



The Effect of Brass Interlayer Applied as Foil and Thermal Spray Coat on Microstructure and Mechanical Properties of Transient Liquid Phase Bonding of Al Alloy to Ti Alloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Farshbaf M.¹ MSc,
Mofid M.A.*¹ PhD,
Belbasi M.¹ PhD,
Jafarzadegan M.² PhD,
Naeimian H.¹ MSc

How to cite this article

Farshbaf M, Mofid M.A, Belbasi M, Jafarzadegan M, Naeimian H. The Effect of Brass Interlayer Applied as Foil and Thermal Spray Coat on Microstructure and Mechanical Properties of Transient Liquid Phase Bonding of Al Alloy to Ti Alloy. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(10):2423-2432.

¹Department of Petroleum, Mining and Material, Faculty of Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

*Correspondence

Address: Department of Petroleum, Mining and Material, Faculty of Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Oreg Street, Poonk Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1955847781

Phone: -

Fax: +98 (21) 44600022

moh.ammar_mofid@iauctb.ac.ir

Article History

Received: January 30, 2020

Accepted: July 28, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

Thermal spraying is an economical and rapid coating process that creates a rough and clean surface. As a result, it can be used for applying the interlayer in transient liquid phase bonding. In the present study, transient liquid phase bonding Al 2024 to Ti-6Al-4V was investigated using a brass interlayer, as well as thermal spray of brass on Al substrate. The results show that by using thermal spray coat as interlayer, because of the formation of different defects that can be considered as diffusion channels, diffusion potential of Ti and Al becomes higher at the interface. The mechanism of bonding formation involves the diffusion of Cu into Al and Ti base materials and formation of TiAl₃, TiAl, Al₂Cu, and AlCuMg phases and also diffusion of Cu through Al grain boundaries and formation of eutectic phases across the grain boundaries. The formation of these intermetallic phases was confirmed by energy dispersive spectroscopy and X-ray diffraction. Dissolution of the base metals in the joint area and the isothermal solidification process of the thermal sprayed interlayer is more and faster than the foil interlayer. The joint with thermal spray brass coat as interlayer gives higher shear strength of 25MPa in comparison with the case of using brass foil as interlayer (14.6MPa). The decrease in bond strength can be attributed to aggregation and growth of the brittle intermetallics near the joint interface due to lower diffusion potential of Al and Ti in the joint zone.

Keywords Transient Liquid Phase; Brass Foil; Thermal Spray; Al Alloy; Ti Alloy; Microstructure

CITATION LINKS

[1] Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface microstructure and strength properties [2] Transient liquid phase bonding of Al 2024 to Ti-6Al-4V alloy using Cu-Zn interlayer [3] Natural convection in metal foams with open cells [4] Diffusion bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V using Cu coatings and Sn-3.6Ag-1Cu interlayers [5] An investigation on microstructure evolution and mechanical properties during liquid state diffusion bonding of Al2024 to Ti-6Al-4V [6] Effect of process parameters on semi-solid TLP bonding of Ti-6Al-4V to Mg-AZ31 [7] Effects of successive-stage transient liquid phase (S-TLP) on microstructure and mechanical properties of Al2024 to Ti-6Al-4V joint [8] Transient liquid phase (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy [9] Microstructural evaluation and mechanical properties of the diffusion bonded Al/Ti alloys joint [10] Study of TLP bonding of Ti-6Al-4V alloy produced by vacuum plasma spray forming and forging [11] Process parameter selection for uniform deposition of chrome carbide-nickelchrome (Cr3C2-20NiCr) thermal flame spray coatings on stainless steel (SS347H) boiler tube [12] ASM Handbook: Alloy phase diagrams [13] Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal) [14] Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying [15] Effect of thermal tempering on microstructure and mechanical properties of Mg-AZ31/Al-6061 diffusion bonding [16] Developing temperature- time and pressure-time diagrams for diffusion bonding AZ80 magnesium and AA6061 aluminium alloys [17] The coexistence of two S (Al₂CuMg) phases in Al-Cu-Mg alloys [18] Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding [19] Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy [20] Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air [21] Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel

تاثیر لایه واسط برنج اعمالی به صورت فویل و پوشش پاشش حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فاز مایع گذرای آلایژ آلومینیوم به تیتانیم

محمود فرشایف MSc

گروه مهندسی نفت معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

محمد عمار مفید PhD

گروه مهندسی نفت معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

مجید بلباسی PhD

گروه مهندسی نفت معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

مصطفی جعفرزادگان PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۱)، قزوین، ایران

حمید نعیمیان MSc

گروه مهندسی نفت معدن و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

چکیده

از آنجایی که پاشش حرارتی، فرآیندی اقتصادی و سریع برای پوشش‌دهی سطح محسوب می‌شود و می‌تواند سطحی زیر و تمیز ایجاد نماید، می‌توان از آن به منظور اعمال لایه واسط در روش اتصال‌دهی فاز مایع گذرا استفاده نمود. در تحقیق حاضر، اتصال فاز مایع گذرای آلایژ Al2024 به Ti-6Al-4V با استفاده از لایه واسط فویل برنج و نیز پاشش حرارتی برنج بر روی فلز پایه آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از لایه واسط اعمالی به صورت پاشش حرارتی، به دلیل ایجاد عیوب مختلف، مجراهای بیشتری برای نفوذ فراهم شده و به همین علت، پتانسیل نفوذ آلومینیوم و تیتانیم در فصل مشترک اتصال افزایش می‌یابد. سازوکار ایجاد اتصال، مشتمل بر نفوذ مس به سمت آلومینیوم و تیتانیم و تشکیل ترکیبات بین فلزی نظیر TiAl، TiAl₃، Al₂Cu و AlCuMg و همچنین نفوذ مس از طریق مرزدهانه‌های آلومینیوم و تشکیل فاز یوتکتیک است. تشکیل این ترکیبات بین فلزی با استفاده از طیف‌سنجی تفکیک انرژی و پراش پرتو ایکس تایید شد. انحلال فلزات پایه در ناحیه اتصال و فرآیند انجماد هم‌دما در حالتی که از لایه واسط پاشش حرارتی استفاده شد، بیشتر و سریع‌تر از حالتی بود که از فویل به عنوان لایه واسط استفاده شد. استحکام برشی ایجادشده در حالت استفاده از پوشش برنج پاشش حرارتی، بیشتر (۲۵ مگاپاسکال) از حالتی بود که از لایه واسط به صورت فویل (۱۴/۶ مگاپاسکال) استفاده شد. این کاهش استحکام، می‌تواند به علت تجمع و رشد ترکیبات ترد بین فلزی در نزدیکی فصل مشترک اتصال، به دلیل کاهش پتانسیل نفوذی آلومینیوم و تیتانیم در ناحیه اتصال باشد.

کلیدواژه‌ها: فاز مایع گذرا، فویل برنج، پاشش حرارتی، آلایژ آلومینیوم، آلایژ تیتانیم، ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

*نویسنده مسئول: moh.ammar_mofid@iauctb.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر توجه زیادی به تولید اتصالات غیرهم‌جنس بین مواد گوناگون از طریق جوش‌کاری نفوذی معطوف شده است. به این علت است که در جوش‌کاری نفوذی، بسیاری از مشکلاتی که در هنگام جوش‌کاری ذوبی با آن مواجه هستیم عملاً منتفی می‌شوند. به طوری که این روش جوش‌کاری به عنوان یک فرآیند تولید نزدیک به شکل نهایی مطرح شده است^[1]. اتصال‌دهی آلایژهای آلومینیوم و تیتانیم، در راستای ساخت سازه‌های هیبریدی در صنعت هوافضا مهم و قابل توجه است^[2]. در اتصال‌دهی آلایژهای آلومینیوم و تیتانیم به یکدیگر، دو چالش مهم وجود دارد. اول، بین خواص فیزیکی (نقطه ذوب، هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی خطی و غیره) این دو فلز اختلاف زیادی وجود دارد. در نتیجه امکان جوش‌کاری ذوبی این دو فلز به هم، عملاً منتفی است^[3]. یک فرآیند اتصال‌دهی که به صورت بالقوه قابلیت خوبی در اتصال‌دهی آلایژهای فلزی پیشرفته از خود نشان داده است، اتصال‌دهی نفوذی است^[4]. چالش دوم، تشکیل غیرقابل کنترل ترکیبات بین فلزی TiAl و TiAl₃، ناشی از تماس مستقیم آلومینیوم و تیتانیم است^[5]. با قراردادن یک لایه واسط بین دو آلایژ، تشکیل این ترکیبات بین فلزی کنترل خواهد شد. اتصال فاز مایع گذرا یک روش پیشرفته جوش‌کاری حالت جامد است که قابلیت اتصال‌دهی فلزات هم‌جنس و غیرهم‌جنس نظیر آلومینیوم و تیتانیم را دارد^[6]. در این روش، کیفیت اتصال به ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه اتصال بستگی دارد. بنابراین لازم است متغیرهای فرآیند نظیر دما، فشار و زمان اتصال‌دهی، جهت دستیابی به یک اتصال مطلوب بهینه‌سازی شوند.

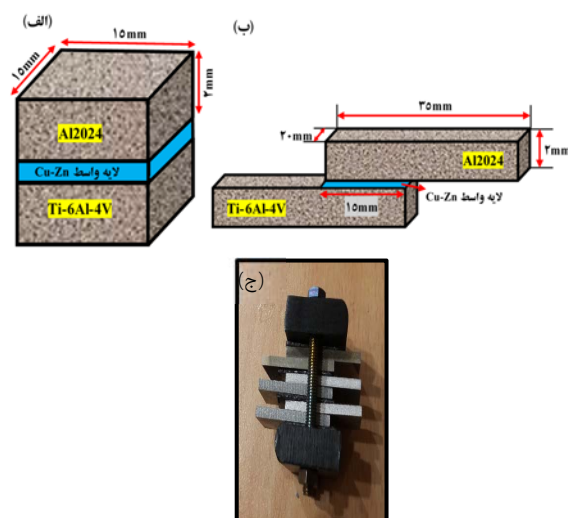
اتصال نفوذی و اتصال فاز مایع گذرای آلومینیوم و تیتانیم با استفاده از مواد واسط گوناگون توسط محققین مختلف انجام شده است^[2-8]. به این منظور، انواع متنوعی از فلزات به عنوان لایه واسط به کار گرفته شده‌اند که هر یک اثر متفاوتی بر خواص ناحیه نفوذی داشته‌اند. //هاژ/ و همکاران اتصال فاز مایع گذرای آلایژهای Al7075 به Ti-6Al-4V را با استفاده از لایه‌های واسط مس با ضخامت ۲۲ میکرومتر انجام دادند. پیشنهاد استحكام به دست آمده در زمان اتصال‌دهی ۳۰ دقیقه ۱۹/۵ مگاپاسکال بوده است^[8]. همین محققین، در پژوهشی دیگر، از لایه واسط Sn-3/6Ag-1Cu استفاده کردند^[4]. کنویسی و موسوی‌خویی^[3] و کنویسی و همکاران^[9] با استفاده از لایه‌های واسط Sn-10Zn-3/5Bi و Sn-4Ag-3/5Bi با ضخامت ۵۰ میکرومتر، به ترتیب به استحکام‌های ۳۰ و ۳۶ مگاپاسکال در اتصال Al7075 به Ti-6Al-4V دست یافتند. همچنین سماواتیان و همکاران^[5] با استفاده از فویل قلع خالص به ضخامت ۸۰ میکرومتر به عنوان لایه واسط، به استحکام ۳۵ مگاپاسکال در اتصال فاز مایع گذرای آلایژهای Al2024 به Ti-6Al-4V رسیدند.

ترکیب شیمیایی آن با استفاده از روش طیف سنجی تفکیک انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه آن در جدول ۲ ارائه شده است. بود. متغیرهای مورد استفاده برای اعمال پوشش پاشش شعله‌ای شامل فشار اکسیژن و استیلن، به ترتیب $2/1$ و $3/1$ بار، سرعت تزریق سیم یک میلی‌متر بر ثانیه، فاصله پاشش 150 میلی‌متر و نهایتاً دبی گاز اکسیژن و استیلن، به ترتیب 0.00092 و 0.00075 مترمکعب بر ثانیه بودند. متغیرهای فوق بر مبنای اطلاعات موجود در منابع انتخاب شدند^[11]. همچنین سطح فلز پایه تیتانیوم با استفاده از روش‌های معمول سمباده‌زنی، با کاغذ سمباده نهایی شماره 1200 مورد آماده‌سازی قرار گرفت. نمونه‌ها در حمام استون به صورت فراصوتی مورد تمیزکاری قرار گرفتند تا هر گونه آلودگی چسبیده بر روی سطح زدوده شود. سپس نمونه‌ها در هوا خشک شدند.

فرآیند فاز مایع گذرا، تحت خلاء 10^{-3} پاسکال در کوره انجام پذیرفت که در شکل ۲ نمایش داده شده است. از گیره‌های نمایش داده شده در شکل ۱- ج جهت تثبیت وضعیت نمونه‌ها با یکدیگر و اعمال فشار اتصال‌دهی معادل یک مگاپاسکال استفاده شد.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فلزات پایه مورد استفاده در تحقیق حاضر (واحد اعداد برحسب درصد وزنی)

عناصر	آلیاژ	
	Ti-6Al-4v	Al2024
Ti	بقیه	۰/۰۳
Al	۰/۸۰	بقیه
V	۴/۱۴	۰/۰۱
Cu	۰/۰۲	۴/۱۰
Mg	-	۱/۰۰
Mn	<0.05	۰/۶۰
Fe	۰/۰۰	۰/۰۰
Si	۰/۰۲	۰/۱۱
Zn	-	-



شکل ۱) ابعاد و چگونگی چیدمان فلزات پایه در: (الف) نمونه متالوگرافی، (ب) نمونه آزمایش استحکام برشی، (ج) گیره

همان طور که ذکر شد، ماده واسط نقش مهمی در تعیین مشخصات ناحیه اتصال ایفا می‌کند^[10]. فویل‌های آلیاژی علاوه بر گران قیمت بودن، فرآیند تولید پیچیده‌ای دارند. از همین رو، می‌توان از لایه‌های واسط ایجاد شده از طریق فرآیند پاشش حرارتی، به عنوان جایگزینی برای فویل‌ها، به منظور کاهش تشکیل ترکیبات بین فلزی استفاده کرد. ارزان بودن، در دسترس بودن و گستره وسیع ضخامت از جمله مزایای استفاده از لایه‌های واسط ایجاد شده به روش پاشش حرارتی هستند.

مروری بر منابع نشان می‌دهد مطالعه قابل توجهی در زمینه فرآیند فاز مایع گذرای آلیاژهای Al2024 به Ti-6Al-4V با استفاده از لایه واسط اعمال شده به روش پاشش حرارتی انجام نشده است. در تحقیق حاضر اتصال نفوذی آلیاژهای آلومینیوم- تیتانیوم با استفاده از لایه واسط برنج، مورد مطالعه قرار گرفته است. لایه واسط برنج، به دو صورت فویل و پاشش حرارتی، بین فلزات پایه اعمال شد. انتظار می‌رود با توجه به ماهیت لایه واسط اعمالی به روش پاشش حرارتی، رفتار فاز مایع گذرای جوش اعمالی با استفاده از لایه واسط برنج، اعمال شده از طریق پاشش حرارتی، متفاوت از نمونه‌ای باشد که با استفاده از لایه واسط به صورت فویل، اتصال‌دهی شده است. هدف، ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات فاز مایع گذرای آلومینیوم- تیتانیوم با استفاده از برنج، به عنوان لایه واسط است.

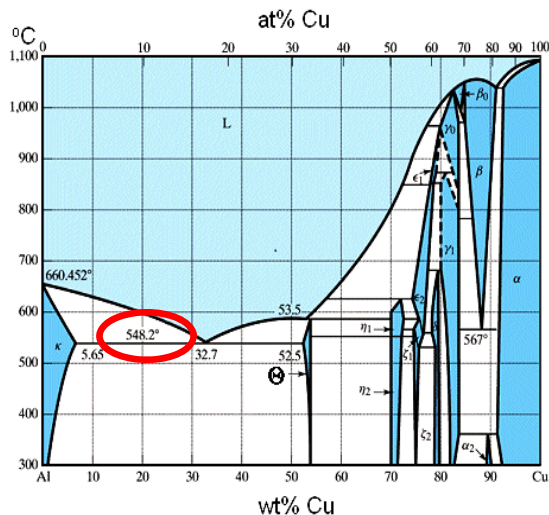
روش انجام آزمایش

فلزات پایه مورد استفاده در اتصال نفوذی آلیاژهای Al2024 و Ti-6Al-4V بودند. ترکیب شیمیایی دقیق فلزات پایه مورد استفاده، در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌هایی با ابعاد $15 \times 15 \times 2$ میلی‌متر جهت متالوگرافی و $35 \times 20 \times 2$ میلی‌متر جهت آزمایش استحکام برشی از طریق برش‌کاری آماده‌سازی شدند، که به ترتیب در شکل‌های ۱- الف و ۱- ب آورده شده است. چگونگی قرارگیری نمونه‌ها در گیره، در شکل ۱- ج نشان داده شده است. سپس دو لایه واسط مختلف، شامل فویل برنج (Cu-37Zn) با ضخامت 30 میکرومتر که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ آمده است و پوشش برنج اعمالی به روش پاشش شعله‌ای سیم، جهت اتصال Al2024 و Ti-6Al-4V اعمال شدند. از سیستم پاشش شعله‌ای اکسی استیلن (تفنگ پاشش شعله‌ای متکو) با پیکربندی استاندارد به منظور اعمال پوشش لایه واسط بر روی زیرلایه استفاده شد. در نمونه‌ای که لایه واسط به صورت پاشش حرارتی اعمال شده بود، قبل از انجام عملیات پاشش حرارتی، زیرلایه آلومینیومی با استفاده از ذرات ساینده آلومینا با مش 36 ، مورد ماسه‌پاشی و آماده‌سازی قرار گرفت. سپس زیرلایه آلومینیومی با استفاده از مفتول Cu-Zn تا ضخامت حدود 80 میکرومتر مورد پوشش‌دهی به روش پاشش حرارتی قرار گرفت. فاصله کناره‌گیر پاشش 150 میلی‌متر و آلیاژ فلزی مورد استفاده جهت پاشش حرارتی شامل یک مفتول توپر از جنس آلیاژ برنج که

جدول (۲) ترکیب شیمیایی فویل و مفتول توپر برنج (اعداد برحسب درصد وزنی)

عناصر/لایه وسط	فویل برنج	مفتول توپر برنج
Cu	۶۲/۹۵	۵۹/۹۵
Zn	۳۷/۰۰	۴۰/۰۲
Mn	۰/۰۱	۰/۰۱
Pb	۰/۰۲	۰/۰۱
S	۰/۰۱۳	۰/۰۱
ضخامت فویل/قطر سیم	۳۰ میکرومتر	۱/۲ میلی‌متر

استحکام برشی نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM D1002-99 [13] با سرعت حرکت فک یک میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. به‌منظور به‌دست‌آوردن تغییرات سختی، آزمایش ریزسختی‌سنجی با استفاده از الماسه ویکرز با نیروی ۵۰ گرم و زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه بر روی کلیه نمونه‌ها از فلز پایه آلیاژ Al2024 تا فلز پایه آلیاژ Ti-6Al-4V انجام پذیرفت. استاندارد مرجع برای انجام سختی سنجی ASTM E 384-16 بوده است [13].



نمودار (۱) منحنی فاز دوتایی Al-Cu [11]

نتایج و بحث

ریزساختار و تغییرات ترکیب شیمیایی

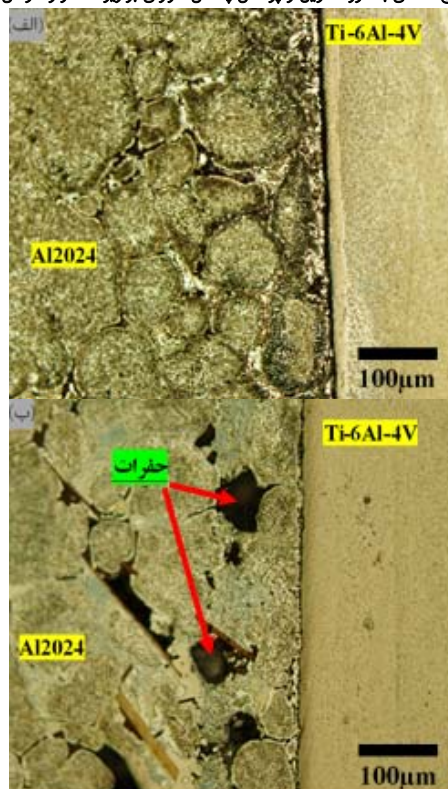
ریزساختار Al2024 و Ti-6Al-4V با استفاده از میکروسکوپ نوری، مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۳-الف مشخص است، Ti-6Al-4V یک آلیاژ دو فازی (α - β) متشکل از دو فاز β با ساختار مکعبی مرکزپر و فاز α با ساختار شش‌وجهی فشرده است. همچنین شکل ۳-ب نشان‌دهنده اندازه دانه حدود ۱۱۰ میکرومتر برای فلز پایه آلیاژ آلومینیوم است. در شکل ۳-ج، لایه برنج اعمالی به روش پاشش حرارتی، بر روی فلز پایه Al2024 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لایه اعمالی دارای ضخامت متوسط ۸۰ میکرومتر است. ریزساختار پوشش به‌دست‌آمده از فرآیند پاشش حرارتی، در این تصویر قابل مشاهده است. جدول ۳ ترکیب شیمیایی پوشش برنج رسوب‌داده‌شده بر روی زیرلایه آلومینیومی را نشان می‌دهد.

تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اتصال جوش‌کاری‌شده در دمای ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان نگهداری ۶ دقیقه با استفاده از فویل برنج و همچنین پوشش پاشش حرارتی برنج، به‌عنوان لایه واسط، در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور کلی همان‌طور که راجیدی و همکاران تصریح می‌کنند واضح است که ساختار لایه واسط پاشش حرارتی‌شده، دارای تنش‌های پسماند و عیوب بیشتری در مقایسه با نمونه با فویل برنج، به‌عنوان لایه واسط است که این موضوع به ماهیت فرآیند تولید مربوط می‌شود [14].



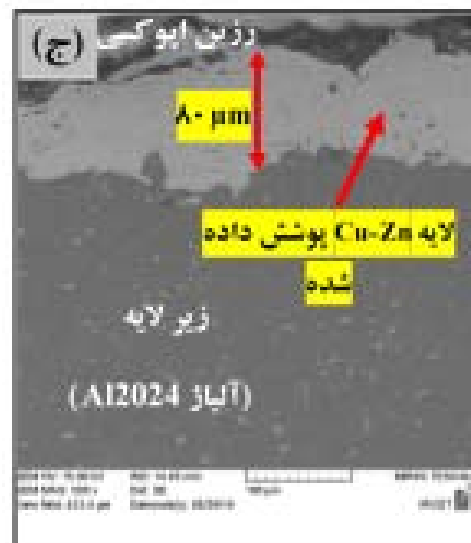
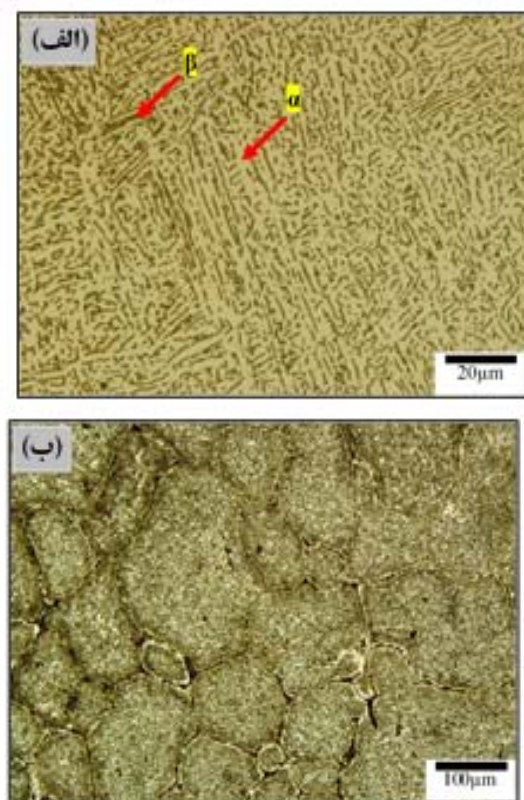
شکل (۲) کوره مورد استفاده جهت انجام جوش‌کاری فاز مایع‌گذرا

متغیرهای بهینه‌سازی‌شده مورد استفاده، شامل دمای اتصال‌دهی ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان نگهداری ۶ دقیقه و نرخ گرمایش ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بودند. دمای اتصال‌دهی ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد، با توجه به منحنی فازی دوتایی آلومینیوم-مس (نمودار ۱) انتخاب شد. مطابق نمودار ۱، دمای یوتکتیک، چیزی در حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است [12]. دمای اتصال‌دهی، ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد (۲۰ درجه بالاتر از دمای یوتکتیک) انتخاب شد تا از وقوع ذوب اطمینان حاصل شود. بعد از اتمام جوش‌کاری، تشکیلات در محفظه فرآیند و تحت خلاء مورد سرمایش قرار گرفتند. به‌منظور بررسی‌های متالورژیکی، نمونه‌های اتصال‌دهی‌شده، به‌صورت عرضی برش داده شدند. محلول حکاکی مورد استفاده برای هردو آلیاژ، شامل هیدروفلوئوریک‌اسید، نیتریک‌اسید و آب بود که به‌ترتیب ۵، ۱۰ و ۸۵ میلی‌لیتر بودند. به‌منظور تعیین مشخصات اتصال و نیز شناسایی ترکیبات بین فلزی در محل اتصال، از میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی تفکیک انرژی و پراش پرتو ایکس استفاده شد.



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه فصل مشترک اتصال ساخته شده با استفاده از: (الف) فویل برنج، (ب) پوشش برنج پاشش حرارتی، به عنوان لایه واسط

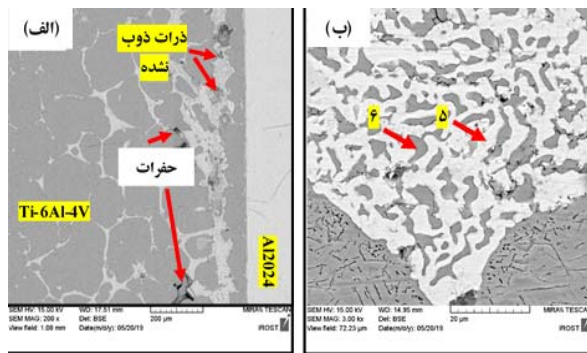
در فرآیند جوش کاری نفوذی، زبری سطح یکی از مهم ترین متغیرها محسوب می شود که نقش بسیار مهمی در تعیین استحکام اتصال ایفا می نماید. برای ایجاد یک اتصال حالت جامد، سطوح اتصال باید به اندازه کافی به هم نزدیک شوند تا نیروهای جاذبه کوتاه برد بین اتمی فعال شده و اتصال به واسطه نفوذ، برقرار شود^[15]. سطوح اولیه مورد جوش کاری، باید فاقد از هر گونه آلودگی سطحی باشند. در درجه اول، اکسیدهای سطحی بر روی آلیاژهای آلومینیوم، از لحاظ فیزیکی بسیار چسبنده و از لحاظ شیمیایی بسیار پایدار هستند. این اکسیدها حتی در دماهای بالا نیز در آلومینیوم نامحلول هستند^[16]. در نتیجه، این اکسیدها مشکلاتی را برای اتصال کامل فلز به فلز در فصل مشترک ایجاد می نمایند. این مساله باعث لزوم پوشش دهی سطوح، پیش از فرآیند اتصال دهی می شود. پاشش حرارتی، یک فرآیند پوشش دهی اقتصادی و سریع است که باعث ایجاد سطحی زبر و تمیز می شود. از سوی دیگر، اصلی ترین راه مقابله با مشکل حضور لایه های اکسیدی در جوش کاری نفوذی، اعمال سطوح نسبتاً زبری است که باعث ایجاد اتصالی با استحکام بالاتر خواهند شد. تغییر شکل پلاستیک موضعی در مراحل ابتدایی اتصال دهی، باعث گسیختگی لایه اکسیدی می شود. در سطوح ناهموار، احتمال تغییر شکل برآمدگی ها بیشتر است. در نتیجه، گسیختگی های بیشتری در لایه اکسیدی اتفاق خواهد افتاد و این امر باعث بهبود اتصال فلز به فلز خواهد شد.



شکل ۳) تصویر میکروسکوپ نوری از: (الف) فلز پایه Ti-6Al-4V، (ب) فلز پایه Al2024، (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه برنج پوشش داده شده به روش پاشش حرارتی بر روی زیرلایه آلومینیوم

جدول ۳) ترکیب شیمیایی پوشش برنج رسوب داده شده بر روی زیرلایه آلومینیوم (اعداد برحسب درصد وزنی)

عناصر لایه واسط پاشش حرارتی	مقدار
Cu	۶۶/۴۷
Zn	۲۹/۹۳
Pb	۱/۳۲
Sn	۱/۰۰
Al	۰/۳۴
Ni	۰/۲۷



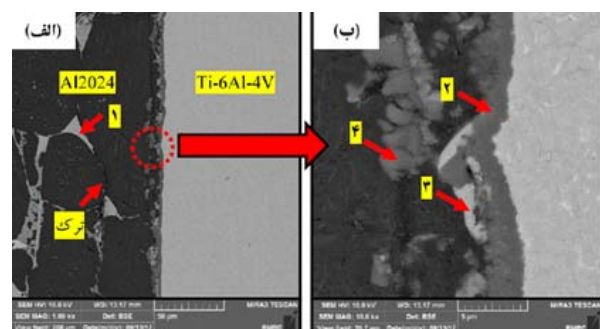
شکل ۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه جوشکاری شده با استفاده از پوشش پاشش حرارتی برنج به عنوان لایه واسطه؛ (الف) بزرگنمایی کم، (ب) بزرگنمایی زیاد از ناحیه فصل مشترک

جدول ۴) نتایج طیفسنجی تفکیک انرژی (درصد وزنی) از نواحی منتخب نمونه‌های اتصال‌دهی شده با فویل برنج و پوشش پاشش حرارتی برنج به عنوان لایه واسطه، نشان داده شده در شکل‌های ۵ و ۶

فاز پیشنهادی	Al	Ti	Cu	Zn	Mg
Al ₂ Cu-Al ₂ CuMg	۴۷/۴۱	۰/۵۸	۴۸/۴۸	۰/۴۴	۲/۴۱
TiAl ₃ -TiAl	۶۱/۷۶	۳۴/۳۶	۲/۵۰	۰/۳۵	۱/۰۳
Θ(Al ₂ Cu)	۵۶/۱۲	۲/۴۳	۴۰/۰۴	۰/۳۸	۱/۰۱
TiAl ₃	۶۶/۱۶	۳۱/۷۰	۰/۶۰	۰/۴۳	۱/۱۱
Al ₂ Cu-Al ₂ CuMg	۳۳/۳۵	۰/۱۲	۵۲/۰۳	۴/۹۷	۹/۳۸
محلول جامد Al	۹۰/۴۳	۰/۲۱	۴/۲۲	۴/۲۴	۰/۷۳

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی پایین از نمونه جوشکاری شده با استفاده از پوشش پاشش حرارتی برنج، به عنوان لایه واسطه، در شکل ۶- الف نشان داده شده است. نفوذ مس از طریق مرزخانه‌ها در این حالت، در مقایسه با نمونه قبل (شکل ۵- الف) که لایه واسطه آن فویل بوده است، بسیار پدیده‌تر انجام شده است. اعتقاد بر این است که تشکیل پیوند متالورژیکی بین آلیاژهای Al₂024 و Ti-6Al-4V با استفاده از لایه واسطه برنج، به دو سازوکار بستگی دارد. نفوذ حالت جامد در فصل مشترک تیتانیوم اتفاق می‌افتد، در حالی که نفوذ مس و روی، در سمت فصل مشترک آلیاژ آلومینیوم باعث تشکیل مذاب یوتکتیک می‌شود. تشکیل این مذاب یوتکتیک در سمت آلیاژ آلومینیوم را می‌توان در شکل ۶- ب که تصویر با بزرگنمایی بالاتر از ناحیه علامت‌گذاری شده در شکل ۶- الف است، مشاهده نمود. طبق نتایج طیفسنجی تفکیک انرژی ارایه شده در جدول ۴، فاز روشن عمدتاً متشکل از عناصر منیزیم، آلومینیوم و مس است که با توجه به درصد این عناصر، تشکیل فازهای یوتکتیک Al₂Cu و Al₂CuMg در این ناحیه را نشان می‌دهد. ناحیه ۶ نیز محلول جامد آلومینیوم است. به طور کلی، انجام هم‌دما و عریض شدن ناحیه اتصال را می‌توان به دو مرحله تشکیل فصل مشترک مذاب/جامد (نفوذ جامد- مذاب) و عریض شدن، پس از تکمیل انجام هم‌دما (نفوذ حالت جامد) تقسیم‌بندی کرد. در ابتدای فرآیند، با نفوذ آلومینیوم و مس از فلز پایه و لایه واسطه به سمت یکدیگر، مذاب یوتکتیک تشکیل شده و فصل مشترک جامد- مذاب شکل می‌گیرد. نیرو

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی پایین از نمونه جوشکاری شده با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسطه، در شکل ۵ نشان داده شده است. نفوذ مس در امتداد مرزخانه‌های آلومینیوم، در منطقه‌ای که در شکل ۶- الف، با یک علامت‌گذاری شده، مشهود است. نتایج تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی این ناحیه با استفاده از طیفسنجی تفکیک انرژی انجام شد، که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. همان طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، ناحیه یک مشتمل بر عناصر مس، آلومینیوم و منیزیم است. با توجه به نمودار فازی سه‌تایی این عناصر که توسط استایلز و همکاران^[۱۷] تهیه شده، تشکیل فازهای یوتکتیک Θ-Al₂Cu و S-Al₂CuMg را در امتداد مرزخانه‌ها می‌توان انتظار داشت. هنگامی که یک نمونه چند بلوری با فرآیند فاز مایع گذرا مورد جوشکاری قرار می‌گیرد، انتقال جرم تحت تاثیر عوامل گوناگونی اتفاق می‌افتد. نفوذ مرزخانه‌ای، عامل اصلی حاکم بر این انتقال جرم است که در مقایسه با نفوذ حجمی با سرعت بسیار بالاتری اتفاق می‌افتد. شکل ۵- ب، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی بیشتر از ناحیه فصل مشترک اتصال ایجاد شده با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسطه را نشان می‌دهد. نواحی منتخبی از این اتصال نیز با استفاده از طیفسنجی تفکیک انرژی مورد تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۴ ارایه شده است. ناحیه ۲ که در مجاورت فلز پایه تیتانیوم قرار دارد و می‌توان آن را مسئول ایجاد اتصال در سمت تیتانیوم دانست، حاوی ۳۴/۳۶ تیتانیوم و ۶۱/۷۶ آلومینیوم است. با توجه به نمودار فازی آلومینیوم- تیتانیوم این ناحیه، ترکیب بین فلزی TiAl یا TiAl₃ است. ناحیه ۳، با توجه به جدول ۴ دارای ۵۶/۱۲ آلومینیوم و ۳۹/۰۴ مس است که مبین تشکیل فاز Θ-Al₂Cu در این ناحیه است. تشکیل این فاز یوتکتیک نیز بین آلومینیوم و مس انتظار می‌رود^[۴]. ناحیه ۴ که در سمت فلز پایه آلومینیوم قرار دارد و می‌توان آن را مسئول ایجاد اتصال در سمت آلومینیوم دانست نیز عمدتاً حاوی آلومینیوم و تیتانیوم است. با توجه به ترکیب شیمیایی این ناحیه، تشکیل ترکیب بین فلزی TiAl₃ در این ناحیه بسیار محتمل است.



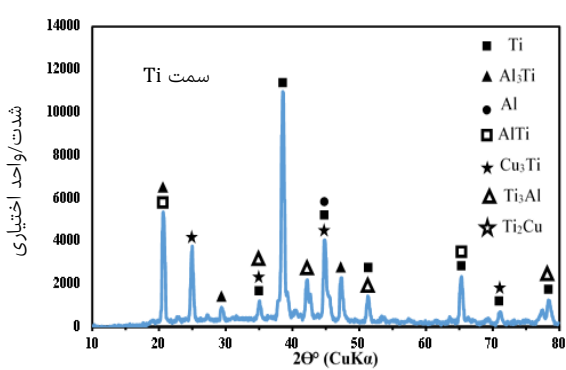
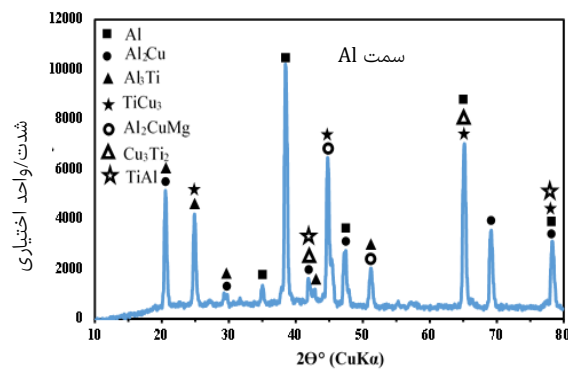
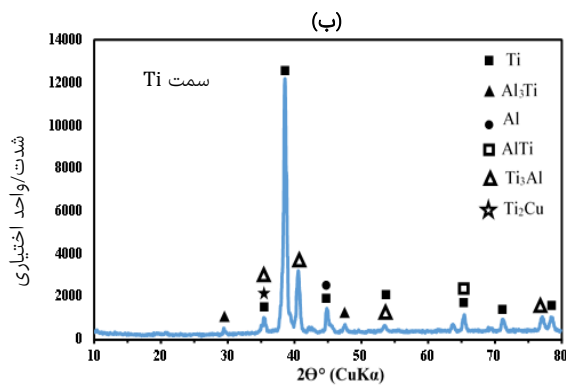
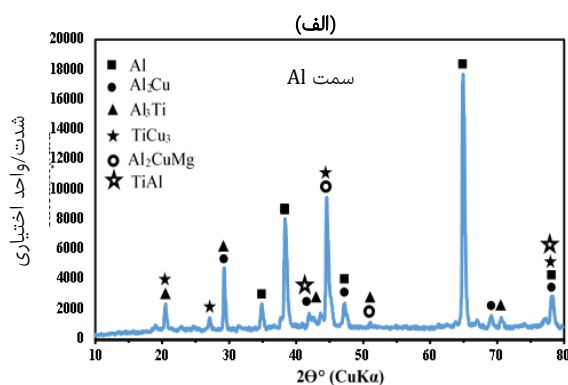
شکل ۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه جوشکاری شده با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسطه؛ (الف) بزرگنمایی کم، (ب) بزرگنمایی زیاد از ناحیه فصل مشترک

امر باعث افزایش سرعت فرآیند همگن سازی و عریض شدن ناحیه اتصال خواهد شد.

شناسایی ترکیبات بین فلزی

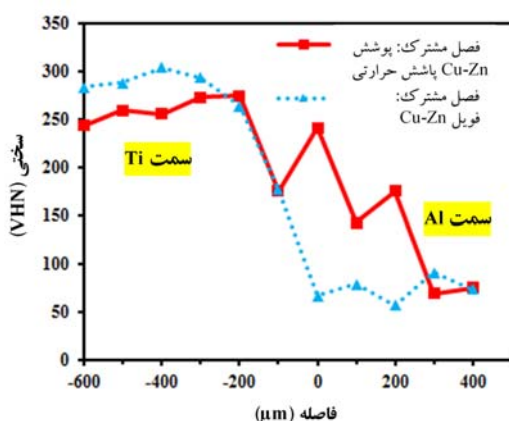
نتایج طیف سنجی تفکیک انرژی نشان داد که آلومینیوم، تیتانیوم، مس و منیزیم در ناحیه اتصال جوش ها حضور دارند. این امر مبین احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلف در فصل مشترک اتصال است. به منظور اثبات تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلف در ناحیه اتصال، از تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس استفاده شد. سطوح شکست اتصال ایجاد شده با استفاده از لایه واسط برنج، اعمالی به صورت فویل و همچنین پاشش حرارتی توسط پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آن در نمودار ۲ نشان داده شده است. نتایج پراش پرتو ایکس، تشکیل فازهای بین فلزی Al_2Cu و Al_2CuMg را تایید می نماید. همچنین تشکیل ترکیباتی نظیر $TiAl$ ، Ti_3Al و $TiAl_3$ نیز در اتصال ساخته شده با استفاده از پوشش پاشش حرارتی برنج، به عنوان لایه واسط در حین فرآیند اتصال دهی تایید می شود (نمودار ۲-د). از سوی دیگر، قله هایی با شدت ضعیف از Ti_3Al ، $TiAl$ و $AlTi$ برای اتصالی که در آن از فویل برنج به عنوان لایه واسط استفاده شده قابل مشاهده است (نمودار ۲-ب)، که این امر به خاطر پتانسیل کمتر نفوذ تیتانیوم و آلومینیوم در ناحیه اتصال، برای این جوش در مقایسه با اتصال ساخته شده با استفاده از لایه واسط پاشش حرارتی (نمودار ۲-د) است.

محرکه انجماد همدم، نفوذ کاهنده های نقطه ذوب به داخل فلزات پایه در حالت مذاب- جامد است [18, 19]. عنصر مس در سیستم تیتانیوم- مس دارای اثر کاهنده نقطه ذوب است. در نتیجه، به خصوص در حالتی که از لایه واسط پاشش حرارتی شده که دارای عیوب بیشتری است استفاده می شود، به دلیل نفوذ فزاینده مس به عنوان یک عنصر کاهنده نقطه ذوب (در مذاب)، به داخل فلز پایه آلومینیوم (جامد)، نقطه ذوب ناحیه اتصال به دمایی بالاتر از دمای فرآیند، افزایش یافته و این امر باعث وقوع انجماد همدم خواهد شد. با توجه به شکل های ۵ و ۶ می توان نتیجه گرفت که انحلال فلزات پایه در ناحیه اتصال و فرآیند انجماد همدم، در حالتی که از پوشش پاشش حرارتی به عنوان لایه واسط استفاده می شود، بیشتر و سریع تر از حالتی است که از فویل استفاده می شود که همین امر باعث عریض تر شدن ناحیه اتصال در نمونه پاشش حرارتی می شود. همان طور که گفته شد، نفوذ مرزدانه ای، سازوکار غالب برای نفوذ مس در آلومینیوم است. اما نفوذ، صرفاً به وسیله نفوذ مرزدانه ای کنترل نمی شود. مرزهای بین پودرها، حفرات و عیوب موجود در نمونه پاشش حرارتی (شکل ۶- الف) را می توان به عنوان مجراهای نفوذ در نظر گرفت. حفرات می توانند مشابه سطوح آزاد رفتار کنند. به دلیل نرخ بسیار بالای نفوذ در سطوح آزاد (بسیار بیشتر از نفوذ مرزدانه ای)، سطوح آزاد می توانند نرخ نفوذ را به میزان قابل توجهی افزایش دهند. بنابراین، پتانسیل نفوذ آلومینیوم در آلایز پاشش حرارتی شده بسیار بیشتر بوده و این

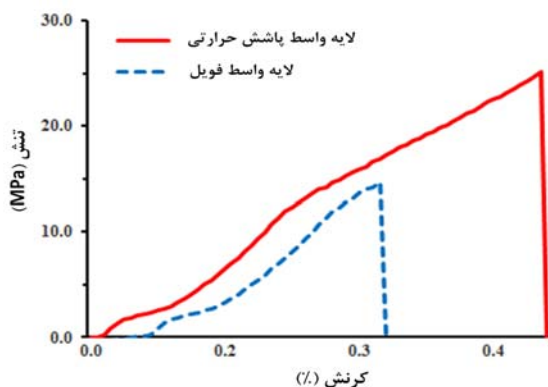


نمودار ۲) الگوهای پراش پرتو ایکس از سطوح شکست (سمت Al و سمت Ti) نمونه های اتصال دهی شده؛ (الف و ب) نمونه های با لایه واسط فویل برنج، (ج و د) نمونه های با لایه واسط برنج پاشش حرارتی

را می‌توان به تجمع و رشد ترکیبات بین فلزی در نزدیکی فصل مشترک اتصال، به دلیل پتانسیل پایین‌تر نفوذ آلومینیوم و تیتانیوم در ناحیه اتصال، در مقایسه با نمونه پاشش حرارتی مربوط دانست. از سوی دیگر، اعمال لایه واسط به صورت پوشش پاشش حرارتی، باعث زبری فزاینده سطح در مقایسه با لایه واسط به صورت فویل خواهد شد که این به نوبه خود می‌تواند بر استحکام اتصال تاثیرگذار باشد. افزایش مشاهده شده در استحکام برشی با افزایش زبری سطح ناشی از اعمال لایه واسط به صورت پوشش پاشش حرارتی، با نتایج زوروزی و همکاران^[20] همخوانی دارد. بیشینه استحکام برشی به دست آمده، در مقایسه با کار دیگری که در آن از لایه واسط مس جهت اتصال آلیاژ آلومینیوم به آلیاژ تیتانیوم استفاده شده بود، بیشتر است^[8]. همان طور که ملاحظه می‌شود در حالت استفاده از لایه واسط پاشش حرارتی به دلایل ذکر شده، منحنی تنش- کرنش بیشتر توسعه یافته و نمونه چنان رفتار نرمی دارد که منحنی، حتی با منحنی تنش- کرنش فلزات پایه به صورت توده نیز قابل مقایسه است. اما در حالت استفاده از فویل به عنوان لایه واسط، نمونه رفتار ترد از خود نشان می‌دهد و در نتیجه منحنی تنش- کرنش نیز گستره بسیار محدودتری پیدا می‌کند. بروز چنین حالتی در مقالات سایر محققین نیز گزارش شده است^[21].



نمودار ۳) پروفیل‌های ریزسختی در امتداد ناحیه اتصال، برای اتصالات ساخته شده با استفاده از فویل برنج و پوشش پاشش حرارتی برنج به عنوان لایه واسط



نمودار ۴) نتایج استحکام برشی برحسب روش اعمال لایه واسط برنج

مشاهدات ریزساختاری و همچنین الگوهای پراش پرتو ایکس ارائه شده در نمودار ۲، وجود ترکیبات بین فلزی Al_2Cu و Al_2CuMg را تنها در سمت آلیاژ آلومینیوم جوش تایید می‌نمایند، زیرا غلظت اتم‌های آلومینیوم در سمت Al_{2024} جوش از سمت $Ti-6Al-4V$ بیشتر است.

مشخصات مکانیکی اتصال

پروفیل‌های سختی اتصالات ساخته شده با استفاده از فویل برنج و پوشش پاشش حرارتی برنج به عنوان لایه واسط، در نمودار ۳ نشان داده شده است. مقدار پایین سختی (67 Vickers) در مرکز اتصال ساخته شده با استفاده از فویل برنج، به عنوان لایه واسط، حاکی از باقی ماندن لایه واسط در فصل مشترک است. این در حالی است که با استفاده از پوشش برنج پاشش حرارتی به عنوان لایه واسط، میزان سختی تا 241 Vickers افزایش پیدا می‌کند. این موضوع را می‌توان به پتانسیل بالاتر نفوذ آلومینیوم و تیتانیوم در لایه واسط اعمال شده به روش پاشش حرارتی در مقایسه با لایه واسط، به صورت فویل مربوط دانست که باعث فرآیند همگن سازی سریع تر و پهن تر شدن ناحیه اتصال می‌شود. روند افزایشی سختی تا عمق حدود 200 میکرومتر داخل آلیاژ آلومینیوم برای اتصال ایجاد شده با استفاده از پوشش پاشش حرارتی، به عنوان لایه واسط، غیرعادی است. در بعضی مکان‌ها مقدار سختی تا حدود 143 Vickers کاهش پیدا کرده و در مکان‌های دیگری تا 242 Vickers افزایش یافته است. احتمالاً نفوذ مس به داخل مرزدهانه‌های آلیاژ آلومینیوم و تشکیل نواحی موضعی غنی از مس- آلومینیوم در مجاورت فصل مشترک باعث این بی‌نظمی در مقدار سختی شده است. این امر، ناشی از تشکیل محلول‌های جامد و انجماد هم‌دما در حین فرآیند اتصال دهی است.

استحکام برشی جوش‌های نفوذی از طریق آزمایش استحکام برشی تعیین شد. مشخصات هندسی اتصال آماده سازی شده جهت انجام آزمایش استحکام برشی در شکل ۱- ب نشان داده شده است. تغییر استحکام برشی اتصالات جوش کاری نفوذی شده، با تغییر روش اعمال لایه واسط در نمودار ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که ریزساختار فصل مشترک، تاثیر به سزایی بر استحکام اتصالات دارد. همان طور که مشاهده می‌شود اتصال ایجاد شده با استفاده از پوشش برنج پاشش حرارتی شده به عنوان لایه واسط، دارای استحکام بالاتری (25 مگاپاسکال) است. استحکام برشی متناظر با جوش ساخته شده با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسط 16 مگاپاسکال است. وجود حفرات و مجراهای زیاد در پوشش پاشش حرارتی که جزیی از ذات این پوشش‌ها به شمار می‌آیند باعث می‌شوند نفوذ از طریق این مجراها تسهیل و تسریع شود. همان طور که راجیدی و همکاران^[14] گزارش کرده‌اند رسوبات پوشش پاشش حرارتی ساختاری لایه لایه دارند. به همین دلیل پتانسیل نفوذی پوشش پاشش حرارتی به دلیل وجود این مجاری نفوذی بیشتر از لایه واسط فویل خواهد بود. کاهش استحکام، با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسط

- Ti-6Al-4V alloy using Cu-Zn interlayer. Transactions of Nonferrous Metals Society China. 2015;25(3):770-775.
- 3- Kenevisi MS, Mousavi Khoie SM. An investigation on microstructure and mechanical properties of Al7075 to Ti-6Al-4V transient liquid phase (TLP) bonded joint. Materials & Design. 2012;38:19-25.
- 4- Alhazaa AN, Khan TI. Diffusion bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V using Cu coatings and Sn-3.6Ag-1Cu interlayers. Journal of Alloys and Compounds. 2010;494(1-2):351-358.
- 5- Samavatian M, Halvae A, Amadeh AA, Khodabandeh A. An investigation on microstructure evolution and mechanical properties during liquid state diffusion bonding of Al2024 to Ti-6Al-4V. Materials Characterization. 2014;98:113-118.
- 6- Atieh AM, Khan T. Effect of process parameters on semi-solid TLP bonding of Ti-6Al-4V to Mg-AZ31. Journal of Materials Science. 2013;48(19):6737-6745.
- 7- Anbarzadeh A, Sabet H, Abbasi M. Effects of successive-stage transient liquid phase (S-TLP) on microstructure and mechanical properties of Al2024 to Ti-6Al-4V joint. Materials Letters. 2016;178:280-283.
- 8- Alhazaa A, Khan TI, Haq I. Transient liquid phase (TLP) bonding of Al7075 to Ti-6Al-4V alloy. Materials Characterization. 2010;61(3):312-317.
- 9- Kenevisi MS, Mousavi Khoie SM, Alaei M. Microstructural evaluation and mechanical properties of the diffusion bonded Al/Ti alloys joint. Mechanics of Materials. 2013;64:69-75.
- 10- Davoodi Jamaloei A, Salimijazi HR, Edris H, Mostaghimi J. Study of TLP bonding of Ti-6Al-4V alloy produced by vacuum plasma spray forming and forging. Materials & Design. 2017;121:355-366.
- 11- Antala N, Rathod P. Process parameter selection for uniform deposition of chrome carbide-nickelchrome (Cr3C2-20NiCr) thermal flame spray coatings on stainless steel (SS347H) boiler tube. IJEDR Journal. 2017;5:632-641.
- 12- Okamoto H, Schlesinger ME, Mueller EM. ASM Handbook: Alloy phase diagrams. Cleveland: ASM international; 1992.
- 13- ASTM standard D1002. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal) [Internet]. Unknown Publisher City & Publisher & Cited & Cite. 1999.
- 14- Rachidi R, El Kihela B, Delaunois F. Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying. Materials Science and Engineering: B. 2019;241:13-21.
- 15- Jafarian M, Saboktakin Rizi M, Jafarian M, Honarmand M, Javadinejad HR, Ghaheri A, et al. Effect of thermal tempering on microstructure and mechanical properties of Mg-AZ31/Al-6061 diffusion bonding. Materials Science and Engineering: A. 2016;666:372-379.
- 16- Fernandus MJ, Senthilkumar T, Balasubramania V. Developing temperature- time and pressure-time diagrams for diffusion bonding AZ80 magnesium and AA6061 aluminium alloys. Materials & Design. 2011;32(3):1651-1656.
- 17- Styles MJ, Hutchinson CR, Chen Y, Deschamps A, Bastow TJ. The coexistence of two S (Al2CuMg) phases in Al-Cu-Mg alloys. Acta Materialia. 2012;60(20):6940-6951.

اتصال Al2024 و Ti-6Al-4V به روش جوش کاری نفوذی با استفاده از فویل برنج و نیز پوشش پاشش حرارتی برنج به عنوان لایه واسط با موفقیت انجام شد. نتایج زیر حاصل شد:

۱- پاشش حرارتی باعث ایجاد سطحی زبر و تمیز شد که استحکام بالاتری را در اتصال موجب می شود.

۲- با استفاده از لایه واسطی که به روش پاشش حرارتی اعمال شده باشد، به دلیل بالارفتن پتانسیل نفوذی آلومینیوم و تیتانیوم، به علت وجود حفرات، پودرهای ذوب نشده و عیوب بیشتر در لایه واسط که به صورت مجراهایی برای تسهیل نفوذ عمل می کنند، فرآیند انجماد هم دما و حل شدن فلزات پایه در ناحیه اتصال بهتر و بیشتر صورت می گیرد.

۳- عنصر مس دارای اثر کاهنده نقطه ذوب در سیستم آلومینیوم-مس-تیتانیوم است. در نتیجه، نفوذ مس (در مذاب) به داخل فلزات پایه (جامد)، نقطه ذوب ناحیه اتصال را به میزانی بیشتر از دمای فرآیند، افزایش خواهد داد و باعث انجماد هم دما خواهد شد. همین نفوذ مس به داخل آلومینیوم و تشکیل یوتکتیک با آلومینیوم و عناصر آلیاژی آن (منیزیم) است که باعث ایجاد اتصال در فصل مشترک آلومینیوم خواهد شد.

۴- اتصال ایجاد شده با استفاده از پوشش پاشش حرارتی برنج، به عنوان لایه واسط، استحکام بالاتری ایجاد خواهد کرد (۲۵ مگاپاسکال). کاهش استحکام اتصال با استفاده از فویل برنج به عنوان لایه واسط را می توان به تجمع و رشد ترکیبات ترد بین فلزی در نزدیکی فصل مشترک اتصال به علت پتانسیل کمتر نفوذ تیتانیوم و آلومینیوم در ناحیه اتصال مربوط دانست.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می دانند از گروه مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی قدردانی نمایند.

تأییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: حمید نعیمی (نویسنده اول)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪): محمد عمار مفید (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: از منبع مالی خاصی استفاده نشده است.

منابع

- 1- Sam S, Kundu S, Chatterjee S. Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface microstructure and strength properties. Materials & Design. 2012;40:237-244.
- 2- Samavatian M, Khodabandeh A, Halvae A, Amadeh AA. Transient liquid phase bonding of Al 2024 to

20- Zuruzi AS, Li H, Dong G. Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;270(2):244-248.

21- Lee MK, Lee JG, Choi YH, Kim DW, Rhee CK, Lee YB, et al. Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel. *Materials Letters*. 2010;64(9):1105-1108.

18- Cook GO, Sorensen CD. Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding. *Materials Science*. 2011;46:5305-5323.

19- Jin YJ, Khan TI. Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy. *Materials & Design*. 2012;38:32-37.