



تأثیر مورفولوژی فصل مشترک بر روی استحکام اتصال در طول فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله‌های دولایه مس - آلومینیوم

علی تاجیار^۱، ابوالفضل معصومی^{۲*}

^۱گروه طراحی صنعتی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۶ آبان ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۱ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

شکل‌دهی مجدد غلنتکی سرد
لوله دولایه چهارگوش
فصل مشترک اتصال
لوله گرد گوش انفجاری شده

چکیده: با پیشرفت روزافزون در صنایع مختلف مانند هوافضا، شیمیایی و انتقال سیالات، تولید لوله‌های چهارگوش دولایه به دلیل کاربرد فراوانشان بیش‌ازپیش مورد اهمیت قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، فرآیند چهارگوش کردن لوله‌های گرد دولایه آلومینیوم-مس که به وسیله جوشکاری انفجاری تولید شده، توسط فرآیند نورد چهار غلنتکی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر مورفولوژی فصل مشترک اولیه بر روی ریزساختار و استحکام فصل مشترک اتصال طی فرآیند شکل‌دهی به وسیله میکروسکوپ الکترونی و آزمون استحکام برشی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین وجود و نحوه توزیع ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی عناصر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد موجی بودن فصل مشترک، میزان پیوستگی و ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک لوله‌های دولایه گرد اولیه از اهمیت عمده‌ای در طول فرآیند شکل‌دهی برخوردار بوده و بر کیفیت فصل مشترک و خواص مکانیکی اتصال محصول نهایی تأثیرگذار هستند. استحکام اتصال لوله‌هایی با فصل مشترک موجی شکل و حداقل ترکیبات بین فلزی قبل و بعد از فرآیند شکل‌دهی تغییر قابل توجهی نداشته اما استحکام اتصال با افزایش ضخامت لایه بین فلزی کاهش می‌یابد و افت استحکام اتصال در طول فرآیند شکل‌دهی برای لوله‌هایی با فصل مشترک با لایه بین فلزی ضخیم‌تر با شدت بیشتری همراه است.

انجام گرفته بر روی فرآیندهای شکل‌دهی مجدد میله و لوله‌های دولایه بررسی شده‌اند.

مرکز و همکاران [۳ و ۴] نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی خود را از فرآیند نورد میله دوفلزی مس-آلومینیوم در طول عبور از بین غلنتک‌ها ارائه داده‌اند. میله اصلی از جنس آلومینیوم بوده که با لایه مسی پوشیده شده است که به وسیله جوشکاری انفجاری به یکدیگر متصل شده‌اند. در تحلیل تئوری از نرم‌افزار فورج استفاده شده است. توزیع ضخامت لایه مسی در سطح مقطع محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب شکل و اندازه غلنتک‌ها در هر پاس، تولید میله دولایه با توزیع مطلوب لایه مسی را تضمین می‌کند. دایجا و همکاران [۵ و ۶] نتایج حاصل از تحلیل تئوری و تجربی فرآیند نورد میله‌های دوفلزی را مورد بررسی قرار داده‌اند. میله‌های اصلی از جنس فولاد و آلومینیوم می‌باشند که با لایه مس پوشش داده شده‌اند. یک مدل عددی برای فرآیند نورد گرم پیشنهاد شده که در این مدل، تغییر شکل مواد دوفلزی با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. جریان فلزی در طول فرآیند نورد میله در تبدیل سطح مقطع از گرد به بیضی شکل شبیه‌سازی گردیده است.

میلین و همکاران [۷] و در تحقیقی دیگر برسکی و همکاران [۸] به بررسی عددی و تجربی فرآیند اکستروژن میله‌های آلومینیوم-مس که به وسیله فرآیند جوشکاری انفجاری به یکدیگر متصل شده‌اند، پرداخته‌اند.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در صنایع مختلف از قبیل انتقال سیالات، صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی، مبدل‌های حرارتی که فشار و درجه حرارت بالا است، نیاز گسترده به لوله‌های دولایه غیر گرد و بدون درز با سطح مقطع متقارن و غیرمتقارن مانند مربعی، مستطیلی، پنج ضلعی و... که خصوصیات سطح داخلی آن‌ها با سطح بیرونی آن‌ها متفاوت می‌باشد، رو به افزایش است. علاوه بر این می‌توان از سطح داخلی این لوله‌ها به‌عنوان مسیر هدایت امواج الکتریکی و یا به‌عنوان قالب انجماد ریخته‌گری پیوسته استفاده نمود. با توجه به اینکه، تولید لوله‌های چندلایه به‌وسیله فرآیندهای متداول روکش‌دهی و اتصال تنها برای تولید لوله‌های گرد امکان‌پذیر است؛ در نتیجه تولید لوله‌های دولایه غیردوار نمی‌تواند در یک مرحله انجام شود و محدودیت‌هایی را به همراه دارد، لذا استفاده از یک فرآیند اتصال برای تولید یک لوله دولایه گرد اولیه و یک فرآیند شکل‌دهی بعدی می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی ممکن در تولید لوله‌های دولایه با سطح مقطع غیردوار در نظر گرفته شود. در زمینه شکل‌دهی محصول چندلایه، با وجود کاربرد گسترده‌ای که فرآیندهای فرم‌دهی در تولید این محصولات می‌تواند داشته باشند، تحقیقات کامل و گسترده‌ای صورت نگرفته است و غالب تحقیقات انجام‌شده مربوط به شکل‌دهی ورق‌های چندلایه است [۱ و ۲]. در ادامه برخی از تحقیقات

همچنین روش‌های مختلفی برای شکل‌دهی مجدد لوله‌های گرد تک لایه به چهارگوش استفاده می‌شود که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه اشاره شده است. بایومی و اتیا [۱۵] به بررسی و تعیین نیروهای شکل‌دهی و کشش در تبدیل لوله‌های گرد به لوله‌های چهارگوش به‌وسیله چهار صفحه پرداخته‌اند. این تحلیل به کمک یک روش تحلیلی و به کمک روش اجزاء محدود انجام شده و به منظور تأیید و مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی یک سری آزمایشات تجربی انجام شده است. ابری نیا و فرهمند [۱۶] یک روش تحلیلی مبتنی بر تئوری حد بالا برای نورد لوله گرد و تبدیل آن به لوله‌ای با سطح مقطع غیر گرد ارائه نموده‌اند. تأثیر پارامترهای فرآیند مانند شعاع غلتک، قطر لوله اولیه، مقدار کاهش ارتفاع غلتک‌ها بر روی محصول نورد شده مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مقایسه و تأیید نتایج شبیه‌سازی یک سری آزمایشات تجربی انجام شده است. تاجیار و ابری نیا [۱۷] تغییر شکل الاستیک-پلاستیک یک لوله گرد فلزی تک‌لایه طی فرآیند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد و تبدیل آن به لوله با مقطع مربعی و طی مراحل مختلف گذر توسط نرم‌افزار اجزاء محدود اباکوس را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحلیل تأثیر مقدار کاهش ارتفاع در هر مرحله گذر بر روی ابعاد محصول نهایی، توان شکل‌دهی و نیروی جاداشونده مورد بررسی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل، نمونه‌هایی از جنس سرب توسط دستگاه نورد آزمایشگاهی شکل‌دهی شده‌اند و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مطالعات تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تطابق خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل و آزمایش‌ها مشاهده شده است.

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر مورفولوژی فصل مشترک لوله گرد دولایه اولیه تولید شده به‌وسیله جوشکاری انفجاری بر روی ریزساختار و استحکام فصل مشترک اتصال بعد از فرآیند شکل‌دهی غلتکی مجدد برای تولید لوله‌های چهارگوش آلومینیوم-مس است. بدین منظور فصل مشترک اتصال قبل و بعد از فرآیند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد به‌وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ضخامت و نوع ترکیبات بین فلزی تشکیل‌یافته در فصل مشترک اتصال برای حالت‌های مختلف با استفاده، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی عناصر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نمای شماتیک از عبور لوله دولایه از بین غلتک‌ها را در طول فرآیند شکل‌دهی مجدد نشان می‌دهد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق لوله گرد دولایه آلومینیوم-مس اولیه با شعاع ۴۰ میلی‌متر و ضخامت لایه بیرونی آلومینیوم ۴/۵ میلی‌متر و ضخامت لایه داخلی مسی ۲ میلی‌متر که به‌وسیله فرآیند جوشکاری انفجاری تولید شده است با عبور از بین چهار غلتک به لوله‌های چهارگوش تبدیل می‌شود (شکل ۱). جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد مس و آلومینیوم استفاده شده را نشان می‌دهد. جهت تولید لوله‌های گرد دولایه از فرآیند جوشکاری انفجاری استفاده شده است و ماده منفجره مورد استفاده آماتول است. شکل ۲ نمای شماتیک

بررسی انتخاب مناسب شکل قالب و پارامترهای فرآیند اکستروژن به‌وسیله تحلیل تئوری بر اساس روش اجزا محدود موارد اصلی بحث در این تحقیقات است. جو و همکاران [۹] به بررسی شکل‌پذیری و استحکام اتصال لوله گرد آلومینیوم-فولاد تولید شده به‌وسیله جوشکاری انفجاری در فرآیندهای بعدی شکل‌دهی که بر روی آن انجام می‌شود، پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هیچ جدایشی پس از فرآیند اکستروژن و هیدروفرمینگ سرد انجام گرفته بر روی لوله دولایه رخ نداده است که این حالت نشان می‌دهد لوله دولایه از خواص اتصال بسیار خوبی برخوردار بوده و می‌تواند تغییر شکل پلاستیک در طی فرآیندهای بعدی را تحمل کند. سان و همکاران [۱۰] به بررسی مشخصات فصل مشترک اتصال لوله دوجداره آهن-آلومینیوم که به‌وسیله جوشکاری انفجاری تولید شده است پرداخته‌اند. آزمون‌های فشار، تخت کاری، برش-فشار انجام گرفته است و نتایج حاصل از آن‌ها نشان می‌دهد، فصل مشترک حاصل از استحکام برشی بالاتری نسبت به فلز آلومینیوم پایه برخوردار است و می‌تواند هر دو تغییر شکل محوری و شعاعی را تحمل کند. سپس لوله‌ها در ساخت لوله‌های T شکل به روش هیدروفرمینگ استفاده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد وجود یک باند مناسب می‌تواند نقش عمده‌ای در شکل‌دهی لوله‌های T شکل داشته باشد. ساخت میله‌های آلومینیوم-مس به‌وسیله فرآیندهای جوشکاری انفجاری و اکستروژن گرم بعدی توسط مملیس و همکاران [۱۱] گزارش شده است. تأثیر پارامترهای فرآیند اکستروژن بر روی خصوصیات ماکروسکوپی و میکروسکوپی محصول نهایی با استفاده از تست سختی و متالوگرافی نشان داده شده است. آن‌ها گزارش داده‌اند که به‌کارگیری اکستروژن گرم به‌عنوان یک روش شکل‌دهی پس از فرآیند جوشکاری، به‌جای اکستروژن سرد، می‌تواند عیوب اکستروژن را به حداقل برساند.

در تولید لوله‌های چهارگوش دولایه که به‌طور گسترده می‌توانند در صنایعی همچون صنایع نفت و گاز و انتقال سیالات به‌کاربرده شوند، نیز می‌توان ابتدا از یک فرآیند روکش‌دهی برای تولید لوله گرد دولایه و سپس از یک فرآیند شکل‌دهی برای تغییر شکل آن به لوله چهارگوش دولایه استفاده نمود. تاجیار و معصومی [۱۲] به بررسی تأثیر فرآیند شکل‌دهی غلتکی مجدد بر روی خواص مکانیکی لوله گرد دولایه آلومینیوم-مس طی مراحل مختلف گذر پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار کاهش ارتفاع در هر مرحله گذر سختی لایه‌ها در قسمت تخت لوله افزایش و استحکام اتصال کاهش یافته است. چن و یه در دو تحقیق [۱۳ و ۱۴] فرآیند چهارگوش کردن یک لوله مدور دولایه را به لوله‌ای مربعی شکل با استفاده از تحلیل اجزا محدود سه‌بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق اول فرآیند چهارگوش کردن با استفاده از چهار صفحه تخت و در تحقیق دوم چهارگوش کردن با قراردادن لوله گرد بین دو قالب V شکل انجام شده است. تأثیر پارامترهای فرآیندی مختلف، مانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی، نرخ هندسی و طول لوله بر روی رخ دادن عیوب در فرآیند چهارگوش کردن لوله‌های دولایه در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار داده شده است.

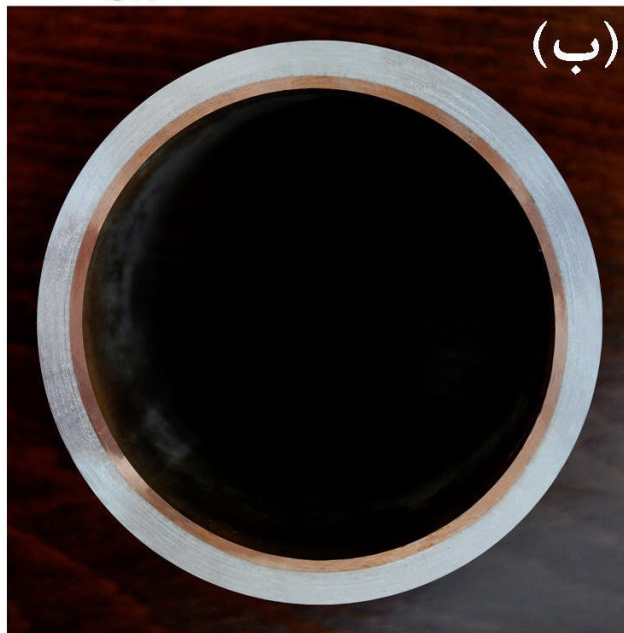
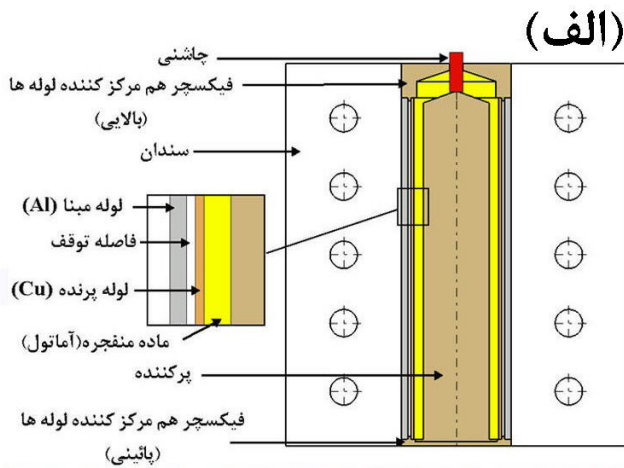


Fig. 2. (a) Schematic view of the explosive welding process arrangement; (b) explosive welded circular pipe.

شکل ۲: (الف) نمایی شماتیک از چیدمان لوله‌ها در فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) لوله گرد جوش انفجاری شده

بررسی‌های متالوگرافی در فواصل دورتری از لبه‌ها انتخاب گردیدند (۱۰ میلی‌متر از لبه). در این راستا تمامی مقاطع مورد نظر، در جهت موازی با جبهه انفجار برای نمونه‌های جوش انفجاری شده و در جهت موازی با عبور از بین غلتک‌ها برای نمونه‌های نوردشده در قسمت تخت انتخاب شده‌اند. پس از جداسازی سطوح موردبررسی و براساس استانداردهای متالوگرافی، نمونه‌ها مانع شده و سپس هرکدام از نمونه‌ها در مراحل مختلف از سنباده شماره ۱۲۰ تا سنباده شماره ۵۰۰۰ زده شدند. جهت آماده‌سازی نهایی، نمونه‌ها در دو مرحله توسط خمیر الماسه ۱ و ۰/۲۵ میکرون پولیش شدند. به منظور بررسی دقیق‌تر فصل مشترک اتصال از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی و آنالیز ترکیبات بین فلزی موجود در فصل مشترک از سنجش شدت انرژی پرتو ایکس موجود در دستگاه میکروسکوپ الکترونی استفاده شد.

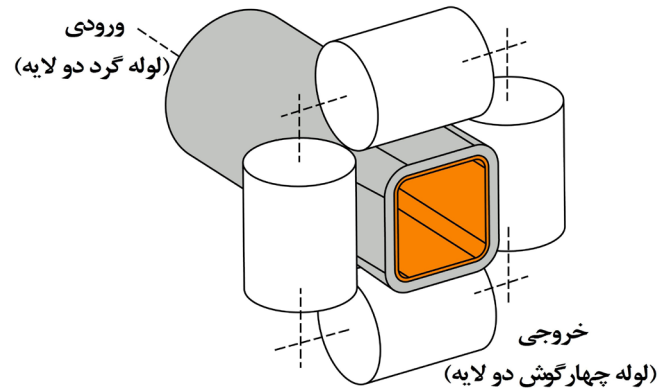


Fig. 1. Schematic view of shape-rolling process of two-layer pipe.

شکل ۱: نمایی شماتیک از شکل‌دهی مجدد لوله دو لایه

جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد مس و آلومینیوم استفاده‌شده

Table 1. Chemical composition of the materials (Al and Cu).

مس	آلومینیوم	
ماده پایه	<۰/۰۰۰۲	Cu
<۰/۰۰۰۴	۰/۰۱	MN
۰/۰۱۶	۰/۶	Si
۰/۰۰۰۴	۰/۳۵	Mg
۰/۰۱۴	<۰/۰۰۰۱	P
۰/۰۳۵	۰/۱۵	Fe
۰/۰۰۴	ماده پایه	Al

از چیدمان لوله‌ها در فرآیند جوشکاری انفجاری و سطح مقطع لوله گرد دو لایه بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری را نشان می‌دهد. سپس لوله‌های گرد دو لایه تحت عملیات شکل‌دهی مجدد در ۵ مرحله گذر با کاهش ارتفاع ۲ میلی‌متر در هر مرحله قرار گرفته‌اند. شکل ۳(الف) دستگاه نورد چهارغلتکی را در حین عملیات چهارگوش کردن لوله نشان می‌دهد. غلتک‌های دستگاه، استوانه‌هایی از جنس CK45 با قطر خارجی ۱۰۷/۵ میلی‌متر می‌باشند که محور آن‌ها دویبه‌دو با هم موازی است. ایستگاه نورد از دو قفسه مجزا تشکیل گردیده است. هر قفسه دارای یک محور افقی و یک محور عمودی می‌باشد. سیستم انتقال حرکت و قدرت متشکل از دو عدد موتور گیربکس با قدرت ۱/۱ کیلووات و دور خروجی ۲۰ دور بر دقیقه می‌باشد که هرکدام یک محور افقی را به حرکت درمی‌آورد. شکل ۳(ب) نمونه‌ای از لوله چهارگوش دو لایه بعد از عملیات شکل‌دهی مجدد در آخرین مرحله گذر را نشان می‌دهد.

جهت بررسی مورفولوژی فصل مشترک اتصال لایه‌های مس-آلومینیوم، شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک دو آلیاژ در حین فرآیند جوش انفجاری و همچنین تغییرات احتمالی در فصل مشترک اتصال در حین فرآیند شکل‌دهی مجدد، از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. از آن‌جا که اتصال لایه‌ها در هر دو انتهای لوله کم‌ترین خصوصیات استحکام پس از فرآیند اتصال و فرآیند شکل‌دهی را دارا هستند، لذا نمونه‌ها جهت

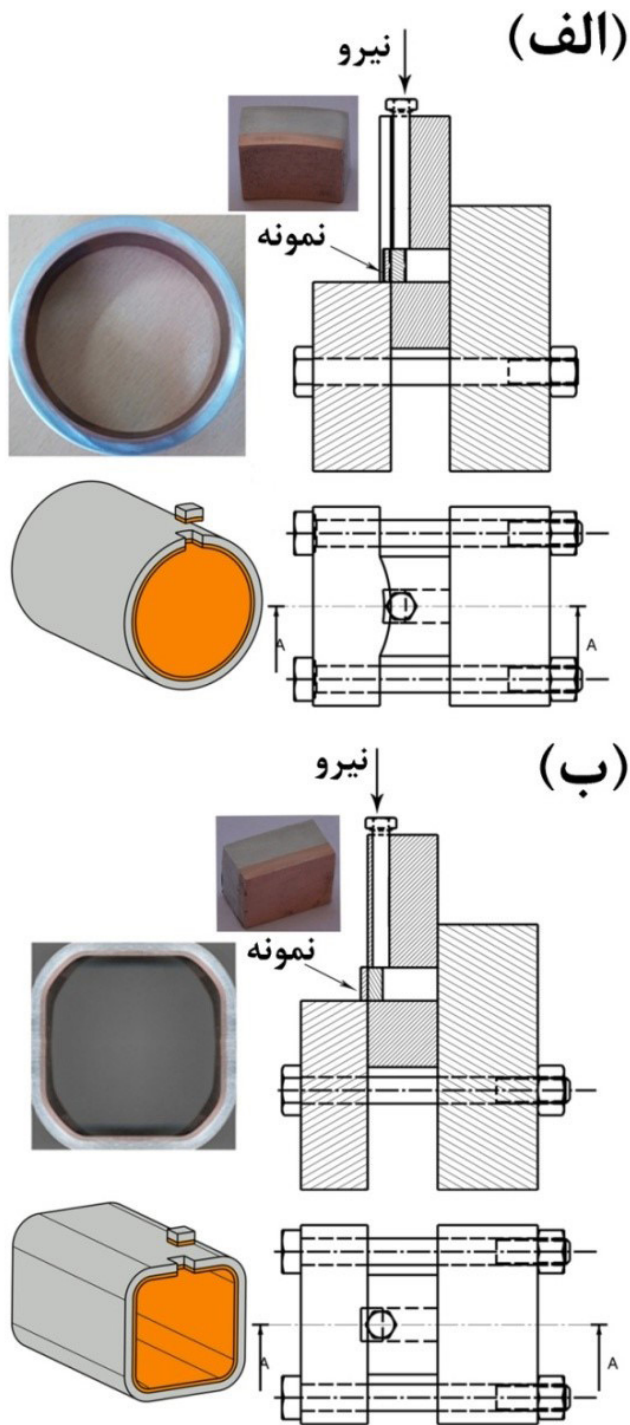


Fig. 4. Schematic of samples and the supplemental fixture for shear test of joints: (a) explosive-welded circular pipe (b) shape-rolled square tube.

شکل ۴: نمایی شماتیک از قیدوبندهای به کاررفته در آزمایش استحکام برشی و نمونه‌های آماده‌شده، (الف) لوله گرد جوش انفجاری شده (ب) لوله چهارگوش نورد شده

میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفتند. استحکام برشی با تقسیم حداکثر نیروی گزارش شده بر سطح تماس دولایه محاسبه شد. همچنین، آزمون استحکام برشی به منظور دقت بیشتر سه بار برای هر نمونه انجام شده و مقدار متوسط به عنوان استحکام برشی نهایی گزارش شده است.

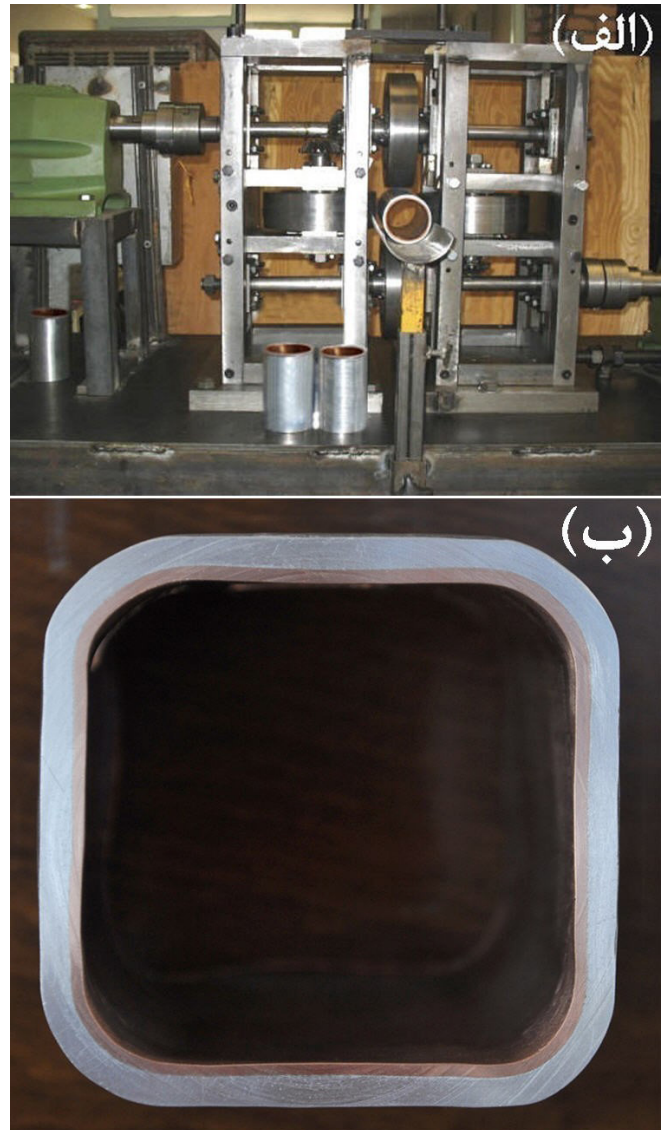


Fig. 3. (a) The test rig during the shape rolling process of two-layer pipe; (b) Sample of two-layer square tube after shape rolling process.

شکل ۳: (الف) دستگاه نورد در حین عملیات چهارگوش کردن لوله گرد دولایه، (ب) نمونه‌ای از لوله چهارگوش دولایه بعد از عملیات شکل‌دهی مجدد

همچنین بررسی استحکام اتصال فصل مشترک نمونه‌های جوش انفجاری شده و اثر فرآیند نورد ثانویه بر استحکام اتصال فصل مشترک آن‌ها توسط آزمون استحکام برشی انجام گردیده است. بدین منظور دو قیدوبند مخصوص برای نمونه‌های جداشده از لوله گرد جوش انفجاری شده و از قسمت تخت لوله چهارگوش نوردشده طراحی و ساخته شد. نمونه‌ها به فاصله ۱۰ میلی‌متر از سر لوله‌ها و به ابعاد نمونه ۱۲ میلی‌متر عرض و ۱۰ میلی‌متر طول در راستای طولی لوله‌های گرد و مربعی انتخاب و برش داده شدند، به طوری که عرض آن‌ها در راستای محیطی لوله‌ها می‌باشد. شکل ۴ نمایی از قیدوبندهای به کاررفته در آزمایش استحکام برشی، نمونه‌های آماده‌شده و همچنین نحوه قرارگیری نمونه‌ها در قیدوبندها را نشان می‌دهند. نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی، درون قیدوبند قرار گرفته و به وسیله دستگاه فشار با سرعت ۰/۵

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی فصل مشترک اتصال

در طول فرآیند شکل‌دهی بعدی بر روی لوله دولایه به دلیل تنش‌های ایجادشده در منطقه اتصال و توزیع غیریکنواخت آن‌ها در فصل مشترک و تشدید عیوب متالورژیکی اولیه که می‌تواند در فرآیند جوشکاری ایجادشده باشد، ممکن است در نمونه نهایی باعث حضور شبکه‌ای از ترک‌ها، جدایش و شکست شود. این عیوب و جدایش احتمالی ممکن است دقیقاً در فصل مشترک یا در مناطق مجاور فصل مشترک و در مواد متصل شده رخ دهد. در ابتدا به منظور بررسی اثر لایه بین فلزی بر روی کیفیت اتصال در طول فرآیند نورد، دو نوع فصل مشترک حاصل از جوشکاری انفجاری لوله موردبررسی قرار گرفته است: فصل مشترک با لایه بین فلزی نازک و غیرپیوسته و نمونه دیگر با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته (شکل‌های ۵ و ۷).

برای نمونه با فصل مشترک صاف، ضخامت لایه بین فلزی ۵ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد (شکل ۵ (الف)). شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک نمونه و جدول ۲ آنالیز عنصری منطقه مشخص شده A را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به توزیع عنصری به‌دست‌آمده، ترکیب بین فلزی ایجادشده در فصل مشترک، Al_2Cu می‌باشد که تنها در برخی از نقاط فصل مشترک ایجادشده است. علاوه بر این، هیچ نشانه قابل توجهی از ترک‌های اولیه در فصل مشترک وجود ندارد.

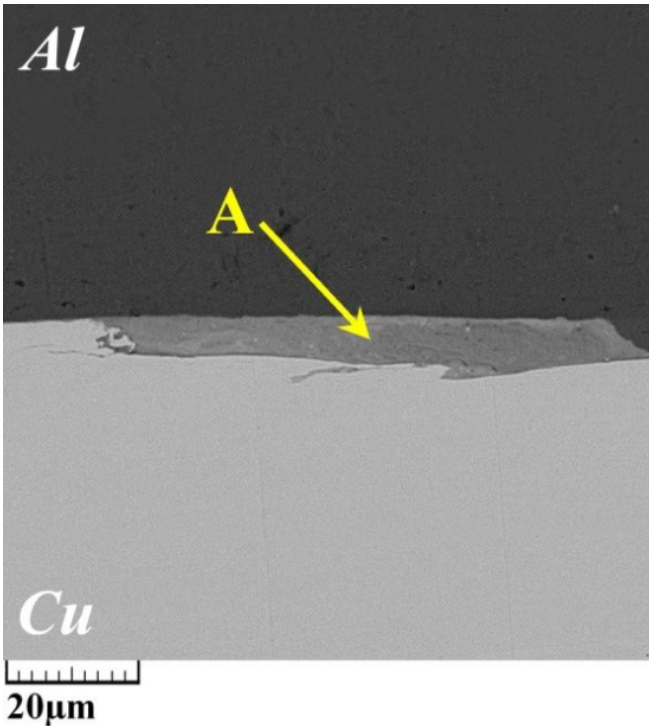


Fig. 6. SEM image of Al-Cu interface with thin and discontinuous intermetallic layer

شکل ۶: تصویر SEM از فصل مشترک با لایه بین فلزی نازک و ناپیوسته

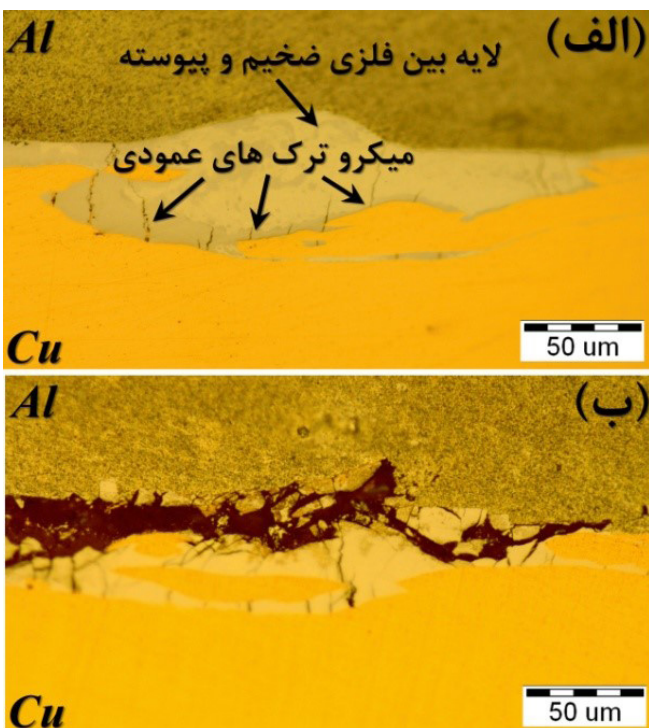


Fig. 7. Cross-section optical image of Al/Cu interface with thick and continuous intermetallic layer (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۷: تصویر فصل مشترک با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته، (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

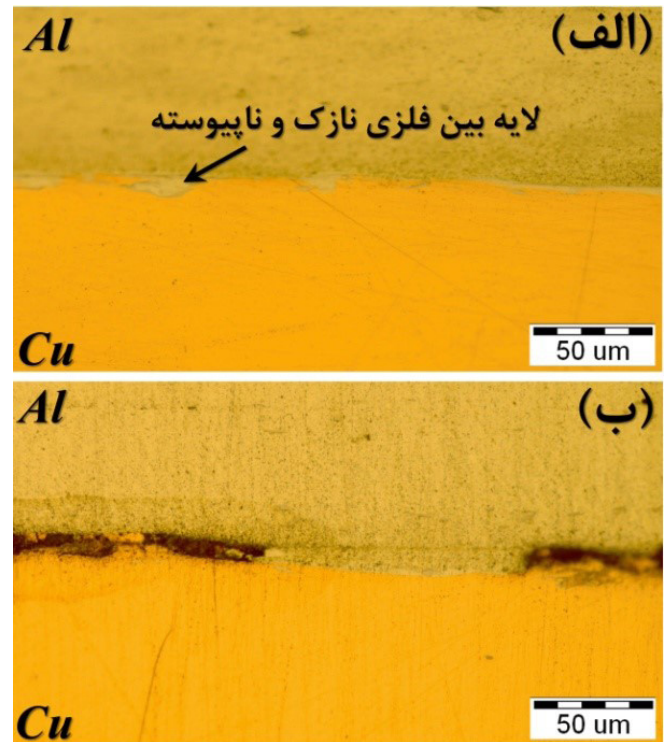


Fig. 5. Cross-section optical image of Al/Cu interface with thin and discontinuous intermetallic layer (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۵: تصویر فصل مشترک با لایه بین فلزی نازک و ناپیوسته، (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

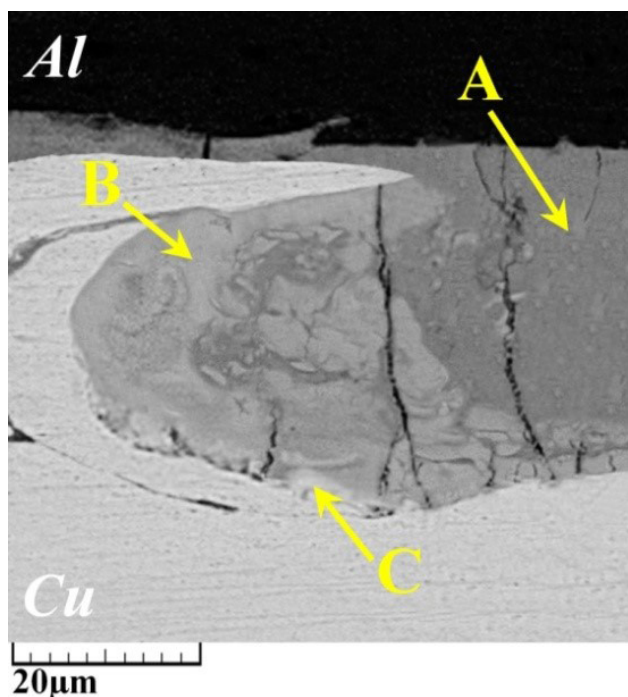


Fig. 8. SEM image of Al-Cu interface with thick and continuous intermetallic layer.

شکل ۸: تصویر SEM از فصل مشترک با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته

و Al_4Cu_9 باشند. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر برای صفحات دولایه آلومینیوم/مس ساخته شده توسط جوشکاری انفجاری گزارش شده است [۱۸].

همان طور که در شکل ۷ (ب) نشان داده شده است مشاهده می شود که پس از آخرین مرحله گذر، جدایش در فصل مشترک این لوله رخ داده است. در طول فرآیند نورد، شدت انتشار ترکها در فصل مشترک با لایه بین فلزی پیوسته به گونه ای بوده است که در نهایت، در آخرین مرحله گذر، این ترکها به یکدیگر رسیده، پیوسته شده و منجر به شکست و جدایش در فصل مشترک می شود. حضور ترکهای اولیه و ضخیم و پیوسته بودن لایه ترد بین فلزی می تواند منجر به شروع و سرعت بخشیدن انتشار ریزترکها در لایه بین فلزی در طول فرآیند نورد شده باشد. دایجا و همکاران تشکیل شبکه ای از ریزترکها را در فصل مشترک میله های دولایه فولاد-مس بعد از فرآیند نورد بر روی آن ها گزارش کرده اند [۶].

با توجه به اینکه الگوی موجی شکل یکی دیگر از مشخصه های فصل مشترک حاصل از جوشکاری انفجاری است، تأثیر موجی بودن فصل مشترک بر روی کیفیت اتصال در طول فرآیند شکل دهی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در اغلب موارد جوشکاری انفجاری، فصل مشترک به دلیل رفتار سیال گونه مواد تحت فشار و نرخ کرنش بالا به صورت موجی شکل می گیرد. شکل های ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ تصاویر فصل مشترک لوله های دولایه جوش انفجاری شده با مورفولوژی موجی شکل را قبل و بعد از فرآیند شکل دهی نورد نشان می دهد. شکل ۹ (الف) فصل مشترک لوله آلومینیوم-مس با لایه بین فلزی پیوسته و موجهای مسی که به طور کامل شکل نگرفته اند را

جدول ۲: نتایج آنالیز EDS منطقه A مشخص شده در شکل ۶

Table 2. EDS analysis from the region marked with A in Figure 6.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
A ناحیه	۶۶/۳۴	۳۳/۳۶	Al_2Cu

شکل ۵ (ب) فصل مشترک نمونه را بعد از فرآیند شکل دهی در آخرین مرحله گذر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، هر دولایه مس و آلومینیوم به طور یکنواخت تغییر شکل یافته اند و با وجود فصل مشترک صاف، لایه ها بعد از فرآیند نورد به طور کامل از هم جدا نشده اند؛ اما با افزایش مقدار کاهش ارتفاع، ریزترکها درون لایه بین فلزی نازک انتشار یافته و خطوط جدایش ناشی از این ریزترکها گسترش یافته است. با این حال با توجه به ناپیوسته بودن لایه بین فلزی، ترکها به طور کامل قادر به انتشار در طول فصل مشترک نبوده و در نتیجه اتصال فصل مشترک تا آخرین مرحله گذر حفظ شده است.

همان طور که در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است، در فصل مشترک با لایه بین فلزی پیوسته و ضخیم، ضخامت این لایه در حدود ۲۰ تا ۵۰ میکرومتر می باشد. همانطور که مشاهده می شود، فصل مشترک بین لایه بین فلزی و لایه آلومینیوم نسبتاً صاف می باشد، در حالی که فصل مشترک بین مس و لایه بین فلزی به صورت موجهای شکسته و با فرم نامتقارن است (شکل ۷ (الف)). همچنین ترکهای عمودی در داخل لایه بین فلزی قبل از فرآیند نورد مشاهده می شود. حضور ترکهای کوتاه عمودی در این مناطق نشان می دهد که رفتار این لایه نباید همانند مس و آلومینیوم داکتیل باشد. ترکها همیشه به لایه بین فلزی محدود بوده و هیچ تمایلی را برای انتشار درون مواد پایه (در لایه مس یا آلومینیوم) نشان نمی دهند. داکتیلتی خوب لایه مسی و آلومینیومی باعث می شود که درون این لایه ها اثری از ریزترک و یا دیگر عیوب ساختاری نباشد. شکل ۸ تصویر SEM فصل مشترک این نمونه و جدول ۳ آنالیز EDS از مناطق A، B و C مشخص شده در شکل ۸ را نشان می دهد. با توجه به نتایج مربوط به منطقه A ($67/11Al-32/89Cu$)، نسبت درصد اتمی آلومینیوم به مس تقریباً ۲:۱ می باشد که نشان می دهد مقدار عمده ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک می تواند Al_2Cu باشد. همچنین دیده می شود که در نقاط (B و C) به ترتیب ترکیبات ($49/55Al-50/45Cu$) و ($30/41Al-69/59Cu$) ایجاد شده است که نشان می دهد فازهای بین فلزی در این مناطق می توانند

جدول ۳: نتایج آنالیز EDS مناطق A، B، C مشخص شده در شکل ۸

Table 3. EDS analysis from the regions marked with A, B, and C in Figure 8.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
A ناحیه	۶۷/۱۱	۳۲/۸۹	Al_2Cu
B ناحیه	۴۹/۵۵	۵۰/۴۵	$AlCu$
C ناحیه	۳۰/۴۱	۶۹/۵۹	Al_4Cu_9

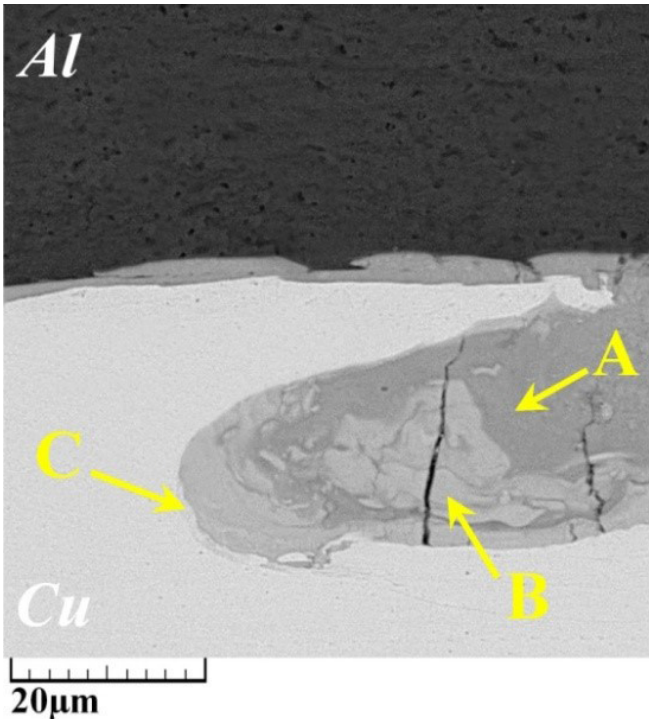


Fig. 10. SEM image of Al-Cu wavy form interface with thick and continuous intermetallic layer.

شکل ۱۰: تصویر SEM از فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته

جدول ۴: نتایج آنالیز EDS مناطق A, B, C مشخص شده در شکل ۱۰
Table 4. EDS analysis from the regions marked with A, B, and C in Figure 10.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
ناحیه A	۶۶/۱۹	۳۳/۸۱	Al ₂ Cu
ناحیه B	۵۲/۱۱	۴۷/۸۹	AlCu
ناحیه C	۳۱/۳۱	۶۸/۶۹	Al ₄ Cu ₉

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ (الف) و ۱۳ (الف) مشاهده می‌شود، در فصل مشترک نمونه‌ها، موج‌های مسی به‌صورت کامل و ترکیبات بین فلزی درون موج‌های مسی و بین لایه‌های آلومینیوم و مس تشکیل شده است. ضخامت لایه بین فلزی در مقایسه با نمونه قبل کمتر می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۴ و آنالیزهای EDS مربوطه که در جداول ۵ و ۶ آورده شده است، عمده این ترکیبات درون و بیرون موج‌های مسی به ترتیب AlCu و Al₂Cu می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ (الف) و ۱۳ (الف) نشان داده شده است، ترک‌های عمودی در این نواحی ایجاد شده است، هرچند که در مقایسه با نمونه قبل کمتر و کوچک‌تر می‌باشند.

بعد از انجام فرآیند شکل‌دهی در آخرین مرحله گذر همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ (ب) و ۱۳ (ب) مشاهده می‌شود، ترک‌ها عمدتاً در لایه بین فلزی میان لایه‌های آلومینیوم و مس انتشار یافته‌اند و ترکیبات بین فلزی محبوس شده در موج‌های مسی اثر مخرب بسیار کمتری را داشته‌اند. حضور

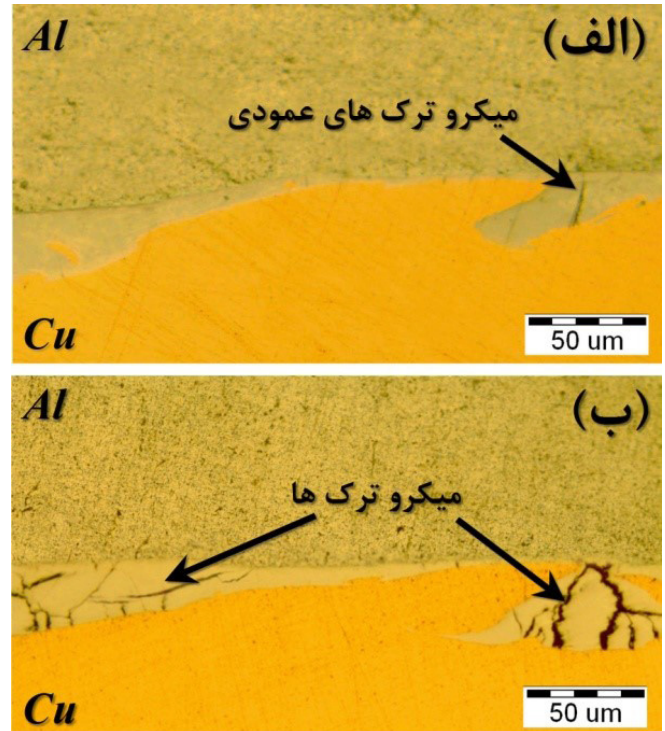


Fig. 9. Cross-section optical image of Al/Cu wavy form interface with thick and continuous intermetallic layer (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۹: تصویر فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

قبل از فرآیند شکل‌دهی نشان می‌دهد. همچنین ترک‌های عمودی در لایه بین فلزی تیز مشاهده می‌شود. شکل ۹ (ب) فصل مشترک اتصال را در لوله چهارگوش دولایه بعد از آخرین مرحله گذر نشان می‌دهد. با بررسی فصل مشترک قبل و بعد از فرآیند شکل‌دهی مشاهده می‌شود که الگوی موجی شکل فصل مشترک حفظ شده است، اما منطقه شامل ترکیبات بین فلزی در خلال فرآیند نورد تحت تأثیر قرار گرفته است که می‌تواند به دلیل ماهیت ترد و شکننده این ترکیبات بین فلزی باشد. مشاهده می‌شود که در فصل مشترک و در داخل لایه بین فلزی، ریزترک‌ها گسترش یافته‌اند که این امر می‌تواند باعث کاهش، استحکام اتصال در فصل مشترک شود هرچند جدایش در فصل مشترک رخ نداده است.

به نظر می‌رسد تجمع بیشتر ترک‌ها در مناطق نزدیک به قسمت جلوی موج‌ها باشد. با توجه به تصویر SEM از فصل مشترک این نمونه و نتایج حاصل از آنالیز EDS که در شکل ۱۰ و جدول ۴ آورده شده است، در این مناطق وجود فازهای بین فلزی مختلف بیشتر است (AlCu، Al₄Cu₉) علاوه بر Al₂Cu که می‌تواند از عوامل تشکیل ترک‌های بیشتر در این مناطق باشد. با مقایسه فصل مشترک این نمونه با فصل مشترک نمونه با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته، حضور موج‌های مسی علی‌رغم اینکه این موج‌ها به طور کامل شکل نگرفته‌اند، مانعی برای انتشار ترک‌ها در طول فصل مشترک، به گونه‌ای که منجر به جدایش کامل نشود، بوده‌اند.

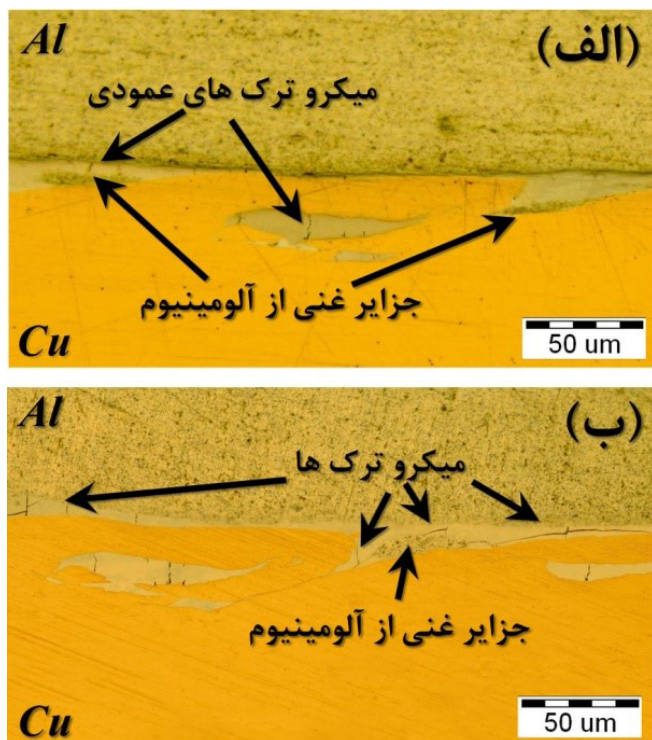


Fig. 13. Cross-section optical image of Al/Cu wavy form interface with continuous intermetallic layer and Al-rich islands (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۱۳: تصویر فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی پیوسته و جزایر غنی از آلومینیوم، (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

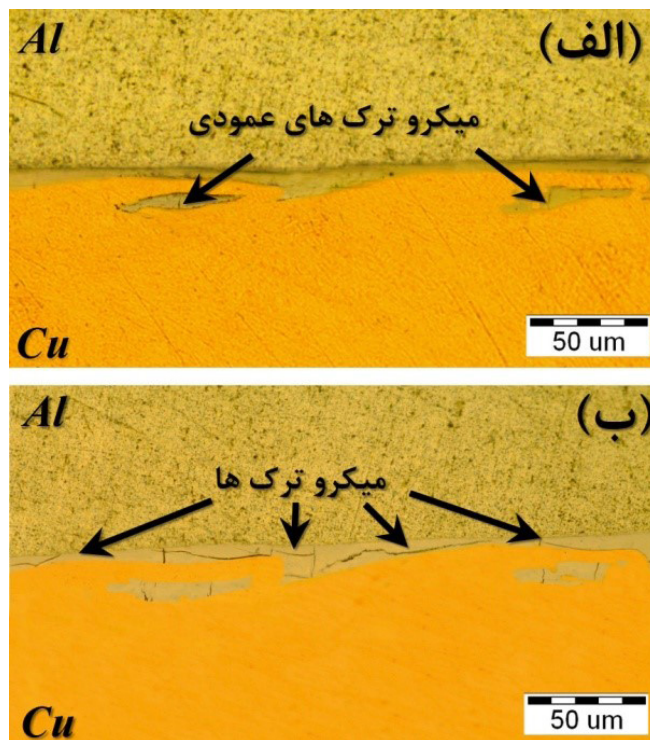


Fig. 11. Cross-section optical image of Al/Cu wavy form interface with continuous intermetallic layer (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۱۱: تصویر فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی پیوسته، (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

جدول ۵: نتایج آنالیز EDS مناطق A، B، C مشخص شده در شکل ۱۲

Table 5. EDS analysis from the regions marked with A, B, and C in Figure 12.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
A ناحیه	۶۷/۳۵	۳۲/۶۵	Al ₂ Cu
B ناحیه	۴۸/۵۴	۵۱/۴۶	AlCu
C ناحیه	۶۷/۱۳	۳۲/۸۷	Al ₂ Cu

جدول ۶: نتایج آنالیز EDS مناطق A، B، C مشخص شده در شکل ۱۴

Table 6. EDS analysis from the regions marked with A, B, and C in Figure 14.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
A ناحیه	۶۶/۸۹	۳۳/۱۱	Al ₂ Cu
B ناحیه	۴۹/۸۹	۵۰/۱۱	AlCu
C ناحیه	۱۰۰	۰	Al

موج‌های مسی در این نمونه‌ها باعث شده تا هر یک از موج‌ها به‌عنوان مانعی عمل کرده و از انتشار ترک در فصل مشترک به‌صورت کامل جلوگیری کند.

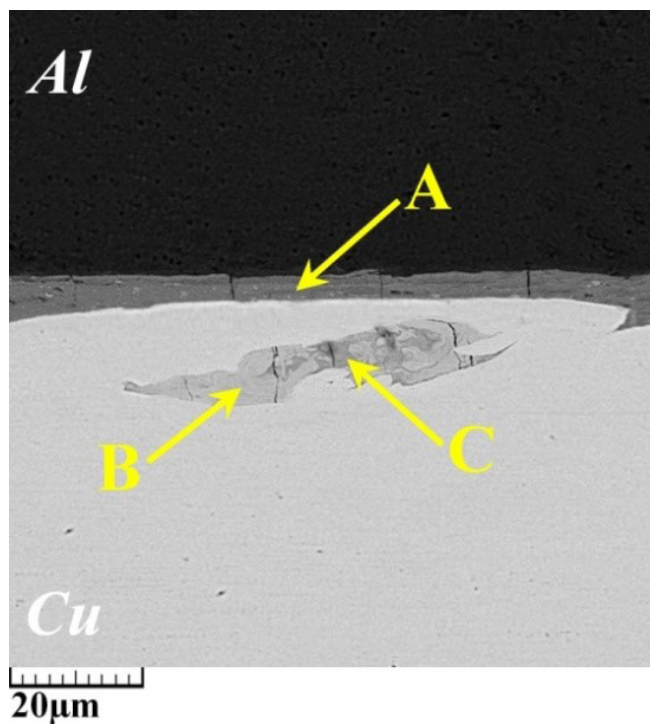


Fig. 12. SEM image of Al-Cu wavy form interface with continuous intermetallic layer.

شکل ۱۲: تصویر SEM از فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی پیوسته

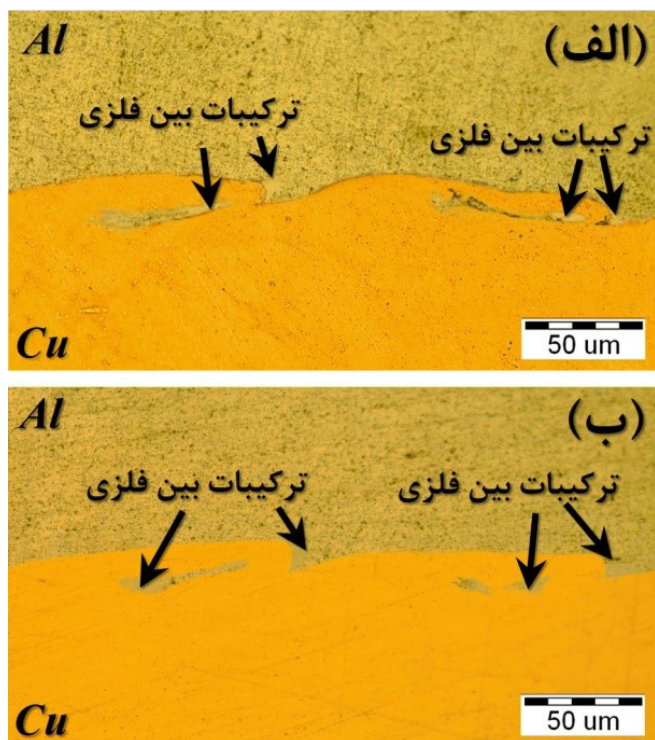


Fig. 15. Cross-section optical image of Al/Cu wavy form interface with minimum intermetallic compounds (a) after explosive welding process (b) after the last stage of shape rolling process.

شکل ۱۵: تصویر فصل مشترک موجی شکل با حداقل ترکیبات بین فلزی، (الف) بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری (ب) بعد از آخرین مرحله گذر فرآیند نورد

نمی‌شود. همان‌طور که مملیس و همکاران [۱۱] در تحقیق خود گزارش داده‌اند، فصل مشترک موجی شکل حاصل از جوش انفجاری میله دولایه مس-آلومینیوم طی فرآیند شکل‌دهی بعدی (اکستروژن) به صورت فصل مشترک صاف تبدیل شده است اما در تحقیق حاضر الگوی موجی شکل فصل مشترک حفظ شده است. به عبارت دیگر مقاومت فصل مشترک موجی شکل به اندازه‌ای کافی می‌باشد که دچار آسیب نشود و موج‌ها به‌عنوان سدی در حین اعمال تنش‌های برشی در طول فرآیند نورد، عمل می‌کنند. همچنین، میزان ترکیبات بین فلزی موجود به‌گونه‌ای است که تأثیر مخربی بر روی فصل مشترک در طول فرآیند نورد نداشته‌اند، علی‌رغم اینکه این ترکیبات ترد و شکننده می‌توانند مستعد ایجاد ترک در فصل مشترک باشند، با مقایسه ویژگی‌های فصل مشترک نمونه‌ها مشخص می‌شود که وجود فازهای بین فلزی مختلف با سختی بالا در فصل مشترک و وجود ترک‌های عمودی اولیه، عواملی جهت تشکیل ترک‌های ممتد و طولانی می‌باشند. با اعمال تنش برشی در طول فرآیند نورد، این ترک‌ها گسترش یافته که نهایتاً می‌تواند منجر به جدایش در فصل مشترک شود. لذا نقش موجی بودن فصل مشترک، پیوستگی و ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک لوله‌های دولایه از اهمیت عمده‌ای در فرآیند شکل‌دهی نورد آن‌ها برخوردار است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار و ضخامت کم ترکیبات بین فلزی، موجی شکل بودن فصل مشترک برای هر دو فلز پایه که منجر به اتصال

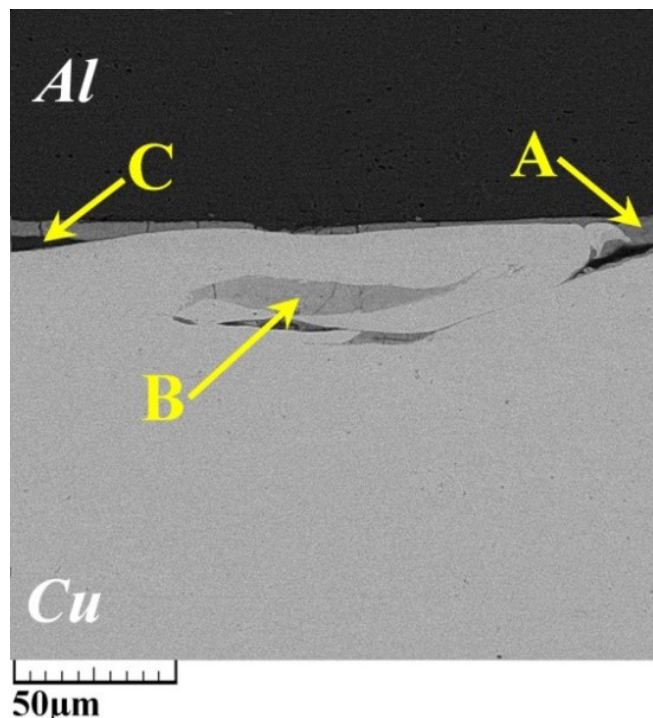


Fig. 14. SEM image of Al-Cu wavy form interface with continuous intermetallic layer and Al-rich islands.

شکل ۱۴: تصویر SEM از فصل مشترک موجی شکل با لایه بین فلزی پیوسته و جزایر غنی از آلومینیوم

در نتیجه شاهد ترک‌های کوچک‌تر در لایه بین فلزی بوده که نهایتاً منجر به جدایش در فصل مشترک نشده‌اند. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، حضور جزایر غنی از آلومینیوم در لایه بین فلزی یکی از دیگر دلایل عدم انتشار کامل و گسترش ترک‌ها در فصل مشترک بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد انتشار ترک‌ها با رسیدن به این مناطق متوقف شده است.

شکل ۱۵ تصاویر فصل مشترک موجی شکل با حداقل ترکیبات بین فلزی را قبل و بعد از فرآیند نورد در آخرین مرحله گذر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ (الف) مشاهده می‌شود. مورفولوژی فصل مشترک ساختاری موجی شکل و منظم دارد. یکی دیگر از مواردی که در این فصل مشترک مشاهده می‌شود موجی بودن لایه آلومینیوم است که در نمونه‌های قبلی به صورت صاف با لایه بین فلزی شکل می‌گرفتند. لازم به ذکر است که مواردی مانند ترکیبات بین فلزی ترد پیوسته و ریزترک‌های عمودی که در نمونه‌های قبلی به آن اشاره شد، در این نمونه دیده نمی‌شود. همان‌طور که در تصویر SEM و آنالیز EDS نشان داده شده است (شکل ۱۶ و جدول ۷)، بخش قابل توجهی از فصل مشترک بدون ترکیبات بین فلزی است و مقدار بسیار کمی از این ترکیبات جلو و یا داخل موج‌های مسی قرار گرفته‌اند. ترکیب بین فلزی به وجود آمده در فصل مشترک با توجه به درصد وزنی آن Al_2Cu می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۵ (ب) مشاهده می‌شود که فرآیند نورد اثر مخربی بر روی فصل مشترک نداشته است و تغییر ریزساختاری قابل توجهی دیده

نمونه‌های با فصل مشترک صاف و فصل مشترک با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته قبل از فرآیند نورد به ترتیب ۷۸ و ۵۷ مگاپاسکال می‌باشد. با انجام فرآیند شکل‌دهی می‌توان مشاهده نمود که یک افت قابل توجه در استحکام برشی اتصال هر دو نمونه در طول این فرآیند رخ داده است، اما این کاهش در استحکام برشی برای نمونه با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته نسبت به نمونه با لایه بین فلزی نازک و غیرپیوسته بسیار بیشتر است. پس از آخرین مرحله گذر، استحکام برشی نمونه با لایه بین فلزی نازک و غیرپیوسته به ۶۲ مگاپاسکال کاهش یافته درحالی‌که برای نمونه با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته، لایه‌های مس و آلومینیوم با اعمال تنش‌های بسیار کمتری از یکدیگر جدا شده‌اند. همچنین برای نمونه‌ای که موج‌های مسی به صورت کامل شکل نگرفته در مقایسه با نمونه‌هایی با فصل مشترک موجی شکل و حضور لایه بین فلزی در فصل مشترک کاهش استحکام برشی بیشتر می‌باشد.

تشکیل ترک‌های بیشتر در لایه بین فلزی پیوسته به دلیل ماهیت ترد و شکننده آن و عدم حضور موج‌های کامل مسی باعث شده تا استحکام برشی افت بیشتری را داشته باشد. هرچند در مقایسه با نمونه‌ای که فصل مشترکی با لایه بین فلزی ضخیم و پیوسته دارد به دلیل حضور همین موج‌های مسی (هرچند به صورت کامل تشکیل نشده‌اند) مانع از پیشرفت و انتشار بیشتر ترک‌ها شده و افت استحکام برشی کمتری را شاهد هستیم. کاهش استحکام برشی در دو نمونه دیگر نیز همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۳ نشان داده شد به دلیل تشکیل ریزترک‌ها در لایه بین فلزی در طول فرآیند نورد می‌باشد. تشکیل موج‌های کامل مسی در لایه بین فلزی در این دو نمونه باعث شده تا پیوستگی لایه بین فلزی کمتر شود و از انتشار و گسترش بیشتر ترک‌ها در طول فرآیند نورد جلوگیری شود که در نتیجه آن باعث کاهش کمتر استحکام برشی بعد از فرآیند شکل‌دهی می‌گردد. همچنین در نمونه‌ای که در لایه بین فلزی آن جزایر آلومینیومی وجود دارند کاهش استحکام برشی کمتری مشاهده می‌گردد که به دلیل مانع‌شدن همین جزایر آلومینیومی از انتشار بیشتر ترک‌ها در فصل مشترک است.

برای نمونه با فصل مشترک با موج‌های منظم و حداقل مقدار ترکیبات بین فلزی قبل از فرآیند نورد، مقدار استحکام برشی برابر ۱۱۴/۴۵ مگاپاسکال می‌باشد و شکست در نزدیکی خط فصل مشترک در لایه آلومینیومی رخ داده است. نتایج حاصل از استحکام برشی نمونه شکل‌دهی شده بعد از آخرین مرحله گذر نشان می‌دهد که استحکام برشی اتصال بعد از فرآیند نورد افت قابل توجهی نداشته و جدایش در فصل مشترک اتصال رخ نداده و شکست در لایه آلومینیوم و موازی فصل مشترک می‌باشد. عاصم آبادی و همکاران نیز عدم جدایش از فصل مشترک ورق‌های ۳ لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم جوش انفجاری شده را قبل و بعد از فرآیند نورد بر روی آن‌ها گزارش کرده‌اند [۱]. این نتایج نشان می‌دهد که استحکام باند در لوله دولایه بعد از فرآیند نورد همچنان بیشتر از استحکام فلز پایه آلومینیوم است. در هم قفل شدن مکانیکی به خاطر وجود موج‌های مسی و موج‌های تیز آلومینیومی و حفظ

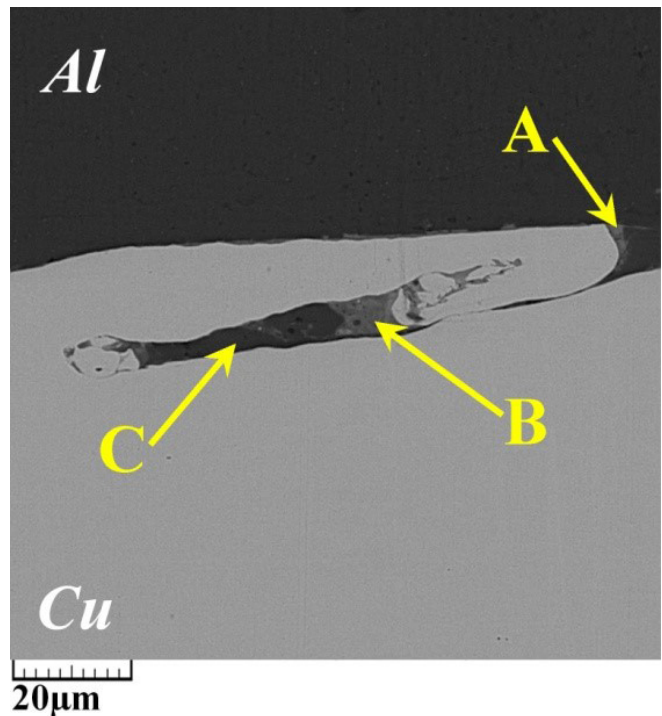


Fig. 16. SEM image of Al-Cu wavy form interface with minimum intermetallic compounds

شکل ۱۶: تصویر SEM از فصل مشترک موجی شکل با حداقل ترکیبات بین فلزی

جدول ۷: نتایج آنالیز EDS مناطق A، B، C مشخص شده در شکل ۱۶
Table 7. EDS analysis from the regions marked with A, B, and C in Figure 16.

	Al (at.%)	Cu (at.%)	ترکیب بین فلزی
A ناحیه	۶۶/۵۱	۳۳/۴۹	Al ₂ Cu
B ناحیه	۶۷/۰۶	۳۲/۹۴	AlCu
C ناحیه	۹۹/۶۳	۰/۳۷	Al

یکپارچه و با استحکام مناسب در فصل مشترک شده است، باعث می‌شود که لوله چهارگوش دولایه آلومینیوم-مس بدون عیوب در ریزساختار فصل مشترک و خواص مکانیکی حاصل گردد. این موضوع توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۹ و ۱۰].

۳-۲- بررسی استحکام برشی

آزمون استحکام برشی بر روی اتصال فصل مشترک لوله‌های مس-آلومینیوم قبل و بعد از فرآیند نورد با در نظر گرفتن حداکثر تنش برشی انجام گرفته است. نتایج حاصل از آزمون استحکام برشی برای نمونه‌ها بعد از فرآیند جوشکاری انفجاری و بعد از فرآیند نورد در آخرین مرحله گذر در شکل ۱۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که استحکام برشی اتصال برای اکثر نمونه‌ها در خلال فرآیند نورد کاهش یافته است. مقادیر تنش برشی برای

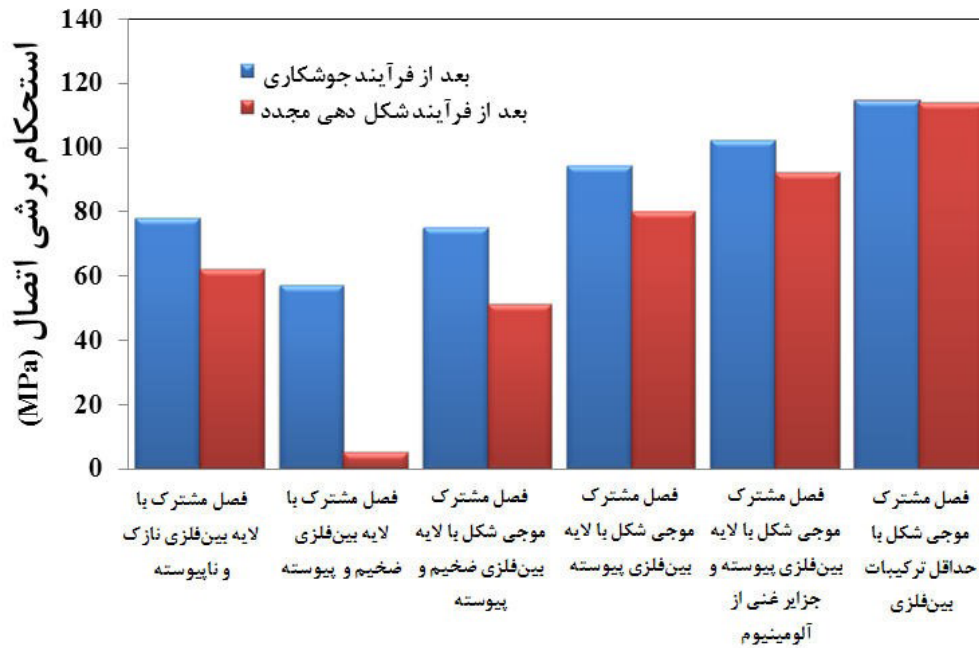


Fig. 17. Shear strength of joints interface before and after shape rolling process.

شکل ۱۷: استحکام برشی فصل مشترک‌های اتصال قبل و بعد از فرآیند نورد

بین فلزی دارند، الگوی موجی شکل در طول فرآیند شکل‌دهی حفظ می‌شود، اما منطقه شامل ترکیبات بین فلزی در خلال فرآیند نورد تحت تأثیر قرار گرفته است. هر چه مقدار این ترکیبات در فصل مشترک بیشتر بوده ریزترک‌ها در فصل مشترک در طول فرآیند شکل‌دهی بیشتر گسترش یافته‌اند.

وجود موج‌های مسی باعث می‌شود تا هر یک از موج‌ها به‌عنوان مانعی عمل کرده و از انتشار ترک در فصل مشترک در طول فرآیند نورد به‌صورت کامل جلوگیری کند. همچنین وجود جزایر غنی از آلومینیوم در لایه بین فلزی یکی دیگر از دلایل عدم انتشار کامل و گسترش ترک‌ها در طول فرآیند نورد در فصل مشترک می‌باشد و انتشار ترک‌ها با رسیدن به این مناطق متوقف شده است.

در نمونه با فصل مشترک موجی شکل و حداقل ترکیبات بین فلزی، مقاومت موج‌های مسی و آلومینیومی به‌گونه‌ای است که دچار آسیب نشود و موج‌ها به‌عنوان سدی در حین اعمال تنش‌های برشی در طول فرآیند نورد، عمل می‌کنند و ترکیبات بین فلزی موجود تأثیر مخربی بر روی فصل مشترک در طول فرآیند نورد نداشته‌اند.

با افزایش لایه بین فلزی در فصل مشترک و از بین رفتن ساختار موجی شکل، افت استحکام برشی در طول فرآیند شکل‌دهی با شدت بیشتری همراه است؛ اما در نمونه با فصل مشترک موجی شکل منظم و حداقل ترکیبات بین فلزی، استحکام برشی اتصال بعد از فرآیند نورد افت قابل‌توجهی نداشته و شکست در لایه آلومینیوم و موازی فصل مشترک می‌باشد. این نتایج نشان

این الگو در طول فرآیند نورد و عدم شکل‌گیری عیوب ساختاری و ترک در فصل مشترک به دلیل کم و ناپیوسته بودن ترکیبات بین فلزی باعث شده تا استحکام برشی در طول فرآیند شکل‌دهی تغییر نکند و استحکام اتصالات بعد از فرآیند شکل‌دهی نیز از فلز ضعیف‌تر (آلومینیوم) بیشتر باشد.

با مقایسه نتایج آزمون برش مشاهده می‌شود که استحکام برشی اتصال با افزایش ضخامت لایه بین فلزی کاهش می‌یابد و افت استحکام برشی در طول فرآیند شکل‌دهی برای اتصالاتی با لایه بین فلزی ضخیم‌تر با شدت بیشتری همراه است. نتایج مشابهی نیز برای استحکام برشی فصل مشترک اتصال بعد از فرآیند نورد میله‌های مس- فولاد که به روش جوش انفجاری به یکدیگر متصل شده‌اند، توسط دایجا و همکاران و در تحقیقی دیگر برای میله‌های آلومینیوم-مس توسط مروز و همکاران گزارش شده است، به طوری که استحکام برشی فصل مشترک بعد از انجام فرآیند نورد بر روی نمونه‌ها کاهش یافته است [۳ و ۶].

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بر اساس مباحث بیان‌شده و نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های فصل مشترک برای حالت‌های مختلف قبل و بعد از فرآیند شکل‌دهی مجدد، نتایج حاصله به‌صورت زیر است:

- میزان پیوستگی لایه ترکیبات بین فلزی و وجود ترک‌های عمودی اولیه که باعث سرعت بخشیدن شروع و انتشار ریزترک‌ها در منطقه فصل مشترک در طول فرآیند شکل‌دهی می‌شوند، از عوامل مؤثر بر روی استحکام اتصال فصل مشترک در طول فرآیند شکل‌دهی می‌باشند.
- در نمونه‌هایی که فصل مشترک موجی شکل به همراه ترکیبات

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(1-4) (2016) 543-548.

- [10] X.-J. Sun, T. Jie, X.-Z. Guo, Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(10) (2011) 2175-2180.
- [11] A. Mamalis, A. Szalay, N. Vaxevanidis, D. Manolakos, Fabrication of bimetallic rods by explosive cladding and warm extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3) (1998) 48-53.
- [12] A. Tajyar, A. Masoumi, Experimental analysis of bonding strength in shape rolling of Al-Cu bimetallic circular pipes into square tubes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(22) (2017) 4087-4098.
- [13] T.C. Chen, J.M. Ye, Finite-element analysis of the double lateral compression of clad tube into a Symmetric Square-Tube, in: *Advanced Materials Research, Trans Tech Publ*, 337(2011), 332-335.
- [14] T.-C. Chen, J.-M. Ye, Finite-Element Analysis of the Lateral Compression of Clad Tube between V-Shaped Dies, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 34(4), (2013), 331-340.
- [15] L.S. Bayoumi, A.S. Attia, Determination of the forming tool load in plastic shaping of a round tube into a square tubular section, *journal of materials processing technology*, 209(4) (2009) 1835-1842.
- [16] K. Abrinia, H. Farahmand, An upper bound analysis for the reshaping of thick tubes with experimental verification, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(2) (2008) 342-358.
- [17] A. Tajyar, K. Abrinia, FEM Simulation and Experimental Investigation of Reshaping of Thick Tubes in different passes, in: *ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, (2009), 577-581.
- [18] A. Loureiro, R. Mendes, J. Ribeiro, R. Leal, I. Galvão, Effect of explosive mixture on quality of explosive welds of copper to aluminium, *Materials & Design*, 95 (2016), 256-267.

می‌دهد که استحکام باند در لوله دولایه بعد از فرآیند نورد همچنان بیشتر از استحکام فلز پایه آلومینیوم است.

منابع

- [1] M. Asemabadi, M. Sedighi, M. Honarpisheh, Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal, *Materials Science and Engineering: A*, 558 (2012), 144-149.
- [2] F. Dehghani, M. Salimi, Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4) (2016) 163-177.
- [3] S. Mróz, P. Szota, H. Dyja, A. Kawalek, Theoretical and experimental analysis of the Cu-Al bimetallic bar rolling process, *Metalurgija-Zagreb*, 50(2) (2011) 85-88.
- [4] S. Mróz, P. Szota, A. Stefanik, S. Wąsek, G. Stradomski, Analysis of Al-Cu bimetallic bars properties after explosive welding and rolling in modified passes, *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(1) (2015) 427-432.
- [5] H. Dyja, S. Mróz, A. Milenin, Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al, *Journal of Materials Processing Technology*, 153 (2004) 100-107.
- [6] H. Dyja, S. Mroz, Z. Stradomski, Properties of joint in the bimetallic rods Cu-Al and Cu-steel after explosive cladding and the process of rolling, *METALURGIJA-SISAK THEN ZAGREB-*, 42(3) (2003) 185-192.
- [7] A. Milenin, S. Berski, G. Banaszek, H. Dyja, Theoretical analysis and optimisation of parameters in extrusion process of explosive clad bimetallic rods, *Journal of materials processing technology*, 157 (2004) 208-212.
- [8] S. Berski, H. Dyja, A. Maranda, J. Nowaczewski, G. Banaszek, Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3) (2006) 582-586.
- [9] X. Guo, H. Wang, Z. Liu, L. Wang, F. Ma, J. Tao, Interface and performance of CLAM steel/aluminum clad tube prepared by explosive bonding method, *The*

Please cite this article using:

A. Tajyar, A. Masoumi, Influence of Interface Morphology on the Bond Strength During the Reshaping Process of Al-Cu Bimetal Pipes, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 467-478.
DOI: 10.22060/mej.2017.12161.5273

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

