب

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

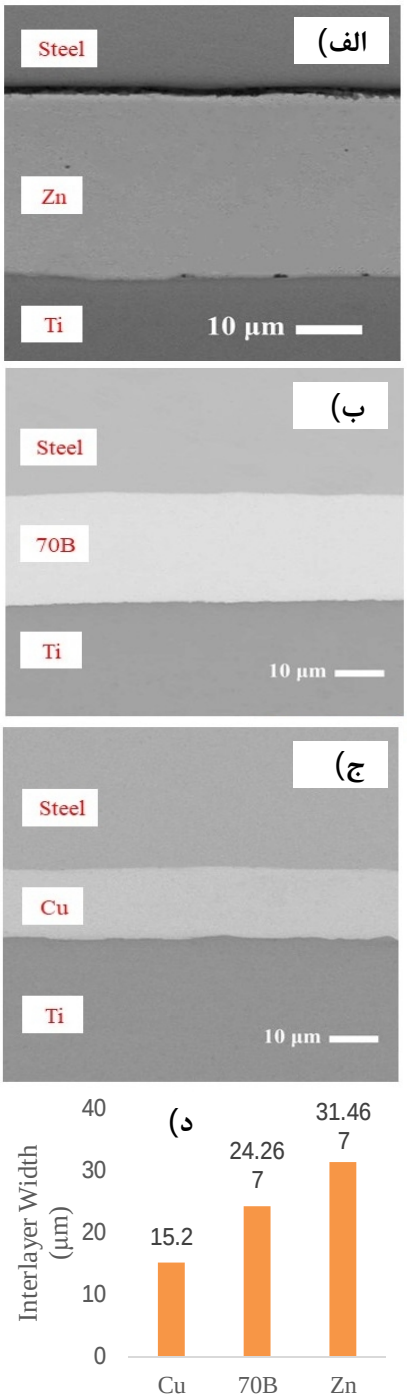
می‌گردد.



شکل3-الف- چگالی باند نمونه‌های جوشکاری شده با لایه میانی،
ب- داده‌های سختی مربوط به فلزات لایه میانی قبل از انجام جوشکاری

3-2- بررسی ریزساختاری

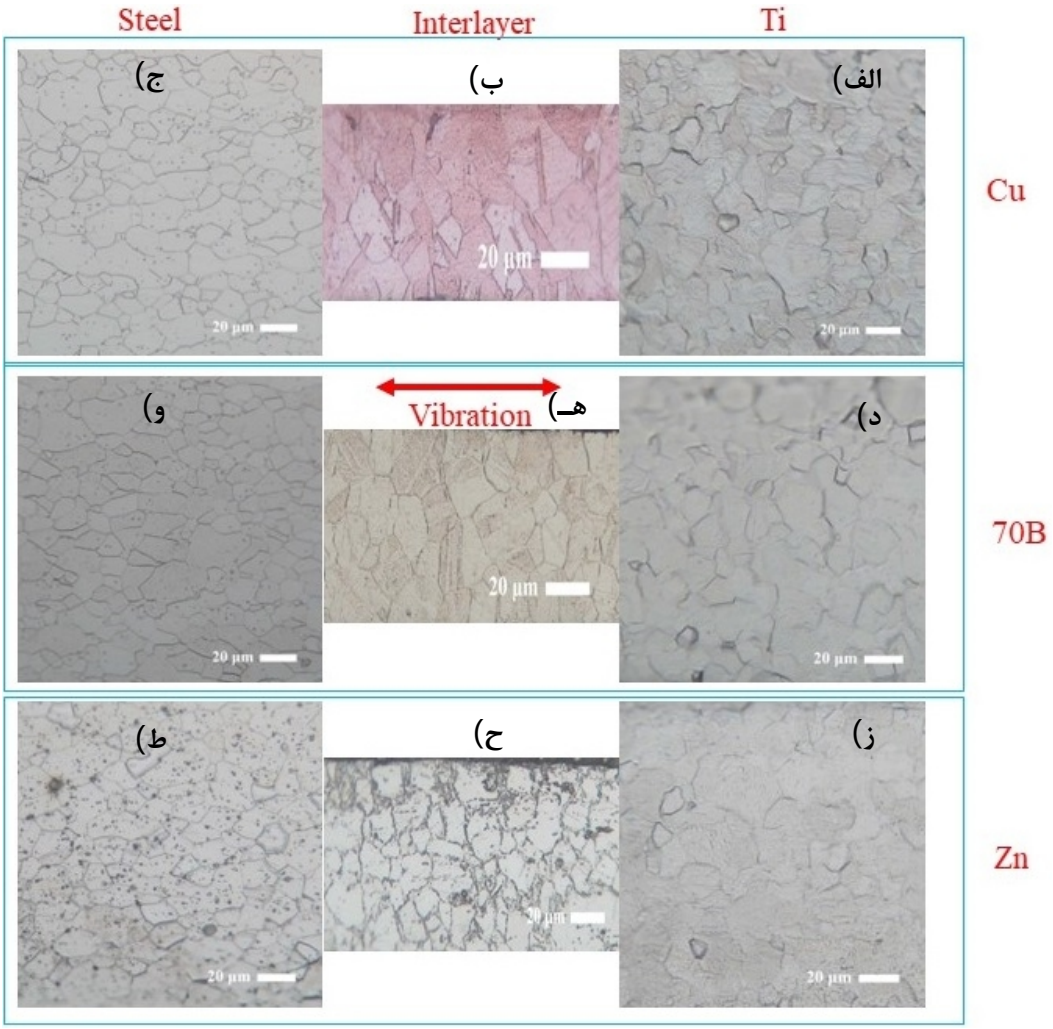
ریزساختار فصل مشترک اتصال برای نمونه‌های دارای لایه میانی در شکل(5) ارائه شده است. در یک نگاه کیفی، دانه‌های کشیده شده بیشتری (عمود بر جهت اعمال نیرو) در سمت فولاد کم کربن اتصال برای نمونه 70B (شکل 5-و) نسبت به نمونه Zn (شکل 5-ط) وجود دارد و آنهم بیشتر از نمونه Cu (شکل 5-ج) است. به نظر می‌رسد که به دلیل قابلیت تغییر شکل پلاستیک (انرژی نقص در چیده شدن) بالای مس، حرارت و تغییر شکل بیشتری در فصل مشترک اتصال نسبت به نمونه‌های دیگر ایجاد شده و در نتیجه ریزساختار دچار تبلور مجدد و رشد دانه پس از تحمل تغییر شکل پلاستیک شدید شده است (شکل 5-ج) [35]. با توجه به اینکه مواد پایه تحت تغییر شکل با نرخ کرنش بالا قرار می‌گیرند، تمایل به جایگزینی حالت تغییر شکل لغزش نابجایی‌ها با دوقلویی بسیار زیاد است.



شکل4-سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری
الف- با لایه میانی روی خالص، ب- با لایه میانی B70
ج- با لایه میانی مس خالص و د- مقدار عددی ضخامت لایه میانی محاسبه شده از شکل‌های الف تا ج

تحت ارتعاش برشی فرکانس بالا (20 کیلوهرتز) با دامنه نوسان زیاد، فرایند برش ریزخشونت‌های سطوح روی هم یک

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]



شکل5-ریزساختار فصل مشترک اتصال برای نمونه‌های دارای لایه میانی شامل الف، ب و ج- نمونه Cu، د، هـ و و-نمونه Zn و ز، ح، ط- نمونه B70

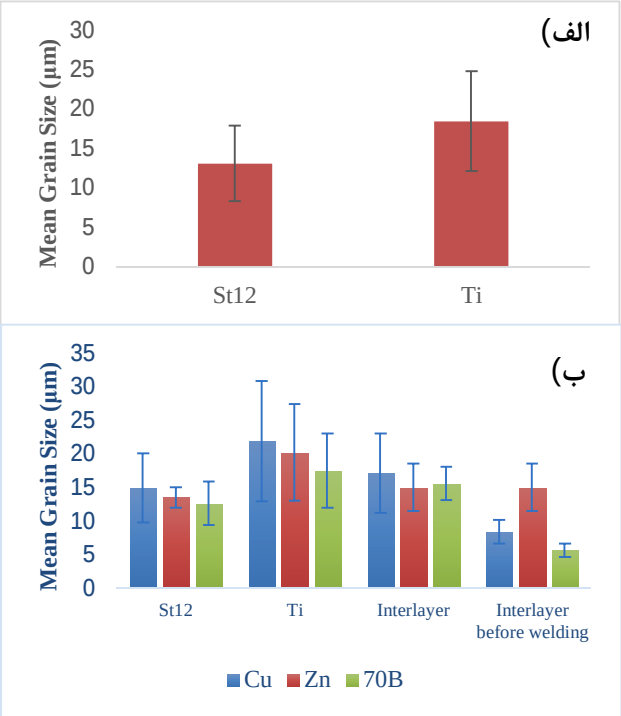
نرخ کرنش بالا ایجاد می‌کند. در نتیجه، دوقلویی به طور موثری فعال شده و مقادیری دوقلویی با ضخامت نانومتری در فصل مشترک جوشکاری تولید می‌شوند. وجود نرخ کرنش بالا برای کاهش اندازه دانه ضروری است. با توجه به ایجاد حرارت و افزایش دما در فصل مشترک جوشکاری، تبلور مجدد اتفاق می‌افتد. در نتیجه، تبلور مجدد دینامیکی باعث ایجاد ریزساختاری با دانه‌های نانومتری در خط جوش می‌گردد [36]. در خصوص نمونه 70B به دلیل قابلیت تغییر شکل پلاستیک (انرژی نقص در چیده شدن) کمتر نسبت به نمونه Cu، حرارت و تغییر شکل ایجاد شده در فصل مشترک کمتر بوده و در نتیجه دانه‌های تغییر شکل یافته دچار تبلور مجدد کمتری نسبت به Cu شده و بیشتر به همان شکل کشیده (شکل 5-و) باقی مانده‌اند. همچنین دانه‌های تبلور مجدد یافته به دلیل شرایط مذکور مجال رشد کمی داشته و به صورت ریز باقی‌مانده‌اند. در مورد نمونه Zn شرایط به صورتی است که از ابتدا به دلیل قابلیت تغییر شکل کم لایه میانی روی خالص، حرارت تولیدی و تغییر شکل فصل مشترک جوش در این نمونه بسیار محدود بوده و باعث ایجاد تعداد کمی دانه تغییر شکل یافته بدون تبلور مجدد شده است (شکل 5-ط) [34]. با این تفاسیر، اندازه دانه‌های فولاد کم کربن در نمونه Cu بیشتر از نمونه Zn بوده و آنهم بیشتر از 70B خواهد بود (شکل 6-ب). با در نظر گرفتن این نکته که ماده زیر هورن جوشکاری دچار تغییر شکل بیشتری نسبت به ماده قرار گرفته بر روی سندان می‌شود، شرایط کم و بیش مشابهی با شدت کمتر برای فلزپایه تیتانیمی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

نیز ایجاد خواهد شد. همچنین باید توجه شود که هدایت حرارتی تیتانیم ضعیف‌تر از فولاد بوده و لذا در زمان بیشتری تحت دمای بالا قرار خواهد گرفت. از سوی دیگر اندازه دانه اولیه تیتانیم نیز بیشتر از فولاد است (شکل 6-الف). بنابراین، منطقی مشابه با فولاد بر اندازه دانه‌های طرف تیتانیمی نمونه‌ها حاکم بوده و تفاوت آن‌ها در بالاتر بودن سطوح کمی اندازه‌ها در تیتانیم است (شکل 6-ب). لایه میانی به دلیل تمرکز تغییر شکل پلاستیک و حرارت تولیدی در فصل مشترک اتصال، دچار فرایندی مشابه با تحولات ذکر شده در خصوص طرف فولادی فصل مشترک جوشکاری می‌گردد که دارای شدت بیشتری است. با توجه به شکل(6-ب)، هردو لایه میانی مس خالص و 70B دچار تغییر شکل پلاستیک شدید، تبلور مجدد و رشد دانه شده‌اند که به دلیل بیشتر بودن اندازه دانه اولیه و همچنین تغییر شکل پلاستیک بیشتر در نمونه مس، اندازه دانه‌ی بیشتری برای آن بدست آمده است. با توجه به عدم تغییر محسوس اندازه دانه در لایه میانی روی خالص (شکل 6-ب)، به نظر می‌رسد که به دلیل تغییر شکل محدود در حین جوشکاری فراصوتی، تغییرات ریزساختاری چندانی اتفاق نیفتاده است.

3-3- ریزسختی‌سنجی

داده‌های مربوط به میکرو سختی‌سنجی فصل مشترک نمونه‌های دارای لایه میانی در شکل(7-الف) ارائه شده است. لازم به ذکر است که سختی اولیه فلزات پایه فولادی و تیتانیمی به ترتیب 117 و 191 ویکرز بود. با توجه به شکل(7-الف)، بالاترین سختی طرف فولادی اتصال مربوط به نمونه Cu بوده و پس از آن به ترتیب 70B و Zn قرار دارند. با در نظر گرفتن اندازه دانه نمونه‌ها در شکل(6-ب)، احتمالاً سختی نمونه‌ها ارتباط چندانی با اندازه دانه و رابطه هال – پچ نداشته و فاکتورهای دیگری در این زمینه موثر باشند. براساس مطالعات قبلی [36]، سختی منطقه فصل مشترک در جوشکاری فراصوتی بیشتر به چگالی نابجایی مربوط بوده و ارتباط زیادی با اندازه دانه ندارد. همانطوری که قبلاً بحث شد، سختی بالاتر طرف فولادی نمونه Cu مربوط به تغییر شکل بیشتر لایه میانی مربوطه و احتمالاً مربوط به چگالی بالاتر نابجایی‌ها در داخل آن باشد.



شکل6-الف- اندازه دانه اولیه فلزات پایه مورد استفاده و ب- اندازه دانه نهایی در فصل مشترک جوشکاری به همراه اندازه دانه اولیه لایه‌های میانی مورد استفاده

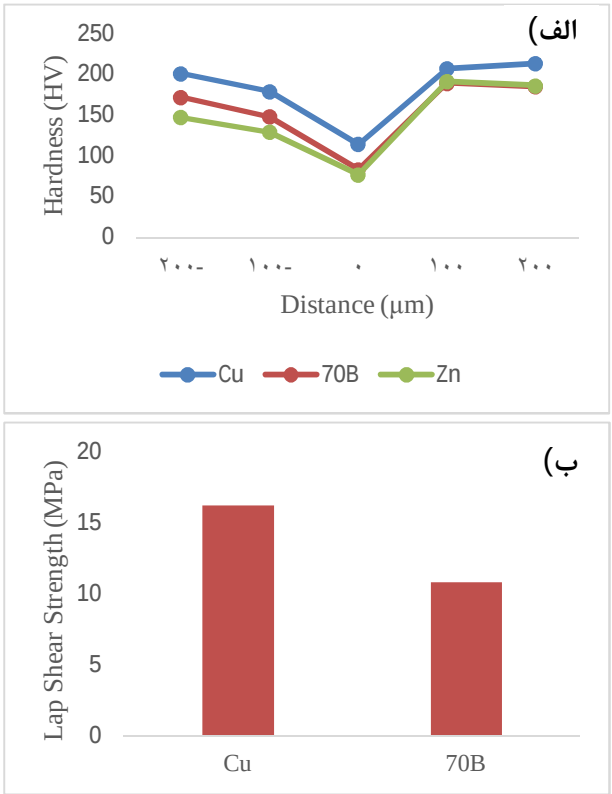
شکل فصل مشترک اتصال (در اصل لایه میانی) رخ داده است. با توجه به سختی اولیه فلز پایه فولادی، تغییر شکل پلاستیک زیادی برای طرف فولادی اتصال رخ داده که با در نظر گرفتن طرح اتصال منطقی به نظر می‌رسد. روند مشابهی در سمت تیتانیم اتصال نیز رخ داده است. با این تفاوت که ظاهراً تغییر شکل پلاستیک انجام شده برای افزایش زیاد در سختی تیتانیم (چگالی نابجایی‌ها) کافی نبوده و افزایش سختی به مقدار کم در نمونه Cu بدست آمده است. همچنین، افزایش سختی در نمونه‌های 70B و Zn مشاهده نشد. در خصوص مرکز فصل مشترک اتصال (لایه میانی)، بالاترین سختی مربوط به لایه میانی مس خالص بوده و پس از آن 70B و روی خالص قرار دارند. با توجه به قرار گرفتن سختی لایه‌های میانی به ترتیب قابلیت تغییر شکل، به نظر می‌رسد چگالی نابجایی‌ها در این مورد نیز نقش اصلی را ایفا می‌کند. ذکر این نکته لازم است که با نزدیک

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

شدن به مرکز فصل مشترک اتصال، سختی فلز پایه کاهش می‌یابد که این مسأله به بالاتر بودن دمای مرکز فصل مشترک جوشکاری و کارکرد فرایندهای ترمیم (بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی) نسبت داده می‌شود.

4-3- استحکام مکانیکی

داده‌های استحکام کشش برشی مربوط به نمونه‌های Cu و 70B در شکل(7-ب) ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل وجود جدایش در فصل مشترک اتصال نمونه دارای لایه میانی روی خالص، آزمون کشش برشی بر روی این نمونه انجام نشد. با توجه به شکل(7-ب)، استحکام اتصال Cu بیشتر از 70B است. دلیل این مسأله قابلیت تغییر شکل (انرژی نقص در چیده شدن) بیشتر نمونه دارای لایهی میانی مس خالص نسبت به نمونه 70B بوده که باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک بیشتر در فصل مشترک اتصال و ایجاد تماس فلز به فلز بهتر و قفل‌های مکانیکی بیشتر شده است.



شکل7- الف- داده‌های میکرو سختی سنجی فصل مشترک نمونه‌های دارای لایه میانی و ب- داده‌های استحکام کشش برشی مربوط به نمونه‌های Pure Cu و B70

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

- با توجه به نتایج بدست آمده، نمونه‌های Cu و Zn به ترتیب دارای بیشترین و کمترین چگالی باند هستند. چگالی باند نمونه 70B در بین این دو قرار می‌گیرد. این مساله به قابلیت تغییر شکل آن‌ها نسبت داده می‌شود.
- استحکام، سختی، تبلور مجدد و رشد دانه نمونه‌های تحقیق رابطه‌ی مستقیمی با قابلیت تغییر شکل لایه میانی آن‌ها داشته است. هرچه قابلیت تغییر شکل لایه میانی بیشتر باشد، چگالی باند نمونه بالاتر، تغییر شکل آن بیشتر و استحکام بالاتری دارد اما لزوما اندازه دانه ریزتری ندارد. این مساله ارتباط مستقیمی با محدودیت‌های ناشی از سیستم‌های لغزش کریستالی نشان می‌دهد.
- به دلیل قابلیت تغییر شکل پایین در نمونه Zn ناشی از محدودیت در سیستم‌های لغزش hcp، این نمونه علی رغم سختی کم دارای کمترین مقدار چگالی باند در بین نمونه‌های دارای لایه میانی است. چگالی باند پایین و در نتیجه استحکام ضعیف نمونه Zn باعث جدایش نمونه قبل از انجام آزمون کشش برشی شد.
- با توجه به لایه‌های میانی دارای بیشترین و کمترین سختی اولیه، به ترتیب نمونه‌های Cu و Zn، چگالی باند نمونه، تغییر شکل و استحکام آن ارتباط مستقیمی با سختی اولیه لایه میانی ندارد.
- لایه میانی دارای بالاترین دمای ذوب، نتایج بهتری نسبت به سایر موارد ارائه کرده است. در نتیجه، به نظر می‌رسد تاثیر بالا رفتن دمای اتصال و کاهش تنش تسلیم فلز ناشی از آن در درجه اهمیت پایین‌تری نسبت به قابلیت تغییر شکل قرار می‌گیرد.

منابع

1-Quazi, M. M., M. Ishak, M. A. Fazal, A. Arslan, Saeed Rubaiee, Abdullah Qaban, M. H. Aiman, Tipu Sultan, M. M. Ali, and S. M. Manladan. 2020. Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys. *Optics & Laser Technology* 126: 106090.

2-Wang, Kehuan, Gang Liu, Jie Zhao, Jianlong Wang, and Shijian Yuan. 2016. Formability and microstructure

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

titanium alloy plate joined with electron beam welding. *Metallurgical and Materials Transactions B* 41: 1129-1138.
15-Zhang, Binggang, Ting Wang, Guoqing Chen, and Jicai Feng. 2012. Contact reactive joining of TA15 and 304 stainless steel via a copper interlayer heated by electron beam with a beam deflection. *Journal of materials engineering and performance* 21: 2067-2073.
16-Mo, Defeng, Yang Wang, Yongjian Fang, Tingfeng Song, and Xiaosong Jiang. 2018. Influence of welding speed on the microstructure and mechanical properties of electron beam-welded joints of TC4 and 4J29 sheets using Cu/Nb multi-interlayers. *Metals* 8(10): 810.
17-Hao, Xiaohu, Peng Li, Yueqing Xia, Honggang Dong, Pengxiao Wang, and Dejun Yan. 2019. Microstructure and mechanical properties of dissimilar TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint using copper filler wire. *Metallurgical and Materials Transactions A* 50: 688-703.
18-Chu, Qiaoling, Tuo Xia, Lin Zhang, Pengkang Zhao, Min Zhang, Jianming Zheng, Fuxue Yan, Peng Cheng, and Cheng Yan. 2022. Interfacial microstructure and mechanical properties of titanium/steel dissimilar joining. *Materials Letters* 307: 131069.
19-Gao, M., S. W. Mei, Z. M. Wang, X. Y. Li, and X. Y. Zeng. 2012. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer. *Science and Technology of welding and joining* 17(4): 269-276.
20-Pugacheva, N. B., A. M. Orishich, E. G. Volkova, A. V. Makarov, E. I. Senaeva, and A. G. Malikov. 2022. Role of ultra-fine intermetallic particles and martensite in strengthening of AISI 321/Cu/Ti laser welded joint. *Materials Characterization* 185: 111702.
21-Zhang, Y., D. Q. Sun, X. Y. Gu, Z. Z. Duan, and H. M. Li. 2018. Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer. *Materials Letters* 212: 54-57.
22-Cherepanov, A. N., A. M. Orishich, N. B. Pugacheva, and V. P. Shapeev. 2015. Investigation of the structure and properties of titanium-stainless steel permanent joints obtained by laser welding with the use of intermediate inserts and nanopowders. *Thermophysics and aeromechanics* 22(2): 135-142.
23-Zhang, Yan, DaQian Sun, XiaoYan Gu, and HongMei Li. 2016. A hybrid joint based on two kinds of bonding mechanisms for titanium alloy and stainless steel by pulsed laser welding. *Materials Letters* 185: 152-155.
24-Zhang, Yan, D. Q. Sun, X. Y. Gu, and H. M. Li. 2018. Nd: YAG pulsed laser welding of dissimilar metals of titanium alloy to stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94: 1073-1085.
25-Gao, Xiao-Long, Xiao-Qiang Wang, Jing Liu, and Lun-kun Li. 2020. A novel laser welding method for the reliable joining of NiTi/301SS. *Materials Letters* 268: 127573.
26-Ishida, K., Y. Gao, K. Nagatsuka, M. Takahashi, and K. Nakata. 2015. Microstructures and mechanical evolution for hot gas forming of laser-welded TA15 titanium alloy tubes. *Materials & Design* 91: 269-277.
3-Ning, Jie, Lin-Jie Zhang, Gui-chuan Jiang, Miao-xia Xie, Xian-qing Yin, and Jian-xun Zhang. 2017. Narrow gap multi-pass laser butt welding of explosion welded CP-Ti/Q235B bimetallic sheet by using a copper interlayer. *Journal of Alloys and Compounds* 701: 587-602.
4-Zhang, Yan, YuanBo Bi, JianPing Zhou, DaQian Sun, and HongMei Li. 2021. Weldability and machinability of the dissimilar joints of Ti alloy and stainless steel–A review. *International Journal of Materials Research* 112(10): 826-847.
5-Cherepanov, A. N., V. I. Mali, Iu N. Maliutina, A. M. Orishich, A. G. Malikov, and V. O. Drozdov. 2017. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90: 3037-3043.
6-Froes Fh. 2015. Titanium: physical metallurgy, processing, and applications. ASM international.
7-Asadi, S., T. Saeid, A. Valanezhad, I. Watanabe, and J. Khalil-Allafi. 2020. Effects of Ni powder addition on microstructure and mechanical properties of NiTi to AISI 304 stainless steel archwire dissimilar laser welds. *Journal of Manufacturing Processes* 55: 13-21.
8-Asadi, Saeed, Tohid Saeid, Alireza Valanezhad, Ikuya Watanabe, and Jafar Khalil-Allafi. 2020. The effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of dissimilar laser welded superelastic NiTi to austenitic stainless steels orthodontic archwires. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 109: 103818.
9-Zhang, Kaiping, Peng Peng, and Y. Norman Zhou. 2022. Laser welding-brazing of NiTi/304 stainless steel wires with beam defocus and large offset. *Materials Science and Engineering: A* 835: 142660.
10-Zhang, Kaiping, Fuyun Liu, Caiwang Tan, Y. Norman Zhou, and Peng Peng. 2022. Effect of heat input modes on microstructure, mechanical properties and porosity of laser welded NiTi-316L joints: A comparative study. *Materials Science and Engineering: A* 848: 143426.
11-Satoh, Gen, Y. Lawrence Yao, and Caian Qiu. 2013. Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti–SS dissimilar material pair. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66: 469-479.
12-Chen, Shuhai, Mingxin Zhang, Jihua Huang, Chengji Cui, Hua Zhang, and Xingke Zhao. 2014. Microstructures and mechanical property of laser butt welding of titanium alloy to stainless steel. *Materials & Design* 53: 504-511.
13-Chen, Hui-Chi, Guijun Bi, Bing Yang Lee, and Chek Kweng Cheng. 2016. Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes. *Journal of Materials Processing Technology* 231: 58-65.
14-Liu, Chuan, Bing Wu, and Jian Xun Zhang. 2010. Numerical investigation of residual stress in thick

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]

properties of friction stir welded lap joints of commercially pure titanium and 304 stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds* 630: 172-177.

27-Gotawala, Nikhil, and Amber Shrivastava. 2020. Microstructural analysis and mechanical behavior of SS 304 and titanium joint from friction stir butt welding. *Materials Science and Engineering: A* 789: 139658.

28-Li, Peng, Jinglong Li, Muhammad Salman, Li Liang, Jiangtao Xiong, and Fusheng Zhang. 2014. Effect of friction time on mechanical and metallurgical properties of continuous drive friction welded Ti6Al4V/SUS321 joints. *Materials & Design (1980-2015)* 56: 649-656.

29-Muralimohan, C. H., M. Ashfaq, Rouholah Ashiri, V. Muthupandi, and K. Sivaprasad. 2016. Analysis and characterization of the role of Ni interlayer in the friction welding of titanium and 304 austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A* 47: 347-359.

30-Kundu, Sukumar, and Gopinath Thirunavukarasu. 2023. Diffusion Welding of Ti6Al4V and 17-4 Stainless Steel Using Cu/Ni Microlayers. *Journal of Materials Engineering and Performance* 32(2): 735-751.

31-Shirzadi, Amir A., Arijit Laik, Raghvendra Tewari, Jonathan Orsborn, and Gautam K. Dey. 2018. Gallium-assisted diffusion bonding of stainless steel to titanium; microstructural evolution and bond strength. *Materialia* 4: 115-126.

32-Gallego-Juárez JA, Graff KF. 2014. Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound. Elsevier.

33-Lin, Jhe-Yu, Shoichi Nambu, and Toshihiko Koseki. 2020. Interfacial phenomena during ultrasonic welding of ultra-low-carbon steel and pure Ti. *Scripta Materialia* 178: 218-222.

34-Lin, Jhe-Yu, Shoichi Nambu, Mao Liu, and Toshihiko Koseki. 2020. Influence of Al and Ni interlayers on interfacial strength evolution during ultrasonic welding of ultra-low-carbon steel and pure Ti. *Materials Science and Engineering: A* 798: 140073.

35-Ao, S. S., M. P. Cheng, W. Zhang, J. P. Oliveira, S. M. Manladan, Z. Zeng, and Zhen Luo. 2022. Microstructure and mechanical properties of dissimilar NiTi and 304 stainless steel joints produced by ultrasonic welding. *Ultrasonics* 121: 106684.

36-Ni, Z. L., Y. Liu, Y. H. Wang, and B. Y. He. 2022. Interfacial bonding mechanism and fracture behavior in ultrasonic spot welding of copper sheets. *Materials Science and Engineering: A* 833: 142536.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.16]