

بررسی اتصال ترکیب بین فلزی Ni₃Al با استفاده از روش فاز مایع گذرا و لایه میانی مس

محمد سلطانی سامانی، عباس بهرامی* و فتح الله کریمزاده
 دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۴/۳۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۹/۹)

چکیده - در این پژوهش، اتصال ترکیب بین فلزی Ni₃Al با استفاده از فرایند فاز مایع گذرا و لایه میانی مس خالص مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اتصال دهی در یک کوره خلأ، در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد به ازای زمان‌های مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه انجام شد. اثر تغییرات زمان بر ریزساختار و خواص مکانیکی منطقه اتصال بررسی شد. نتایج آزمون پراش انرژی اتصالات، تشکیل مناطق انجماد همدم، انجماد غیرهمدم و متأثر از نفوذ در زمان‌های مختلف را تأیید کرد. پس از ۹۰ دقیقه، فازهای یونکتیک ترد و شکننده همچنان در خط اتصال وجود داشت. حال آنکه با افزایش زمان فرایند تا ۱۲۰ دقیقه، یک محلول جامد غنی از مس در خط اتصال تشکیل شد. بیشترین سختی در منطقه متأثر از نفوذ و به واسطه تشکیل ترکیبات تردتر، حاصل شد. با افزایش زمان فرایند تا ۹۰ دقیقه، سختی در خط مرکزی اتصال افزایش یافت. پس از ۱۲۰ دقیقه، سختی در خط مرکزی اتصال تا حدود ۲۲۴ ویکرز کاهش یافت. بیشترین استحکام برشی در حدود ۶۰ مگاپاسکال در زمان فرایند ۳۰ دقیقه و به واسطه تشکیل زمینه غنی از نیکل در محل اتصال به دست آمد. با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه، میزان استحکام برشی تا حدود ۳۴ مگاپاسکال کاهش یافت. پس از ۱۲۰ دقیقه و به دلیل تشکیل محلول جامد غنی از مس و نیز از بین رفتن ترکیبات یونکتیک، استحکام برشی مجدداً تا حدود ۴۴ مگاپاسکال افزایش یافت. ارزیابی سطوح شکست نشان داد که تا زمان ۹۰ دقیقه، شکست بیشتر از نوع ترد بوده حال آنکه با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه شکست به صورت نرم اتفاق افتاده است.

واژه‌های کلیدی: اتصال دهی، فاز مایع گذرا، ایترمتالیک، استحکام برشی

Investigating the Joining of Ni₃Al Intermetallic Compound, using Transient Liquid Phase (TLP) Method with Cu Interlayer

M. Soltani Samani, A. Bahrami* and F. Karimzadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Abstract: In this study, joining of Ni₃Al intermetallic compounds using the transient liquid phase (TLP) process with Cu interlayer was investigated. The binding process was carried out in a vacuum furnace at a temperature of 1050 °C for different times of 30, 60, 90 and 120 minutes. The effect of time variation on microstructure and mechanical properties of the joint zone was investigated. The EDS analysis results of the joints proved formation of the athermally solidified zone (ASZ), isothermally

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.n.bahrami@cc.iut.ac.ir

solidified zone (ISZ) and diffusion affected zone (DAZ) at different times. After 90 minutes, brittle eutectic phases still exist in the joint line. However, by increasing the process time to 120 minutes, a copper-rich solid solution was formed in the joint line. Maximum hardness was attained in DAZ region and due to formation of more brittle compounds. By increasing the process time to 90 min, the hardness in the joint center-line increased. After 120 min, the hardness in the joint center-line decreased to about 224 HV. Maximum shear strength was achieved to be about 60 MPa at a process time of 30 minutes and due to formation of Ni-rich matrix at the joint. With increasing time to 90 min, the shear strength decreased to about 34 MPa. After 120 minutes and due to formation of copper-rich solid solution as well as disappearance of eutectic compounds, shear strength again increased to about 44 MPa. Investigation of fracture surfaces showed that until 90 minutes, fracture mode was mainly brittle whereas by increasing time to 120 minutes, a more ductile fracture occurred.

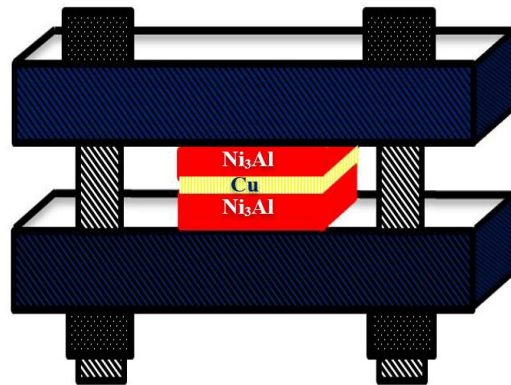
Keywords: Joining, Transient liquid phase, Intermetallic, Shear strength.

۱- مقدمه

فلز پایه در قسمت مجاور خط جوش تحت تأثیر حرارت بالایی است و قسمتی از آن ذوب می‌شود، از این رو خواص فلز پایه به شدت تحت تأثیر حرارت ناشی از این روش‌ها قرار دارد. همچنین مشکلاتی نظیر ترک‌های انجمادی، حفرات، عدم امتزاج جوش و شکستگی این روش‌ها را با مشکل مواجه کرده است. در اتصال آلیاژ Ni₃Al با استفاده از روش جوشکاری لیزر، ژانگ و همکاران روی بهبود مشکل ایجاد ترک انجمادی در جوشکاری مطالعه کردند [۷]. همچنین سانتلا و همکاران [۸] تشکیل ترک انجمادی را طی فرایند قوسی تنگستن- گاز روی آلیاژ ریختگی Ni₃Al مورد بررسی قرار دادند. در بین روش‌های اتصال‌دهی پیشرفته‌ای که پتانسیل زیادی برای اتصال ترکیبات بین‌فلزی دارند، می‌توان به روش اتصال‌دهی فاز مایع گذرا اشاره کرد [۹] و [۱۰]. در فرایند فاز مایع گذرا از یک لایه میانی در بین دو قطعه تحت اتصال استفاده می‌شود. در اثر افزایش دما و نفوذ متقابل عناصر فلز پایه و لایه میانی در یکدیگر اتصال صورت می‌گیرد. تاکنون از لایه‌های میانی با جنس‌های مختلف برای اتصال آلیاژ بین فلزی Ni₃Al استفاده شده است. توران و همکاران با استفاده از لایه میانی نیکل خالص توانستند Ni₃Al را بدون ترک و با استحکام اتصال بالا متصل کنند [۱۰]. قونیم و همکاران [۹] آلیاژ Ni₃Al را توانستند با استفاده از فویل MBF 80 متصل کنند. اوچو و همکاران تک کریستال آلیاژ بین‌فلزی Ni₃Al را با پرکننده NiCrobraz 150 متصل کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مخلوطی از پودر کامپوزیتی لحیم‌کاری و آلیاژ پرکننده می‌توان ترکیبات یوتکتیک در خط اتصال را حذف کرد [۱۱]. در این پژوهش، از لایه میانی مس برای اتصال

ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al که با نام فاز γ نیز شناخته می‌شود دارای ساختار کریستالی از نوع L1₂ است که این ساختار کریستالی دارای نظم بلندبرد است. این ترکیب بین‌فلزی دارای خواص مکانیکی کم‌نظیری همچون چگالی پایین و استحکام دمابالا است [۱]. وجود یک ساختار کریستالی FCC برای ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al موجب شده است که به واسطه انعطاف‌پذیری به نسبت بالاتر این نوع ساختار و همچنین کاربرد گسترده‌تر این ترکیب در بین ترکیبات بین‌فلزی موجود، ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. از جمله کاربردهای ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al می‌توان به کاربرد آن در کمپرسورها و پره‌های توربین در صنایع هوافضا [۲] و صنایع فولادسازی [۳] اشاره کرد. اتصال این ترکیبات برای استفاده کاربردی از این ترکیبات جزء مواردی است که همواره با چالش روبه‌رو بوده است. تاکنون اتصال این ترکیبات توسط بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است و چالش‌ها و خواص اتصال این ترکیبات را با روش‌های اتصال‌دهی ذوبی و حالت جامد مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۶]. عامل اصلی که اتصال این ترکیبات را با مشکل مواجه می‌کند تردی ذاتی این ترکیبات است. از این رو باید از روش‌های اتصال‌دهی استفاده کرد که تنش پسماند کمتری در قطعه ایجاد می‌کنند و همچنین حرارت ورودی به قطعه را کاهش می‌دهند. روش جوشکاری اصطکاکی با توجه به تردی این ترکیبات کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بین روش‌های ذوبی روش جوشکاری قوسی تنگستن- گاز، پرتو الکترونی و لیزر دارای حرارت ورودی و تنش پسماند کمتری هستند. اما در این روش‌ها با توجه به اینکه

دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و در چهار زمان مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه صورت گرفت. سطوح اتصال با سنباده ۸۰ تا ۱۲۰۰ و لایه میانی به وسیله سنباده ۲۴۰۰ آماده‌سازی شدند. سطوح اتصال نمونه‌ها و لایه میانی در استون در دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۵ دقیقه چربی‌زدایی شدند و تا قبل از زمان اتصال‌دهی در محلول استون نگه‌داشته شدند. قطعات در درون یک نگهدارنده از جنس فولاد کربنی ساده با ابعاد ۷۰×۲۰×۱۰ میلی‌متر در کنار یکدیگر مطابق شکل (۱) قرار داده شدند.



شکل ۱- نحوه قرارگیری قطعات در نگهدارنده

ریزساختار اتصالات به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی میزان نفوذ عناصر در اتصال آنالیز خطی عنصری با روش طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس^۲ (EDS) انجام شد. نقاط مختلف اتصال به وسیله آنالیز نیمه‌کمی طیف‌سنجی پراش انرژی مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات سختی در محل اتصال و فلز پایه به وسیله دستگاه ریزسختی‌سنجی^۳ ویکرز تحت بار ۱۰۰ گرم و زمان نشست ۱۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. استحکام برشی اتصالات با استفاده از یک نگهدارنده از جنس فولاد عملیات حرارتی‌پذیر و دستگاه کشش مورد بررسی قرار گرفت. برای قرارگیری قطعات در نگهدارنده، قطعات متصل شده توسط وایرکات به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر بریده شدند و در درون نگهدارنده مطابق شکل (۲) قرار داده شدند. سپس نگهدارنده در درون فک دستگاه کشش قرار داده شد و نیروی کششی با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه به آن وارد شد. در نهایت سطوح شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر زمان بر اتصال ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al با لایه

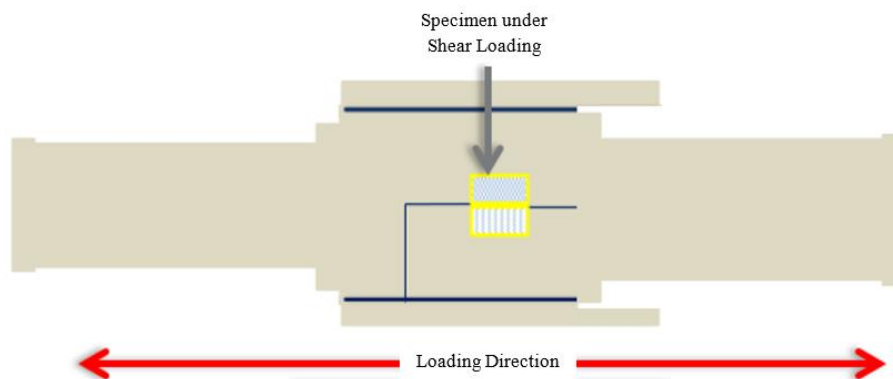
میانی مس

با گذشت زمان توزیع عناصر در خط اتصال دستخوش تغییرات می‌شود. این پدیده باعث تغییراتی در خواص مکانیکی، شکل هندسی و ریزساختار اتصال می‌شود. در ادامه به بررسی تأثیر زمان روی اتصال ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al با لایه میانی

ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al استفاده شد. دلیل انتخاب مس این بود که مس دارای حلالیت بی‌نهایت در نیکل است که این مورد به کاهش و حذف فازها و رسوبات مضر ثانویه نظیر ترکیبات یوتکتیک کمک می‌کند. همچنین نقطه ذوب پایین لایه میانی مس خالص موجب می‌شود که فرایند اتصال‌دهی در دماهای پایین‌تری قابلیت انجام داشته باشد که این دما از دمای سالیدوس معمول آلیاژهای پایه نیکل بسیار پایین‌تر است [۱۲] و [۱۳]. در این مطالعه تأثیر زمان اتصال‌دهی تا زمان ۱۲۰ دقیقه و در یک دمای ثابت روی خواص مکانیکی ایجاد شده و ریزساختار اتصال تشکیل شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

به منظور ساخت ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al، از ساچمه‌های نیکلی (۹۹ درصد) و مفتول آلومینیومی (۹۹/۹ درصد) استفاده شد و فرایند آلیاژسازی در کوره قوس الکتریکی مجدد در خلأ انجام گرفت. برای همگن‌سازی، نمونه ساخته شده سه‌مرته با استفاده از قوس الکتریکی در محیط آرگون، همگن‌سازی شد. نمونه‌ها با استفاده از وایرکات به تکه‌های ۱۵×۱۰ میلی‌متر با ضخامت سه میلی‌متر بریده شدند. در این پژوهش، برای اتصال‌دهی ترکیب بین‌فلزی Ni₃Al با استفاده از روش اتصال‌دهی فرایند فاز مایع‌گذرا از کوره خلأ مدل YMVR 1700 با خلأ ۱۰^{-۵} بار استفاده شد. برای اتصال‌دهی از لایه میانی مس با ترکیب شیمیایی مس (صد درصد وزنی) با ضخامت ۲۰ میکرومتر استفاده شد. فرایند اتصال‌دهی در



شکل ۲- نحوه قرارگیری نمونه اتصال یافته در نگهدارنده مورد استفاده در آزمون کشش برش

مس پرداخته می شود:

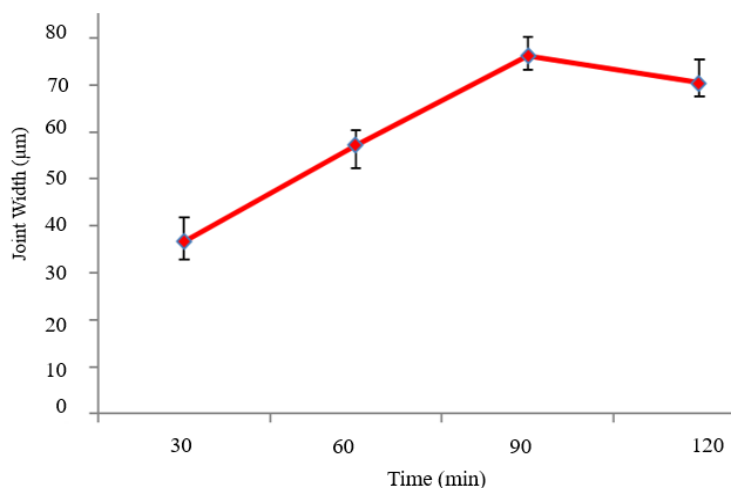
از سرد شدن ترکیبات بین فلزی در آن تشکیل می شود، عرض منطقه انجماد غیرهمدما و عرض اتصال کاهش می یابد [۱۴]. اصولاً پارامترهای اتصال باید به گونه ای باشد تا حتی الامکان کل مذاب تشکیل شده در منطقه اتصال به طور همدما منجمد شود. باقی ماندن مقداری مذاب در این منطقه در هنگام سرد کردن از دمای اتصال، باعث می شود که منطقه ای با ساختار یونکتیکی در خط مرکزی اتصال به وجود آید که این منطقه علاوه بر پایین آوردن دمای کاری قطعه، باعث افت خواص مکانیکی و خوردگی اتصال هم می شود. افزایش تغییرات عرض اتصال در نواحی مختلف اتصال در یک زمان متغیر بوده که می تواند به دلیل یکسان نبودن فشار در سراسر اتصال باشد.

ب- تأثیر زمان بر توزیع عنصری در خط اتصال با لایه میانی مس

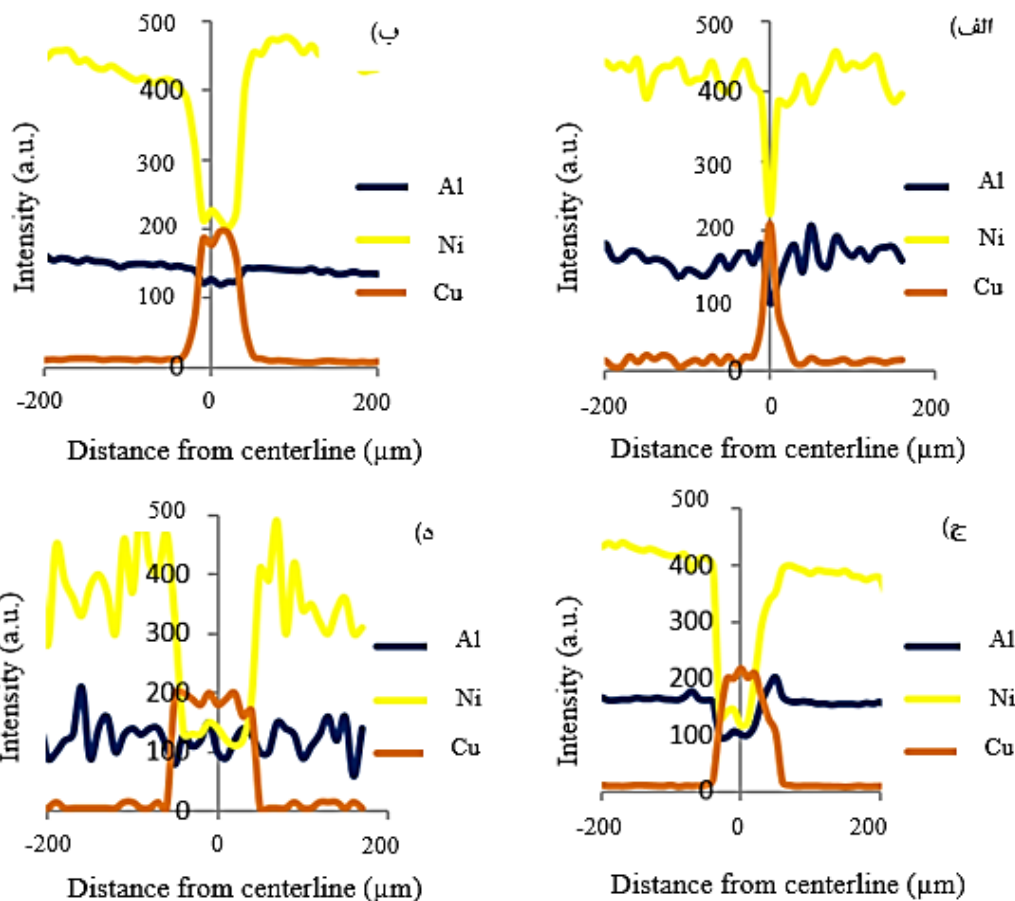
همانگونه که آنالیز عنصری خطی اتصالات با لایه میانی مس در زمان های مختلف شکل (۴) نشان می دهد، با شروع گرمادهی از دمای محیط به دمای اتصال بین عناصر نیکل، آلومینیوم و مس مقداری نفوذ در حالت جامد صورت می گیرد. با توجه به آنکه نقطه ذوب مس برابر ۱۰۸۳ درجه سانتی گراد و دمای اتصال ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد است، بنابراین با رسیدن به دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد فویل مسی همچنان ذوب نشده است. با گذشت زمان و نفوذ، عناصر لایه واسط شروع به ذوب شدن می کند و نفوذ عنصر مس از طریق مرز دانه ها (مرز دانه ها مسیر

الف- تأثیر زمان روی عرض خط اتصال

با بررسی و اندازه گیری های انجام شده مشخص شد که با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه، با افزایش زمان عرض اتصال افزایش پیدا کرده است، اما در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه عرض اتصال کاهش پیدا می کند. شکل (۳) تغییرات اندازه عرض اتصال را در زمان های مختلف نشان می دهد. مقدار اندازه گیری شده برای عرض ناحیه اتصال در زمان های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه به ترتیب حدود ۳۶، ۵۷، ۷۶ و ۷۰ میکرومتر بود. با توجه به اینکه ضخامت لایه میانی ۲۰ میکرومتر است و میزان عرض ناحیه اتصال بیشتر از این مقدار است، بنابراین مقداری از فلز پایه نیز در اثر نفوذ مس به داخل فلز پایه حل شده است. نوروزی و همکاران [۱۴] نیز در اتصال Ti-6Al-4V به فولاد زنگ نزن AISI 304 با لایه میانی مس تغییرات عرض ناحیه اتصال را از زمان ۱۵ تا ۶۰ دقیقه به همین صورت گزارش کردند. با استناد به دلایل نوروزی و همکاران برای این حالت تغییرات عرض ناحیه اتصال و همچنین آنالیز طیف سنجی انرژی (EDS) از مناطق مختلف اتصال که در ادامه آورده شده است، افزایش عرض ناحیه اتصال تا زمان ۹۰ دقیقه می تواند به دلیل افزایش منطقه انجماد غیرهمدما در اثر افزایش ترکیبات یونکتیک و بین فلزی با گذشت زمان در منطقه خط اتصال باشد. پس از زمان ۹۰ دقیقه و تشکیل منطقه انجماد همدما و کاهش حجم مذاب باقیمانده ای که در خط مرکزی اتصال پس



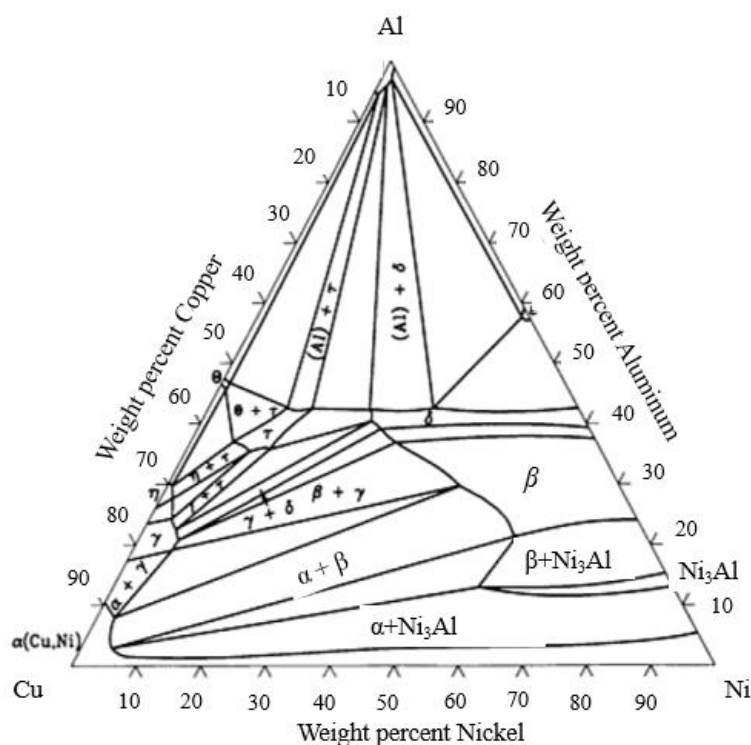
شکل ۳- تغییرات عرض ناحیه اتصال ترکیب بین فلزی Ni₃Al با لایه میانی مس



شکل ۴- ارزیابی خطی عنصری اتصال با لایه میانی مس در زمان‌های: الف) ۳۰، ب) ۶۰، ج) ۹۰ و د) ۱۲۰ دقیقه

مذاب خط وسط اتصال انحلال می‌یابد. این عمل تا ذوب کامل لایه میانی مسی ادامه پیدا می‌کند.

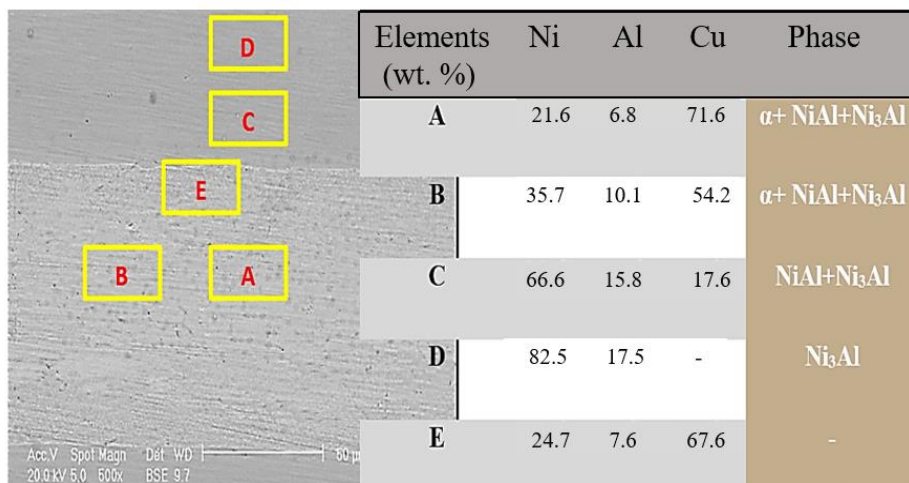
راحت‌تری برای نفوذ است) به داخل فلز پایه، نقطه ذوب در این قسمت‌ها کاهش می‌یابد و مقداری از فلز پایه در درون



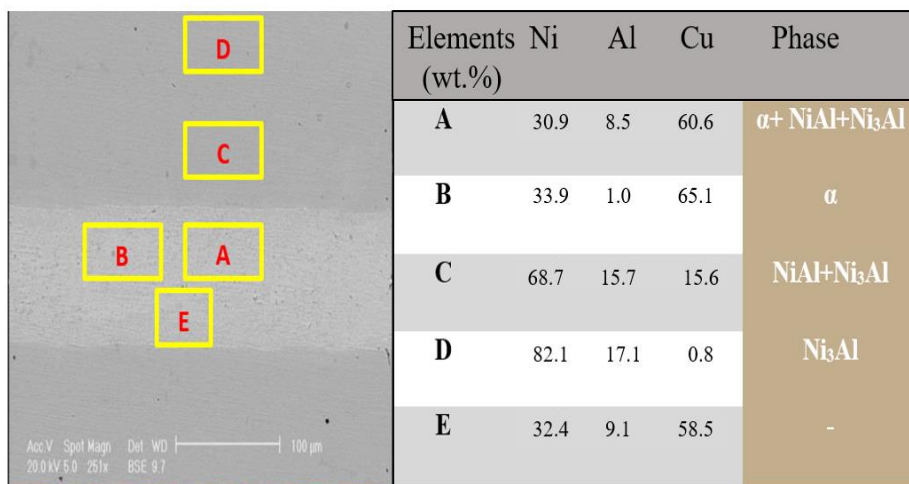
شکل ۵- نمودار فازی سه تایی سطح مقطع همدمای در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد سیستم Al-Cu-Ni [۱۶]

محیط حدود هشت درصد اتمی است. بنابراین آلومینیوم در زمینه مسی نسبت به زمینه نیکلی حلالیت بیشتری دارد. با افزایش زمان تا مدت زمان ۱۲۰ دقیقه و فرصت یافتن آلومینیوم برای نفوذ به خط اتصال در اثر شیب غلظتی و همچنین پس زده شدن این عنصر به وسط خط اتصال، میزان عنصر آلومینیوم در خط مرکزی اتصال افزایش می یابد. اما می توان مشاهده کرد که به طور کلی با افزایش زمان میزان آلومینیوم در منطقه مجاور خط اتصال کاهش می یابد چرا که فرصت بیشتری برای نفوذ آلومینیوم از این منطقه و پس زده شدن به خط مرکزی اتصال وجود دارد. کاهش آلومینیوم در این قسمت به تشکیل منطقه انجماد همدمای محلول جامد مس کمک می کند. با گذشت زمان تا مدت زمان ۹۰ دقیقه با فرصت بیشتر برای نفوذ عنصر مس، میزان مس در خط اتصال افزایش می یابد. با افزایش زمان اتصال دهی تا ۱۲۰ دقیقه با نفوذ بیشتر مس از غلظت مس در خط اتصال کاسته می شود و عرض منطقه ای که میزان مس در آن بالا است افزایش می یابد. نکته قابل توجه برای

عناصر مس، نیکل و آلومینیوم به ترتیب دارای شعاع اتمی ۱۲۸، ۱۲۴ و ۱۴۳ پیکومتر هستند. با توجه به اندازه شعاع های اتمی هر سه عنصر به صورت جانمایی در شبکه یکدیگر نفوذ می کنند. شعاع اتمی، چگالی و نقطه ذوب عنصر از جمله پارامترهایی است که سرعت نفوذ عناصر را تعیین می کند [۱۵]. با توجه به نمودار فازی نیکل-مس این عناصر به صورت نامحدود در یکدیگر حل می شوند، بنابراین هیچ فاز ثانویه ای از ترکیب مس و نیکل به وجود نمی آید. برای یافتن فازهای یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در ساختار باید به نمودار فازی سه تایی سطح مقطع همدمای در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد آلومینیوم-مس-نیکل شکل (۵) مراجعه کرد. با توجه به نمودارهای فازی دوتایی مس-آلومینیوم و نیکل-آلومینیوم، میزان حلالیت مس در آلومینیوم بسیار پایین است اما حلالیت آلومینیوم در زمینه مس در دمای محیط در حدود ۱۹ درصد اتمی است. همچنین حلالیت نیکل در آلومینیوم بسیار ناچیز است اما میزان حلالیت آلومینیوم در زمینه نیکلی در دمای



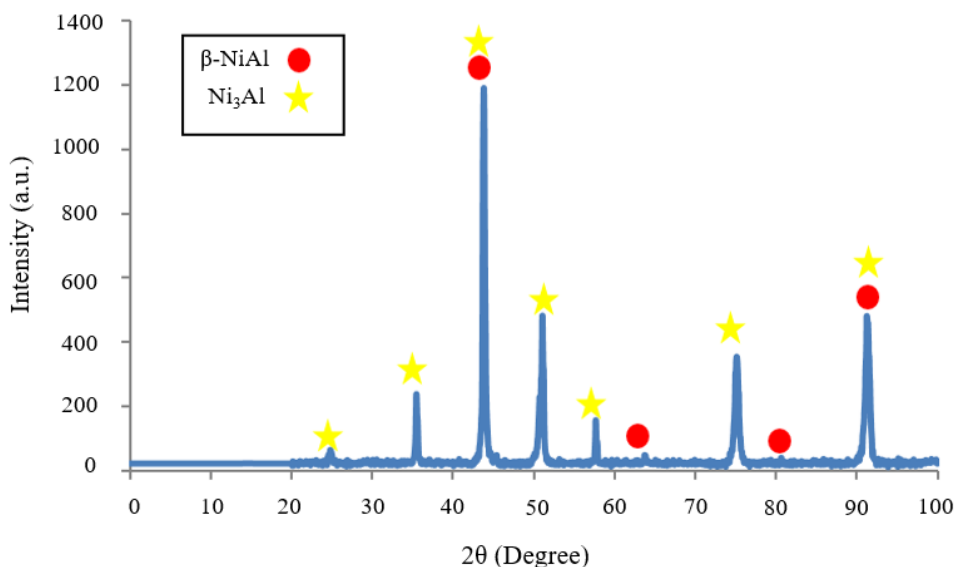
شکل ۶- آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی از نواحی مختلف در اتصال Ni_3Al با لایه میانی مس در مدت زمان ۹۰ دقیقه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷- آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی از نواحی مختلف در اتصال Ni_3Al با لایه میانی مس در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

غلظت مس و همچنین افزایش میزان آلومینیوم در خط اتصال عنصر نیکل وارد خط اتصال می‌شود و در مکان‌های اتمی خود قرار می‌گیرد و میزان غلظت آن در خط اتصال افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۶) و (۷) نتایج آزمون پراش انرژی در نواحی مختلف اتصال در مدت زمان ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه آورده شده است. همچنین با توجه به ترکیب شیمیایی نقاط و نمودار فازی سه‌تایی سطح توجه به ترکیب شیمیایی نقاط و نمودار فازی سه‌تایی سطح مقطع همدمای در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد سیستم Al-Cu-Ni فازهای

عنصر نیکل این است که میزان این عنصر در خط اتصال با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه کاهش یافته است و در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه در خط اتصال مقدار آن افزایش یافته است. با توجه به آنکه اتم‌های نیکل و مس در ساختار بلوری در مکان‌های یکدیگر قرار می‌گیرند (با توجه به شعاع اتمی بسیار نزدیک به هم و حلالیت کامل این دو عنصر در یکدیگر) بنابراین با افزایش مقدار مس تا مدت زمان ۹۰ دقیقه، از غلظت عنصر نیکل در خط اتصال تا مدت زمان ۹۰ دقیقه کاسته می‌شود. با افزایش مدت زمان تا ۱۲۰ دقیقه و با کاهش میزان



شکل ۸- الگوی پراش پرتو ایکس خط اتصال با لایه میانی مس و فلز پایه در زمان ۶۰ دقیقه

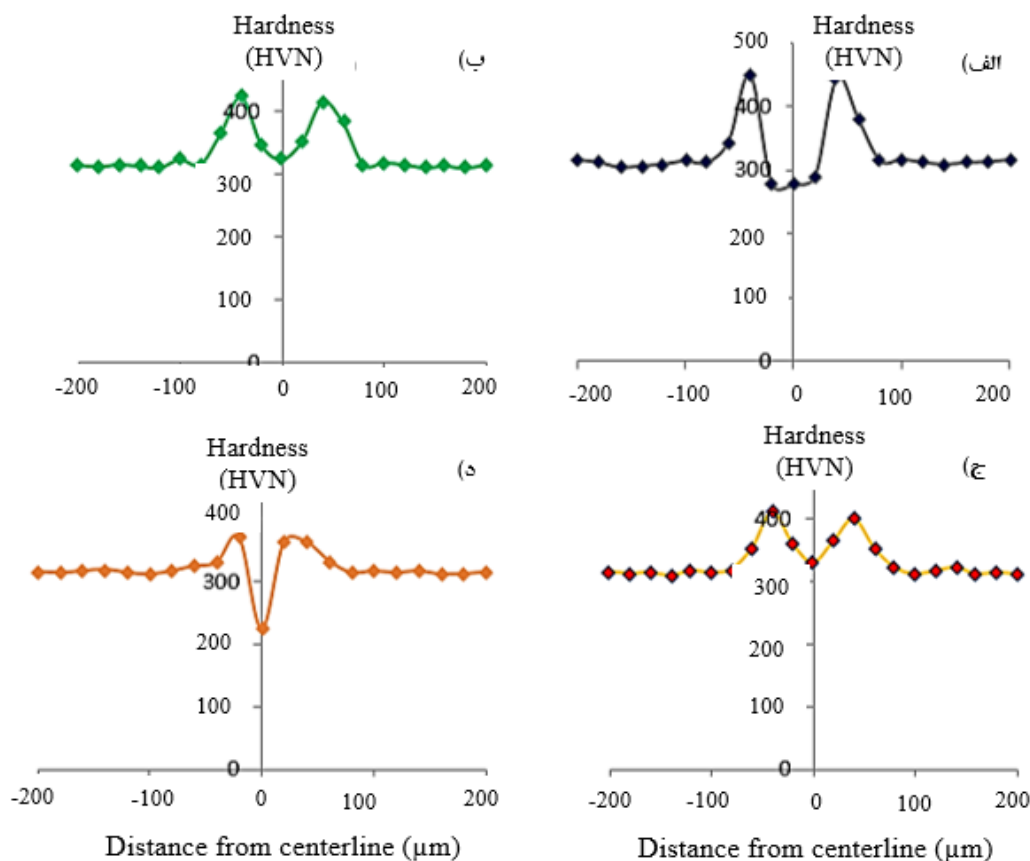
پیشنهادی تشکیل شده در نقاط مورد آنالیز آورده شده است. در شکل (۸) الگوی پراش پرتو ایکس اتصال با لایه میانی در مدت زمان ۶۰ دقیقه آورده شده است. نتایج الگوی پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که در اتصال و فلز پایه با توجه به همپوشانی یک‌ها احتمال دارد که فازهای $NiAl$ و Ni_3Al و همچنین فازهای محلول جامد مس (α) و Cu_9Al_4 تشکیل شده باشند. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس اتصال با نمودار فازی سه‌تایی مقطع همدمای در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز تطابق دارد. شکل (۵) و این نمودار امکان تشکیل این فازها را در دمای محیط تأیید می‌کند، چرا که طبق بررسی‌ها در زیر دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دیگر استحاله‌ای صورت نمی‌گیرد [۱۷]. با توجه نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی و تطابق نتایج با نمودار فازی سه‌تایی $Cu-Ni-Al$ می‌توان گفت که در مناطق مورد آنالیز چه فازهایی تشکیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که در خط مرکزی اتصال در هر دو زمان ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه فازهای محلول جامد مس، Ni_3Al و $NiAl$ تشکیل شده‌اند بنابراین می‌توان گفت تا زمان ۱۲۰ دقیقه نیز انجامد همدمای کامل نشده است. اما نتایج نشان می‌دهد که در منطقه B که در مجاورت خط مرکزی اتصال است در مدت زمان ۹۰ دقیقه همچنان فازهای محلول جامد مس، Ni_3Al و $NiAl$ وجود دارند این در حالی است که با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه با کاهش

آلومینیوم و افزایش نیکل، در این منطقه تنها محلول جامد مس تشکیل شده است که نشان می‌دهد در این منطقه تشکیل منطقه انجماد همدمای را داریم. مقایسه بین منطقه E در مدت زمان ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه نشان می‌دهد که با افزایش زمان از ۹۰ به ۱۲۰ دقیقه میزان مس به‌علت فرصت بیشتر برای نفوذ به اطراف در مدت زمان ۱۲۰ کاهش یافته و در طرف دیگر میزان نیکل و آلومینیوم ورودی از فلز پایه در این مدت زمان در منطقه اتصال افزایش یافته است. در منطقه C که در ناحیه متأثر از نفوذ قرار دارد در هر دو زمان ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه یک زمینه نیکلی وجود دارد که با توجه به نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی و دیگرام سه‌تایی، این فاز می‌تواند ترکیب بین‌فلزی $NiAl$ باشد. در منطقه D در مدت زمان ۹۰ دقیقه تنها عناصر مس و آلومینیوم وجود دارند اما با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه مقدار ناچیزی مس در این منطقه یافت شد که نشان از افزایش مسافت نفوذ مس در زمان ۱۲۰ دقیقه است.

۲-۳- آزمون‌های مکانیکی

الف- ریزسختی‌سنجی اتصال با لایه میانی مس

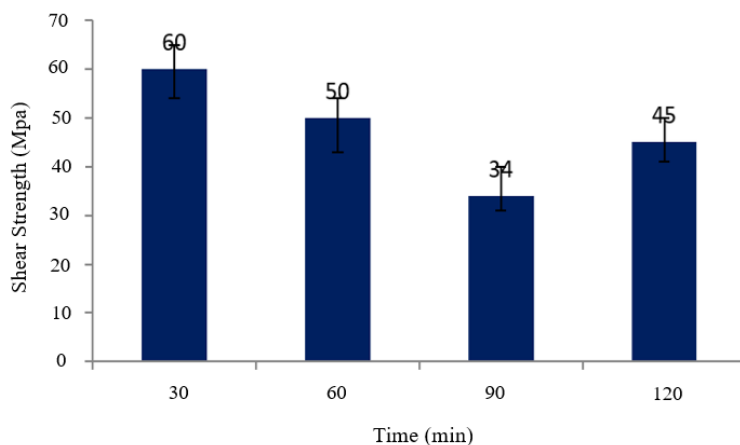
میزان تغییرات سختی در خط اتصال و نواحی اطراف آن در زمان‌های مختلف اتصال‌دهی در شکل (۹) آورده شده است. در سختی‌سنجی اتصال با استفاده از لایه میانی مس مشخص شد



شکل ۹- تغییرات سختی بر اساس فاصله خط مرکزی از خط اتصال با لایه میانی مس در زمان‌های: الف) ۳۰، ب) ۶۰، ج) ۹۰ و د) ۱۲۰ دقیقه

با افزایش مدت زمان تا ۹۰ دقیقه میزان سختی در خط مرکزی اتصال افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج آنالیز خطی، الگوی پراش پرتو ایکس و نمودار سه‌تایی Al-Cu-Ni، افزایش آلومینیوم در خط مرکزی اتصال و افزایش تشکیل ترکیبات سخت عامل افزایش سختی در خط مرکزی اتصال تا مدت زمان ۹۰ دقیقه می‌تواند باشد. در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه میزان سختی در خط اتصال به حدود ۲۲۴ ویکرز کاهش می‌یابد و روند افزایش سختی متوقف می‌شود و سختی در این منطقه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی در مناطق مختلف اتصال مشخص شد که در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه منطقه انجماد همدمايي با ترکیب محلول جامد غنی از مسی تشکیل شده است و ترکیبات بین‌فلزی در خط اتصال کاهش می‌یابد، از این‌رو سختی در خط اتصال کاهش می‌یابد. کاهش

که با حرکت از سمت فلز پایه به سمت خط اتصال در منطقه متأثر از نفوذ به دلیل تشکیل ترکیب بین‌فلزی NiAl و در این منطقه سختی به شدت افزایش می‌یابد. در مدت زمان ۳۰ دقیقه میزان سختی در منطقه متأثر از نفوذ به حدود ۴۴۶ ویکرز رسیده است. با حرکت به سمت خط مرکزی اتصال به دلیل تشکیل محلول جامد مس در خط اتصال میزان سختی کاهش می‌یابد به طوری که میزان سختی در مرکز اتصال حتی از سختی فلز پایه هم کمتر می‌شود. دلیل این امر را می‌توان وجود زمینه غنی از مس در این منطقه و فازهای با سختی کمتر از فلز پایه و منطقه متأثر از نفوذ دانست که سختی آن نسبت به فلز پایه که یک ترکیب بین‌فلزی است پایین‌تر آمده است. توران و همکاران [۱۰] نیز در اتصال Ni₃Al با استفاده از لایه میانی نیکل خالص با کاهش سختی در خط اتصال مواجه شدند.



شکل ۱۰- مقایسه استحکام برشی اتصال با لایه میانی مس در مدت زمان‌های ۳۰ تا ۱۲۰ دقیقه

افزایش منطقه انجماد غیرهمدما استحکام برشی افزایش پیدا کرده است. این تناقض می‌تواند به علت وجود تفاوت در نوع و میزان ساختارهای ترد و شکننده ناشی از تفاوت ساختاری فلزهای پایه، در خط اتصال باشد. در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه با تشکیل محلول جامد در اتصال و کاهش و از بین رفتن ترکیبات ترد و شکننده بین‌فلزی دوباره میزان استحکام برشی افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج آزمون آنالیز خطی مشخص شد که در مدت زمان ۳۰ دقیقه میزان نیکل در خط اتصال بالاتر از مس است و یک زمینه غنی از نیکل در اتصال وجود دارد اما با گذشت زمان و ورود بیشتر عنصر مس به داخل اتصال میزان مس در خط اتصال افزایش می‌یابد به طوری که زمینه غنی از مس در داخل اتصال به وجود می‌آید. با توجه به اینکه مدول برشی نیکل بالاتر از مس است بنابراین میزان استحکام برشی در اتصال در مدت زمان ۳۰ دقیقه بالاتر از استحکام برشی در مدت زمان اتصال دهی ۱۲۰ دقیقه است.

۳-۳- بررسی سطوح شکست اتصالات با لایه میانی مس

تصاویر الکترونی سطوح شکست اتصالات در مدت زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه برای لایه میانی مس در شکل (۱۱) و آنالیز مناطق مختلف آن در جدول (۱) آورده شده است.

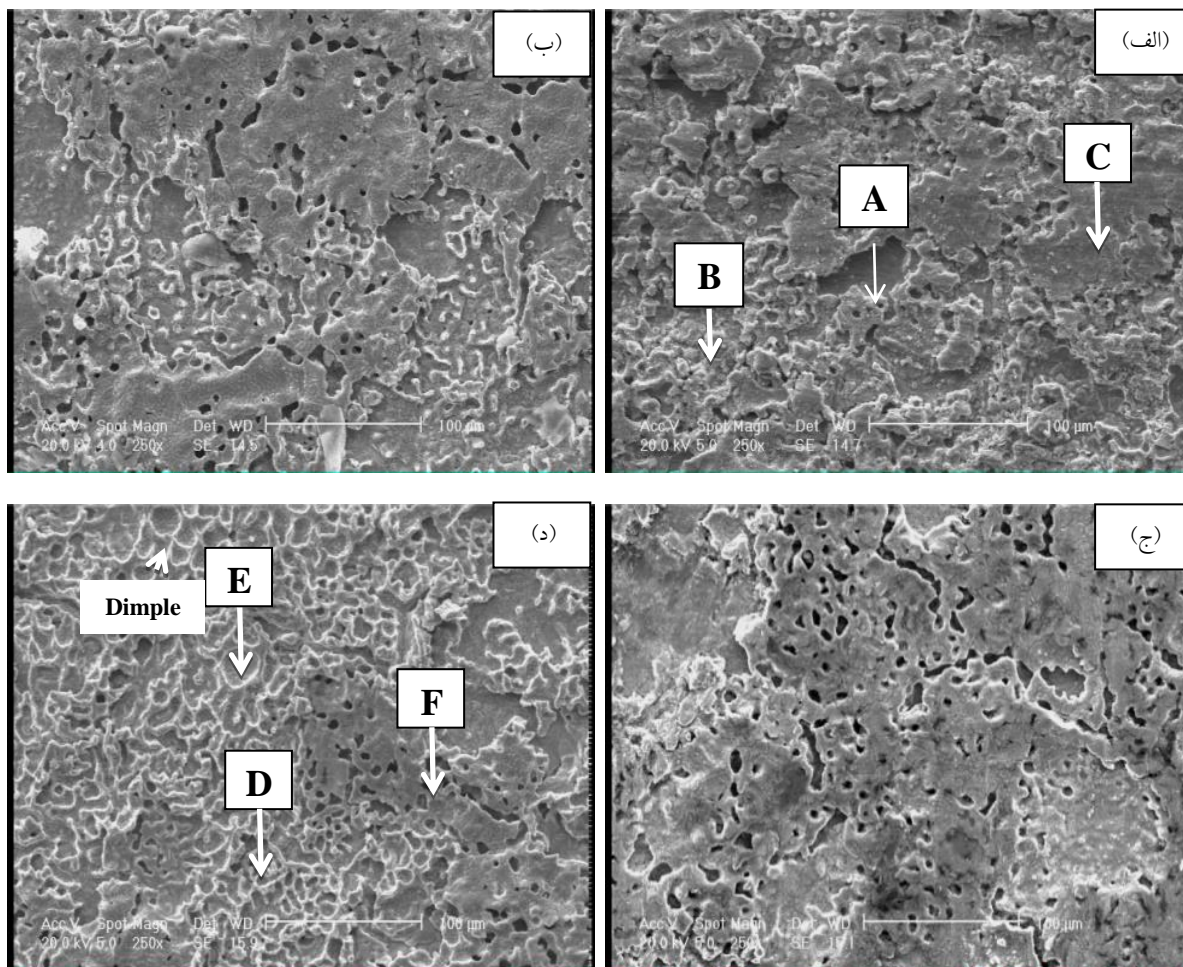
در سطح شکست اتصال با لایه میانی مس در مدت زمان ۳۰ دقیقه نوعی شکست ترد مشاهده می‌شود که به صورت لایه‌لایه

عرض اتصال در این مدت زمان نیز خود دلیلی بر تشکیل منطقه انجماد همدمما [۱۴] و کاهش سختی در این منطقه در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه است.

میزان سختی در منطقه متأثر از نفوذ با افزایش مدت زمان و فرصت بیشتر برای نفوذ عناصر، کاهش یافته است. این روند تغییر سختی در منطقه متأثر از نفوذ به وسیله نوروزی و همکاران نیز گزارش شده است [۱۴]. دلیل این امر می‌تواند کاهش آلومینیوم و همچنین افزایش نیکل با افزایش زمان اتصال دهی در این منطقه باشد.

ب- استحکام برشی اتصال

نتایج حاصل از میزان اندازه‌گیری شده استحکام برشی اتصال با لایه میانی مس در زمان‌های مختلف در شکل (۱۰) آورده شده است. با توجه به شکل (۱۰) میزان استحکام برشی با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه کاهش می‌یابد و با نگهداری تا زمان ۱۲۰ دقیقه مجدداً استحکام برشی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان منطقه انجماد غیرهمدما تا مدت زمان ۹۰ دقیقه با نفوذ بیشتر عنصر مس و آلومینیوم به خط اتصال افزایش می‌یابد و فازهای ترد و شکننده بین‌فلزی در اتصال در این منطقه زیاد می‌شوند. بنابراین قابل پیش‌بینی است که میزان استحکام برشی با افزایش زمان تا مدت زمان ۹۰ دقیقه کاهش یابد. هر چند که این نتیجه با گزارش نوروزی و همکاران در تناقض است [۱۴] زیرا در پژوهش آنها با



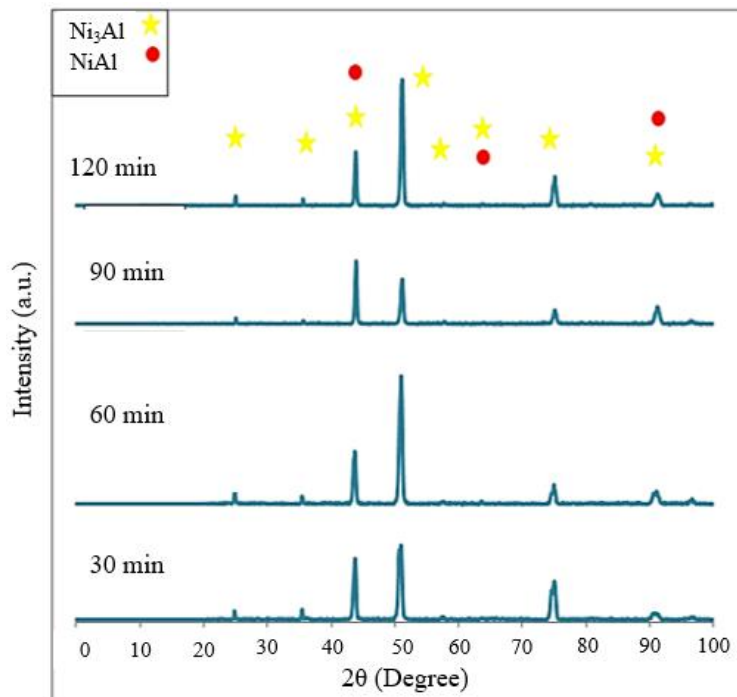
شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست اتصالات در مدت زمان‌های: الف) ۳۰، ب) ۶۰، ج) ۹۰ و د) ۱۲۰ دقیقه برای لایه میانی مس

جدول ۱- نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی از سطح شکست اتصال Ni_3Al با لایه میانی مس در زمان ۳۰ و ۱۲۰ دقیقه

۱۲۰		۳۰		زمان (دقیقه)		عنصر (درصد وزنی)
F	E	D	C	B	A	
۴۶/۴	۳۴/۶	۳۶/۷	۳۴/۰	۳۶/۸	۵۹/۸	Ni
۰/۸	۱۱/۰	۱۰/۴	۱۰/۷	۱۱/۱	۱۶/۸	Al
۵۲/۸	۵۴/۴	۵۲/۲	۵۵/۳	۵۲/۱	۲۳/۴	Cu
α	$\alpha+$ NiAl+Ni ₃ Al	$\alpha+$ NiAl+Ni ₃ Al	$\alpha+$ NiAl+Ni ₃ Al	$\alpha+$ NiAl+Ni ₃ Al	NiAl+Ni ₃ Al	فاز

این پدیده با شدت بیشتری اتفاق افتاده است به صورتی که مناطق ترد که با استفاده از آزمون طیف‌سنجی انرژی شناسایی شدند، وسعت بیشتری پیدا کرده‌اند که ناشی از تردتر شدن اتصال در

شدن گسیخته شده است. همچنین در برخی از نواحی اثراتی از گودی‌ها (دیمپل) که نشانه شکست نرم است دیده می‌شود ولی شکست ترد غالب است. در مدت زمان‌های ۶۰ و ۹۰ دقیقه نیز



شکل ۱۲- الگوی پراش پرتو ایکس سطوح شکست اتصال با لایه میانی مس در زمان‌های مختلف

گفت دقیقاً چه فازهایی افزایش و چه فازهایی کاهش می‌یابند اما با توجه به شرایط و شواهد گفته شده در مباحث قبلی انتظار می‌رود که میزان فاز محلول جامد مس تا زمان ۹۰ دقیقه کاهش یابد و در زمان ۱۲۰ دقیقه میزان آن افزایش یابد که موجب شکست نرم در زمان ۱۲۰ دقیقه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در اتصال ترکیب بین فلزی Ni_3Al با استفاده از لایه میانی مس خالص با استفاده از فرایند اتصال‌دهی فاز مایع گذرا در دمای $1050^\circ C$ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه اتصال‌دهی به صورت موفقیت‌آمیز صورت گرفت. در این پژوهش نتایج زیر حاصل شد.

۱. در اتصال ترکیب بین فلزی Ni_3Al با لایه میانی مس تا مدت زمان ۹۰ دقیقه میزان عرض ناحیه اتصال افزایش یافت اما با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه کاهش یافت.
۲. در اتصال ترکیب بین فلزی Ni_3Al با لایه میانی مس با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه میزان فازهای ترد و شکننده در منطقه

مدت زمان ۹۰ دقیقه است. نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی و آزمون‌های مکانیکی نیز با این رخداد تطابق دارند. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی سطح شکست نشان می‌دهد که لایه‌های گسیخته شده دارای ترکیبات ترد و شکننده بین‌فلزی هستند. در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه و تشکیل محلول جامد غنی از مس در خط اتصال نوع شکست به صورت گسترده‌ای نرم می‌شود و گودی‌ها در سرتاسر سطح شکست دیده می‌شوند. دلیل این امر تشکیل محلول جامد غنی از مسی است که مس به صورت ذاتی نرم و انعطاف‌پذیر است. نتایج سطح شکست نتایج آزمون کشش برش را نیز تأیید می‌کنند. در شکل (۱۲) نتایج آزمون پراش پرتو ایکس سطوح شکست آورده شده است. بررسی الگوهای پراش پرتو ایکس سطوح شکست برای اتصالات با لایه میانی مس در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که در سطوح شکست فازهای محلول جامد مس، Ni_3Al و $NiAl$ تشکیل شده است. پیک‌هایی که در زوایای $2\theta = 51, 75^\circ$ درجه پراش یافته‌اند با افزایش زمان تا ۹۰ دقیقه میزان آنها کاهش می‌یابد و با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه مجدد افزایش می‌یابد. با توجه به همپوشانی پیک‌ها نمی‌توان

مناطق دارا بود.

۴. با افزایش زمان از ۳۰ تا ۹۰ دقیقه میزان استحکام برشی کاهش یافت و در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه دوباره میزان استحکام برشی افزایش یافت و به مقدار ۴۴ مگاپاسکال در این مدت زمان رسید. بیشترین میزان استحکام برشی در زمان ۳۰ دقیقه برابر ۶۰ مگاپاسکال به دست آمد.

انجماد غیرهمدمای افزایش یافت اما با افزایش زمان تا ۱۲۰ دقیقه یک منطقه انجماد همدمای در خط اتصال تشکیل شد.

۳. میزان سختی در خط مرکزی اتصال با افزایش زمان از ۳۰ تا ۹۰ دقیقه افزایش یافت اما در مدت زمان سختی میزان سختی افت کرد و به مقدار ۲۲۴ ویکرز رسید. میزان سختی در منطقه متأثر از نفوذ، بالاترین سختی را نسبت به دیگر

واژه‌نامه

1. scanning electron microscope
2. energy dispersive spectroscopy

3. microhardness tester

مراجع

1. David, S. A., and Deevi, S. C., "Welding of Unique and Advanced Ductile Intermetallic Alloys for High-Temperature Applications", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, pp. 681-705, 2017.
2. Jozwik, P., Wojciech, P., and Zbigniew, B., "Applications of Ni₃Al Based Intermetallic Alloys Current Stage and Potential Perceptivities", *Materials*, Vol. 8, pp. 2537-2568, 2015.
3. Stoloff, N. S., Liu, C. T., and Deevi, S. C., "Emerging Applications of Intermetallics", *Intermetallics*, Vol. 8, pp. 1313-1320, 2000.
4. Celiky Ğrek, I., Baksan, B., Torun, O., and Ğzcan, A., "The Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded Cast Ni₃Al Intermetallic Alloy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 71, pp. 1-5, 2016.
5. Molian, P. A., Yang, Y. M., and Srivatsan, T. S., "Laser-Welding Behaviour of Cast Ni₃Al Intermetallic Alloy", *Journal of Materials Science*, Vol. 27, pp. 1857-1868, 1992.
6. Santella, M. L., Horton, J. A., and David, S. A., "Welding Behavior and Microstructure of a Ni₃Al Alloy", *Chemical Analysis*, Vol. 3, pp. 77-28, 1988.
7. Zhang, D. Y., Gao, H. Y., Lu, K., Luo, H. L., and Li, S. P., "Ni₃Al-Base Alloy of Laser Welding Behavior Research", *Advanced Materials Research*, Vol. 418, pp. 1531-1537, 2012.
8. Santella, M. L., "Weld Solidification Cracking in Cast Ni₃Al Alloys", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 28, pp. 1305-1310, 1993.
9. Ghoneim, A., and Ojo, O. A., "On the Influence of Boron-Addition on TLP Bonding Time in a Ni₃Al-Based Intermetallic", *Intermetallics*, Vol. 18, pp. 582-586, 2010.
10. Torun, O., and Celikyurek, I., "Diffusion Bonding of Nickel Aluminide Ni₇₅Al₂₅ using a Pure Nickel Interlayer", *Intermetallics*, Vol. 16, pp. 406-409, 2008.
11. Ojo, O. A., Ghoneim, A., and Hunedy, J., "Transient Liquid Phase Bonding of Single Crystal Ni₃Al-Based Intermetallic Alloy", *International Brazing and Soldering Conference American Society for Metals*, Las Vegas, Nevada, 2012.
12. Gale, W. F., and Guan, Y., "Transient Liquid-Phase Bonding in the NiAl/Cu/Ni System- A Microstructural Investigation", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27, No. 11, pp. 3621-3629, 1996.
13. Asghari, Y., "Effects of Temperature and Holding Time on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI310-Inconel 617 Joint, Joined using Transient Liquid Phase (TLP) Method", MSc Thesis, Isfahan University of Technology, 1394. (In Farsi).
14. Norouzi, E., Atapour, M., and Shamanian, M., "Effect of Bonding Time on the Joint Properties of Transient Liquid Phase Bonding Between Ti-6Al-4V and AISI 304", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 701, pp. 335-341, 2017.
15. Nadermanesh, N., and Azizi, A., "Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Aluminum Alloy AISI7075-AZ31 Mg Alloy with Cu Interlayer", *International Conference in Innovations in Industrial and Mechanical Engineering*, Tehran, 1395. (In Farsi).
16. ASM Metals Handbooks, Alloy Phase Diagrams, Vol. 3, 1992.
17. Prince, A., *Ternary Alloy Systems, Phase Diagrams Crystallographic and Thermodynamic Data*, Light Metal Systems: Part 2, Springer, Vol. 11A2, 2005.