مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1394، دوره 15، شماره 5، ص‌ص 350-356

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی اثر عملیات حرارتی و میزان تغییر شکل بر نحوه اتصال فولاد -آلومینیم در فرآیند اتصال چرخشی سرد

سیاوش علی‌بابایی[1]، ابوالفضل معصومی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 11155-4563، amasomi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 دی 1393
پذیرش: 12فروردین1394
ارائه در سایت: 23 فروردین 1394

کلید واژگان:
اتصال چرخشی سرد
عملیات حرارتی
درصد کاهش ضخامت

چکیده

اتصال چرخشی سرد فرآیندی جدید جهت تولید لوله‌های کامپوزیتی لایه‌ای می‌باشد که برمبنای فرآیند فلوفرمینگ ابداع شده است. استحکام اتصال در این فرایند به ضخامت اولیه ورق، مقدار تغییر شکل، دمای اتصال، استحکام ورق‌های اولیه، عملیات حرارتی پس از اتصال و پارامترهای تولید مانند نرخ پیشروی، سرعت دوران اسپیندل بستگی دارد. در کار حاضر بررسی تاثیر میزان کاهش ضخامت، دمای عملیات حرارتی و زمان عملیات حرارتی بر استحکام اتصال چرخشی فولاد و آلومینیم انجام شده است. استحکام اتصال ایجاد شده از طریق فرآیند اتصال چرخشی با استفاده از آزمون پوست‌کنی یا لایه کنی 180درجه اندازه‌گیری و بررسی‌های ساختاری نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است. از بین پارامترهای بررسی شده، دمای عملیات حرارتی و به دنبال آن درصد کاهش ضخامت بیشترین تاثیر را بر روی استحکام اتصال دارند و تاثیر زمان عملیات حرارتی با توجه به محدوده سطوح انتخابی در این مطالعه نسبت به دو عامل دیگر ناچیز است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای عملیات حرارتی تا حد معینی در اثر نفوذ اتم های فلزات در شبکه های یکدیگر منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود، اما افزایش بعد از آن باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. همچنین مطالعات نشان داد که بهترین شرایط 55 درصد کاهش ضخامت، دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه است که در این شرایط استحکام اتصال نمونه به استحکام تسلیم فلز پایه می‌رسد.

Experimental investigation of heat treatment and deformation rate effects on aluminum-steel bonding in cold spin-bonding process

Siyavash Alibabaei, Abolfazl Masoumi*

School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, amasomi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 January 2015
Accepted 01 April 2015
Available Online 12 April 2015

Keywords:
Cold Spin Bonding
Heat treatment
Thickness Reduction Rate Styles

ABSTRACT

Cold spin bonding is a newly invented method for producing layered composite tubes based on flow-forming process. Bonding strength in this process is dependent on parameters such as initial thickness, rate of deformation, bonding temperature, initial strength, heat treatment temperature, duration of heat treatment and also production parameters like feed rate and spindle RPM. In the present work, effect of rate on thickness reduction, heat treatment temperature and duration of heat treatment on bonding strength of steel and aluminum have been studied. The strength of bonding produced by cold spin bonding has been measured by peel test and structure investigation has been done by scanning electron microscopy. Among the parameters, heat treatment temperature and after that thickness reduction rate have the greatest effects on bonding strength while heat treatment duration has less effect by comparison. The results show that the rise of heat treatment temperature up to a certain level increases bonding strength, but above that level the strength will decrease. This study also has shown that the best condition occurs in %50 thickness reduction, heat treatment temperature of 475 degrees and 120 minutes of heat treatment in which bonding strength reaches the yield strength of base metal.

1- مقدمه

فلزات روکش شده که نوع خاصی از مواد کامپوزیتی می‌باشند و با ساختار لایه‌ای آرایش می‌یابند، کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف دارند. در حالی‌که اتصال نوردی، اقتصادی‌ترین و پرکاربردترین روش تولید ورق‌ها بدین شکل می‌باشد [1]، تولید لوله‌های دوفلزی می‌تواند با فرآیندهای اتصال متالوژیکی و یا مکانیکی انجام شود. از فرآیندهای متالوژیکی ساخت لوله‌ها می‌توان به اکستروژن [3,2]، اکستروژن چند شمشی [4]، اتصال انفجاری، اتصال نفوذی [5] و ریخته گری گریز از مرکز [6] اشاره نمود.

بسیاری از این روش‌ها با محدودیت‌های تکنولوژیکی، متالوژیکی و اقتصادی روبرو هستند. برای مثال برای اتصال‌های مکانیکی، توان و نیروی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. Alibabaei, A. Masoumi, Experimental investigation of heat treatment and deformation rate effects on aluminum-steel bonding in cold spin-bonding process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 5, pp. 350-356, 2015 (In Persian)

بسیار بالا و تجهیزات گران قیمت و پیچیده نیاز خواهد بود؛ در حالی‌که روش‌های متالوژیکی باعث ایجاد تنش‌های پسماند در محل اتصال خواهند شد.

اخیراً فرآیندی جدید توسط محبی و اکبرزاده [8،7] به عنوان اتصال چرخشی برمبنای فرآیند فلوفرمینگ پیشنهاد شده است که پتانسیل بالایی برای تولید این لوله‌ها دارد. در کار حاضر لوله‌های دولایه، با لایه‌ی خارجی فولاد و لایه‌ی داخلی آلومینیوم، با استفاده از این فرآیند تولید شده است. استحکام اتصال بین لایه‌ای برای لوله‌های دو لایه بسیار مهم است زیرا این قطعات باید بتوانند بدون شکست، در برابر تنش های وارده در اثر فرآیندهای تکمیلی دیگر همچون برش و شکل دهی و یا تنش های وارده حین کارکرد مقاومت کنند. استحکام اتصال به پارامترهایی از جمله ضخامت اولیه ورق، مقدار تغییر شکل، دمای اتصال، استحکام ورق‌های اولیه، عملیات حرارتی پس از اتصال و پارامترهای تکنولوژیکی مانند نرخ پیشروی، سرعت دوران اسپیندل و غیره بستگی دارد. معمولاً پس از فرآیند اتصال، عملیات حرارتی به‌منظور افزایش استحکام اتصال در اثر نفوذ اتم‌های فلزات در شبکه‌های یکدیگر، کاهش تنش‌های پسماند و افزایش تافنس اتصال انجام می‌شود؛ بدین جهت عملیات حرارتی پس از اتصال یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر کیفیت قطعات اتصال یافته با جوشکاری حالت جامد می‌باشد [10،9]. هنگام اتصال فلزات ناهم‌جنس در دمای بالا، انتخاب دما و زمان عملیات حرارتی بعدی می‌بایست بخاطر احتمال ایجاد فازهای بین فلزی، ذوب یوتکتیکی و تخلخل در اثر نفوذ کرکندال مورد توجه قرار گیرد. رشد لایه‌های بین فلزی بستگی به نفوذ و واکنش شیمیایی عناصر نفوذ کننده دارد. بنابراین ایجاد این لایه‌ها مستلزم دما و زمان است [12،11].

در صورتی که ضخامت لایه‌های بین فلزی کمتر از پنج میکرون باشد، تأثیر چندانی در استحکام اتصال نخواهد داشت؛ اما ضخامت‌های بالاتر از 10 میکرون باعث کاهش محسوس در استحکام اتصال به‌خاطر شکنندگی شدید این فازها خواهد شد[12،11].

رشد لایه‌های بین فلزی بستگی به نفوذ دارد و با توجه به این که نفوذ به عواملی همچون شرایط عملیات حرارتی، دما و زمان بستگی دارد با کنترل این عوامل می‌توان ضخامت لایه‌های بین فلزی را کنترل کرد.در این کار اثر دما و زمان عملیات حرارتی و همچنین میزان تغییر شکل بر کیفیت اتصال چرخشی مورد بررسی قرار گرفت.

علی‌رغم این‌که تحقیقات زیادی در مورد اتصال نوردی و پارامترهای مؤثر بر آن صورت گرفته است، اما فرآیند اتصال چرخشی به عنوان روشی با پتانسیل بالا در تولید لوله‌های دو فلزی، جدیداً طرح شده، و تحقیقاتی بسیار اندک در این مورد انجام گرفته و عوامل مؤثر بر آن هنوز تا حد زیادی ناشناخته‌اند. با توجه به این‌که این فرآیند تنها در مورد Al/Al ، Cu/Al و St/Al انجام شده است، و اثرات درصد کاهش ضخامت، دما، نرخ پیشروی، زاویه‌ی حمله و استحکام و ضخامت لایه‌ی آلومینیوم اولیه در نظر گرفته شده‌اند، این پژوهش به بررسی اثر عملیات حرارتی به همراه درصد کاهش ضخامت بر استحکام و کیفیت اتصال آلومینیوم (به عنوان لایه‌ی داخلی) و فولاد (به عنوان لایه‌ی خارجی) با استفاده از فرآیند اتصال چرخشی اختصاص یافته است.

2- روش پژوهش

در این پژوهش فرآیند اتصال چرخشی فولاد و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی عوامل موثر انتخاب شده بر فرآیند با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش انجام شده است. در انتها استحکام اتصال ایجاد شده از طریق فرآیند اتصال چرخشی با استفاده از آزمون پوست‌کنی یا لایه کنی 180درجه اندازه‌گیری شده و بررسی‌های ساختاری نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

2-1- تجهیزات آزمایش

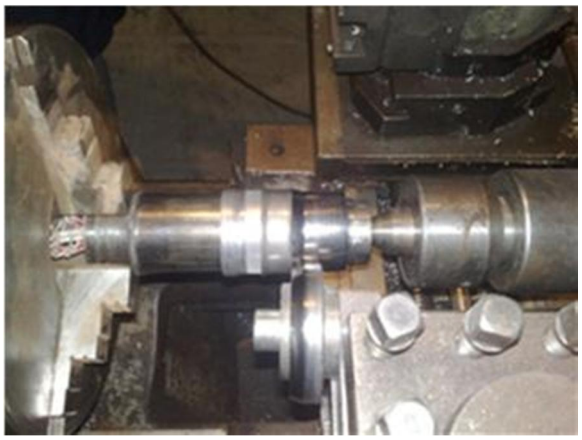
در کار حاضر اتصال چرخشی با استفاده از فرآیند فلوفرمینگ به‌صورت مستقیم و با استفاده از یک غلتک روی دستگاه تراش معمولی، به‌عنوان ماشین فلوفرمینگ، انجام گرفته که در شکل 1 نشان داده شده است.

استوانه‌ای با قطر 51mm و طول 140mm از جنس فولاد ابزار پس از ماشین کاری و عملیات حرارتی سخت کردن سطحی به عنوان مندرل اصلی برای فرآیند اتصال مورد استفاده قرار گرفت این عملیات شامل مراحل مختلف نظیر پیش‌گرم کردن، آستنیته کردن، سرد کردن یا سریع سرد کردن است. هدف از این مراحل بیشتر به دست آوردن میکروساختار مارتنزیت است. با ایجاد یک پله‌ی قلاویز کاری شده در سر مندرل و تهیه مهره مناسب با آن، سیستم نگهدارنده پشتی برای نگه داشتن قطعه کار روی مندرل تعبیه شد. از مندرلی دیگر با قطر خارجی 54mm و طول 140mm از جنس فولاد کربنی نیز برای تولید پریفرم‌های اولیه استفاده شده است.

غلتک مورد استفاده از ماشین‌کاری یک بلبرینگ تهیه شد. انتخاب بلبرینگ از آن جهت است که علاوه بر گردش بدون اصطکاک و بدون لنگی حول محور میانی، از استحکام و سختی بالایی نیز برخوردار است. غلتک مورد استفاده دارای قطر 80mm و شعاع دماغه 1mm بوده و وجهی روی پیشانی آن ماشین‌کاری شد تا بتواند نقش زاویه حمله را بازی کند. پس از آن غلتک روی یک نگهدار به‌طور مناسب مونتاژ شد تا بتواند به‌راحتی توسط سوپرت دستگاه تراش بسته شود. مجموعه نگهدارنده و غلتک با زاویه‌ای روی دستگاه بسته می‌شود که زاویه پشتی مورد نظر ایجاد گردد.

2-2- جنس پریفرم‌ها و نحوه آماده سازی

ترکیبی که برای تحقیق حاضر استفاده شده است ساختار پرکاربرد St/Al می‌باشد. برای ساخت لوله‌های دو جداره‌ی St/Al، از آلومینیوم خالص تجاری 1050 و فولاد St12 استفاده شد. لازم به ذکر است که فولاد به عنوان لایه‌ی خارجی و آلومینیوم به عنوان لایه‌ی داخلی به کار برده شد. این انتخاب به دو جهت انجام شده است. اولاً آن‌که در کاربرد لوله‌های دو جداره معمولاً لازم است که لایه‌ی داخلی پایداری مناسب و لایه‌ی خارجی استحکام بالایی داشته باشد. دلیل دوم این انتخاب در خاصیت عملیات فلوفرمینگ است.



شکل 1 نحوه انجام فرآیند فلوفرمینگ

کرنش در ضخامت قطعه‌ی تحت فلوفرمینگ در سمت غلتک بیشتر می‌باشد. از این توزیع نایکنواخت کرنش برای یکنواخت شدن تغییر شکل ترکیب فولاد و آلومینیوم استفاده شده است. خواص کششی ورق‌های فولاد و آلومینیوم در حالت آنیل در جدول 1 ارائه شده است.

برای تولید لوله‌های دوجداره با جنس‌های گفته شده، نیاز به لوله‌های اولیه با هندسه‌ی مناسب بود. با توجه به عدم وجود این لوله‌ها در بازار، لوله-های اولیه از ورق و به روش اسپینینگ تهیه شدند. مراحل تولید پریفرم‌های اولیه عبارتند از:

- تهیه‌ی ورق از بازار و برش اندازه‌ی مورد نیاز به صورت دستی و توسط ابزار قیچی شکل
- پولک زنی قطعات دایره‌ای شکل با قطر خارجی 95mm و سوراخی به قطر پله سر مندرل (30mm) در مرکز با استفاده از قالب برشی
- اسپینینگ ورق‌های فولادی و آلومینیومی، به قطر داخلی 54mm با استفاده از مندرل فولادی به قطر 54mm و ابزار قلمی شکل برنجی
- اتوکشی ورق‌های اسپینینگ شده به منظور ایجاد ضخامتی یکنواخت در طول لیوان تولید شده
- انجام عملیات فلوفرمینگ روی ورق‌های آلومینیومی برای رسیدن به قطر داخلی 51mm با استفاده از مندرل فولادی به قطر 51mm و غلتک
- انجام عملیات حرارتی آنیل کامل برای قطعات فولادی (در دمای 950 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت با سرد شدن در کوره؛ به منظور جلوگیری از اکسید شدن در کوره‌ی خلاء انجام شد) و آلومینیومی (در دمای 350 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت با سرد شدن در کوره).
- انجام عملیات فلوفرمینگ پایانی با استفاده از مندرل فولادی به قطر 51mm و غلتک

2-3- پارامترهای موثر و سطوح مرتبط

همان‌طور که قبلا ذکر شد، بررسی عوامل موثر انتخاب شده بر فرآیند با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش انجام شده است. بنابراین با در نظر گرفتن مقدار تغییر شکل به عنوان پارامتر اصلی مؤثر بر اتصالات سرد، 3 سطح برای این پارامتر در نظر گرفته شد و با توجه به این‌که اثر زمان بر روی استحکام اتصال کاملا به دمای عملیات حرارتی بستگی دارد، برای دمای عملیات حرارتی 4 سطح و برای زمان عملیات حرارتی 3 سطح در نظر گرفته شد. جدول 2 پارامترها را به همراه سطوح آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول 1 خواص کششی ورق‌های آلومینیومی و فولادی پریفرم‌ها

جنس	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	میزان افزایش طول(%)
آلومینیم خالص تجاری 1050	47/5	92	36
فولاد St12	109	223	39

جدول 2 پارامترهای طراحی آزمایش به همراه سطوح آنها

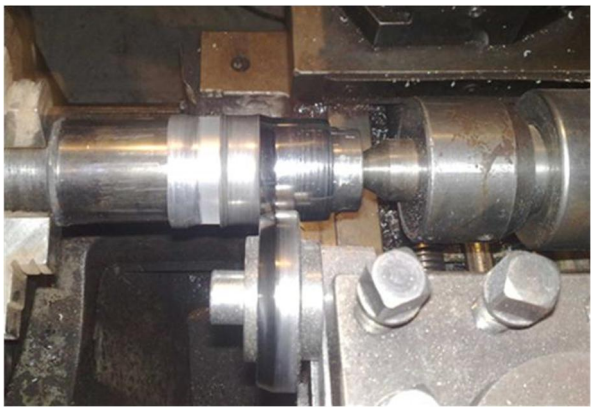
پارامترها	سطوح
درصد کاهش ضخامت (%)	35، 45، 55
دمای عملیات حرارتی (درجه سانتی‌گراد)	0، 450، 500، 550
زمان عملیات حرارتی (دقیقه)	60، 120، 180

2-4- مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام فرآیند اتصال چرخشی بصورت زیر می‌باشد:

- آماده‌سازی پریفرم‌ها
- شستن و خشک کردن پریفرم‌ها
- چربی زدایی سطوح اتصال با استون و خشک شدن در هوا
- برس‌زنی با برس به قطر 52mm با سیم‌های فولاد ضد زنگ به قطر 0/35mm و سرعت دورانی 2800 دور بر دقیقه.
- مونتاژ دو قطعه روی یکدیگر و اتوکشی نهایی
- اعمال کاهش ضخامت مورد نظر با انجام عملیات فلوفرمینگ

پس از آماده‌سازی پریفرم‌ها به روش اسپینینگ و آنیل آن‌ها، سطوح اتصال (سطح خارجی لوله داخلی و سطح داخلی لوله خارجی) مورد عملیات سطحی قرار می‌گیرند. این عملیات شامل شستن و خشک کردن پریفرم‌ها، چربی زدایی سطوح اتصال با استون و خشک کردن آنها در هوا و برس‌زنی می‌باشد. برس‌زنی با برس به قطر 52mm با سیم‌های فولاد ضد زنگ به قطر 0/35mm و سرعت دورانی 2800 دور بر دقیقه انجام شد. لوله‌ها پس از عملیات سطحی روی یکدیگر قرار گرفته و فرآیند فلوفرمینگ به منظور ایجاد اتصال روی آنها اعمال شد. فرآیند اتصال چرخشی با سرعت دورانی اسپیندل 450rpm و نرخ پیشروی 0/08mm/rev انجام شد (شکل 2). انتخاب سرعت اسپیندل از دو جهت مهم است. اول این‌که با افزایش سرعت، هر المان از ماده فاصله‌ی زمانی کمتری را از یک گام (دوران) تا گام بعد، سپری می‌کند. ثانیاً با افزایش سرعت، زمان اعمال فشار بر روی ناحیه‌ی اتصال کاهش می‌یابد. این دو اثر، بصورت مخالف بر استحکام اتصال اثر خواهند گذاشت. از این رو، انتخاب سرعت با استفاده از آزمایش‌های اولیه به صورت بهینه انجام شد. علاوه بر آن، با توجه به تحقیق محبی و اکبرزاده [8]، با کاهش نرخ پیشروی، Rt کاهش و استحکام اتصال افزایش می‌یابد. بهترین مقدار گزارش شده توسط این گروه 0/08 mm/rev است که در این تحقیق هم همین مقدار انتخاب شد. برای انجام عملیات، مندرل در داخل سه نظام محکم شد و قطعات روی آن قرار گرفتند. فلنج قطعات از یک طرف با پیشانی مندرل و از طرف دیگر توسط دستگاه نگهدارنده کلمپ شد. داخل قطعه درونی بطور مناسب با روغن برشی آغشته شد. این کار باعث می‌شود تا قطعه به راحتی پس از عملیات از مندرل جدا شود. پس از تولید لوله‌های فولادی روکش شده با آلومینیوم از هر یک از لوله‌ها دو نمونه در جهت طولی با عرض‌های بین 7/5 تا 8/5mm و طول 40 تا 60mm بریده شد، یکی از نمونه‌ها جهت بررسی کیفیت فرآیند اتصال چرخشی استحکام اتصال ایجاد شده با استفاده از آزمون پوست‌کنی یا لایه



شکل 2 عملیات اتصال چرخشی

کنی 180درجه مطابق با استاندارد ASTM D903-98 انجام و دیگری جهت بررسی‌های ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده قرار گرفت. سپس نمونه‌ها برای انجام عملیات حرارتی در کوره خلا در دما و زمان مد نظر قرار گرفتند.
شکل 3 قطعات نهایی را نشان می‌دهد.

3- نتایج

جهت بررسی کیفیت فرآیند اتصال چرخشی استحکام اتصال ایجاد شده با استفاده از آزمون پوست‌کنی یا لایه کنی 180 درجه مطابق با استاندارد ASTM D903-98 انجام و بررسی‌های ساختاری نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

3-1- استحکام اتصال

روش‌های متعددی برای تعیین استحکام اتصال مواد لایه‌ای وجود دارد. عمده‌ترین این روش‌ها عبارتند از : آزمون برش کششی [13] و آزمون لایه کنی [14]. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری استحکام اتصال از آزمون پوست‌کنی یا لایه کنی 180 درجه مطابق با استاندارد ASTM D903-98 استفاده شده است. نمونه‌ها از جهت طولی با عرض‌های بین 7/5 تا 8/5mm و طول 40 تا 60mm بریده شدند. آزمون‌ها با استفاده از دستگاه کشش STM-50، با سرعت 20mm/min انجام شدند. شکل 4 نحوه‌ی انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.

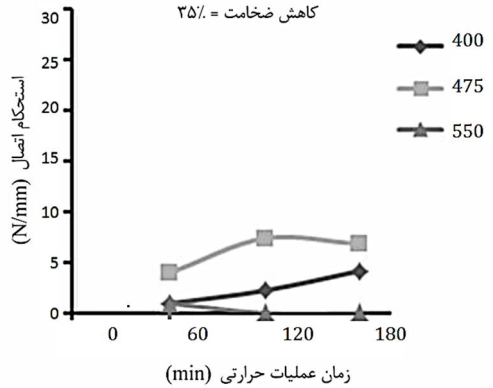
در آزمون لایه‌کنی مقدار استحکام متوسط پوست‌کنی، مطابق یک ناحیه‌ی حالت پایا انتخاب شده و از داده‌های مربوط به این قسمت میانگین

شکل 3 قطعات نهایی

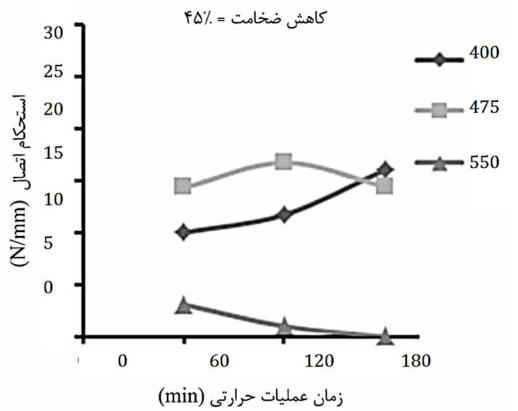
شکل 4 نحوه‌ی انجام آزمایش پوست کنی 180 درجه

گرفته می‌شود تا بار متوسط بدست آید. پس از آن با تقسیم این مقدار بر عرض نمونه، استحکام اتصال گزارش محاسبه می‌گردد.

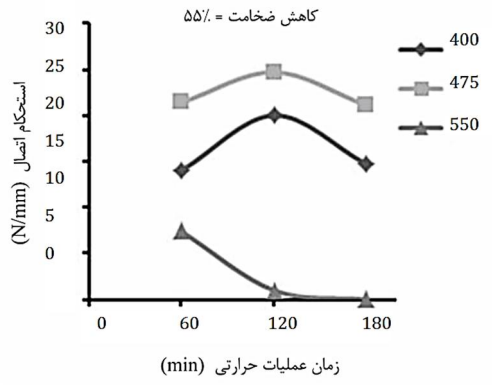
نمودارهای شکل‌های 5، 6 و 7 اثر درصد کاهش ضخامت، دما و زمان عملیات حرارتی بر استحکام اتصال (استحکام لایه‌کنی متوسط) لوله‌های فولادی روکش شده با آلومینیوم با استفاده از فرآیند اتصال چرخشی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که نتایج نمودارهای برازش شده تنها برای درون‌یابی مناسب خواهد بود و برای برون‌یابی ترجیحاً باید از نمودار گذرنده از خود داده‌ها استفاده شود. این مورد به دلیل آن است که در مقادیر انتهایی پایین و انتهایی بالای درصد کاهش ضخامت، ممکن است تمایل نمودار تغییر کند. البته تغییرات انتهایی بیشتر به دلیل شکست فلز زمینه و تغییرات ابتدایی به علت نزدیک بودن به مقدار آستانه‌ی تغییر شکل می‌باشد.



شکل 5 اثر زمان و دمای عملیات حرارتی بر استحکام اتصال در نسبت کاهش ضخامت 35%



شکل 6 اثر زمان و دمای عملیات حرارتی بر استحکام اتصال در نسبت کاهش ضخامت 45%



شکل 7 اثر زمان و دمای عملیات حرارتی بر استحکام اتصال در نسبت کاهش ضخامت 55%

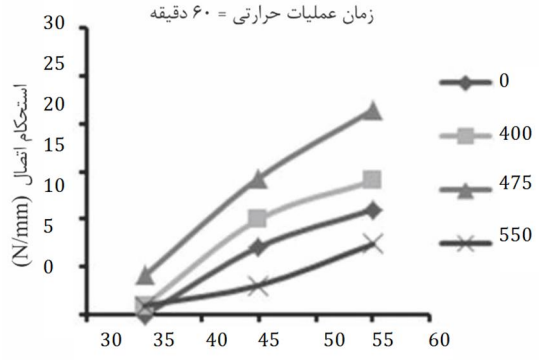
همان‌طور که در شکل‌های 5، 6 و 7 مشاهده می‌شود، مقادیر استحکام اتصال بعد از آستانه به سرعت افزایش می‌یابد. ضمن آن‌که میزان اختلاف بین مقادیر استحکام اتصال، در دماهای مختلف با افزایش درصد کاهش ضخامت افزایش می‌یابد یا به عبارتی تأثیر دمای عملیات حرارتی در تغییر شکل‌های بالا زیاد می‌شود. با مقایسه استحکام اتصال نمونه‌هایی که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند می‌توان دریافت که استحکام اتصال با انجام عملیات حرارتی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان افزایش یافته است. با افزایش دمای عملیات حرارتی تا 475 درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان عملیات حرارتی تا 120 دقیقه ابتدا استحکام اتصال افزایش و پس از آن کاهش یافته است. سرانجام استحکام اتصال در دمای عملیات حرارتی 550 درجه سانتی‌گراد به شدت کاهش یافته است که این کاهش نتیجه تشکیل ترکیب بین فلزی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین شرایط 55 درصد کاهش ضخامت، دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه است که در این شرایط استحکام اتصال نمونه به استحکام تسلیم فلز پایه می‌رسد.

جهت بررسی اثر عملیات حرارتی بر استحکام اتصال نیروی لایه کنی بر حسب نسبت کاهش ضخامت در درجه حرارت‌های مختلف در شکل 8 رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش درجه حرارت عملیات حرارتی بعد از فرآیند تا 475 استحکام اتصال را افزایش، ولی افزایش بیش از آن منجر به کاهش استحکام اتصال شده است.

3-2- بررسی ساختاری

برای بررسی سطح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. این کار بدین صورت انجام شد که نمونه‌ها 2 تا 3 دقیقه قبل از قرار گرفتن در محفظه‌ی خلاء، پوست‌کنی و به ابعاد مناسب بریده شدند. این کار به خاطر عدم تشکیل لایه‌ی ضخیم اکسیدی بر سطح شکست انجام شد. علاوه برآن برای بررسی وجود فازهای بین فلزی، با توجه به عدم کارکرد مناسب دستگاه و پایین بودن کیفیت عکس‌های گرفته شده، این کار با میکروسکوپ الکترونی نوری انجام شد.

علاوه بر بررسی سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی روبشی، مقطع طولی نمونه‌های اتصال یافته نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. آماده سازی نمونه‌ها شامل سمباده‌زنی و پولیش می‌باشد.جهت بررسی تشکیل فاز بین فلزی در نمونه‌ها از اچ شیمیایی استفاده شد.محلول 5 گرم اسید پیکریک در 100 میلی لیتر اتانول به عنوان اچ مورد استفاده قرار گرفت. پس از قرار دادن نمونه‌ها به مدت 15 دقیقه در معرض محلول فوق،



شکل 8 مقایسه استحکام اتصال نمونه بدون عملیات حرارتی با نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف و زمان 60 دقیقه

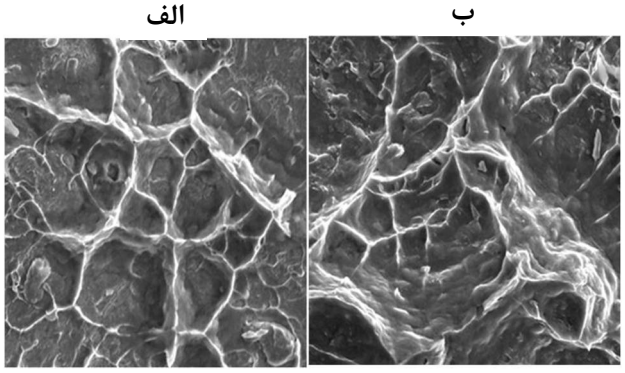
تیره شدن فاز (در صورت وجود) موجب تباین فازی در آنها می‌شود.

شکل‌های 9 الی 12 تصاویر سطوح لایه‌کنی شده را برای فولاد و آلومینیوم در شرایط مختلف اتصال چرخشی نشان می‌دهند. توجه به این نکته ضروری است که عکس‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و از منطقه‌ی حالت پایا گرفته شده است. شکل10سطوح لایه‌کنی شده آلومینیوم و فولاد را با کاهش ضخامت 55% و بدون انجام عملیات حرارتی و با بزرگنمایی 3000 برابر نشان می‌دهد.

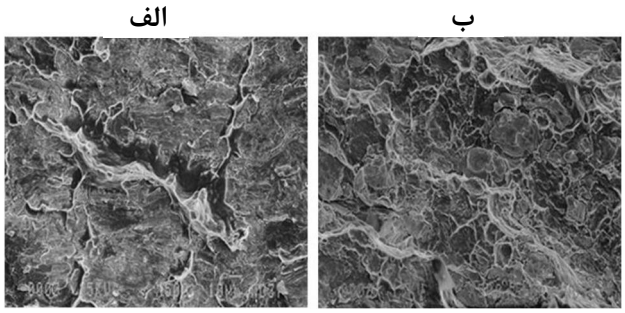
در فولاد (تصویر a) به‌طور واضح نواحی ترک خورده‌ی لایه‌ی سخت شده و در قسمت میانی آن، سطح شکست ماده‌ی خام، مشاهده می‌شود، در صورتی که برای آلومینیوم (تصویر b)، چنین ترک‌هایی مشاهده نمی‌شود. پدیده مشابه توسط سمندری و همکاران نیز گزارش شده است[15]. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که سطح شکست یا به عبارتی سطح اتصال ماده‌ی خام (و در فولاد، نواحی ترک خورده) بصورتی شاخه‌ای وجود دارند. این شاخه‌ها را می‌توان براساس عرض، به گروه‌هایی تقسیم‌بندی کرد. شاخه‌های اصلی، شاخه‌های متوسط و شاخه‌های ریزِ فرعی.

شکل 10 سطوح لایه‌کنی شده آلومینیوم و فولاد را با کاهش ضخامت 55%، دمای عملیات حرارتی 400 درجه سانتی‌گراد، زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه و با بزرگنمایی 500 برابر نشان می‌دهد.

مقدار عنصر انتقال یافته در عنصر دیگر در اثر نفوذ درهم اتم‌های فلزات در شبکه‌های یکدیگر، تابعی از سطح اتصال دو فلز و نرخ انتقال جرم است بر همین اساس با افزایش تغییر شکل و نواحی اتصال اثر نرخ انتقال جرم که خود تابعی از زمان و دمای عملیات حرارتی است بر تعداد اتم‌های نفوذ و استحکام اتصال بیشتر می‌شود. مشاهده می‌شود که در دمای عملیات حرارتی



شکل 9 ترک‌های ایجاد شده در سطوح لایه‌کنی برای فولاد(الف)، آلومینیوم(ب)
(کاهش ضخامت 55%)

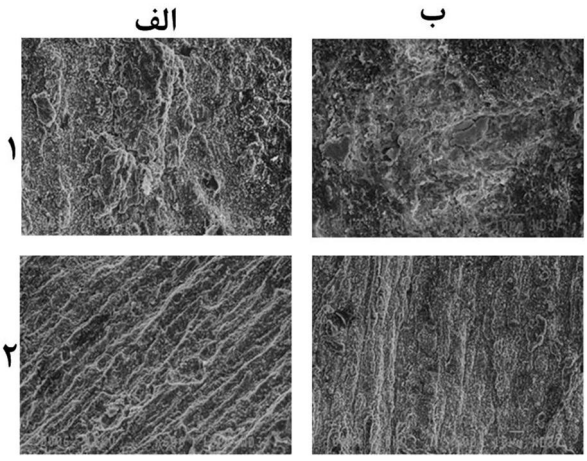


شکل 10 سطوح لایه‌کنی شده برای فولاد (الف) و آلومینیوم(ب) (کاهش ضخامت 55%، دمای عملیات حرارتی 400 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه)

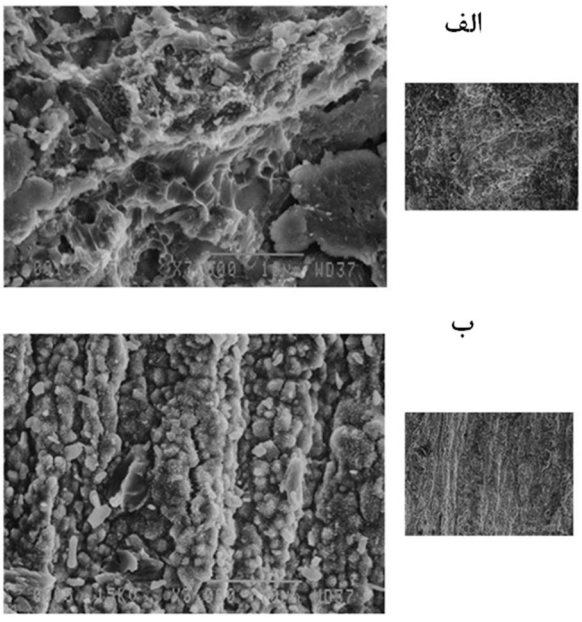
400 درجه سانتی‌گراد به استثنای یک نمونه، ترکیب بین فلزی تشکیل نشده است.

شکل11سطوح لایه‌کنی شده آلومینیوم و فولاد را با کاهش ضخامت 55% و زمان عملیات حرارتی 180 دقیقه در دمای عملیات حرارتی 475 و 550 درجه سانتی‌گراد و با بزرگنمایی 600 برابر نشان می‌دهد.

بررسی سطح شکست فولاد روکش شده با آلومینیوم توسط فرآیند اتصال چرخشی سرد، نشان می‌دهد که در دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی‌گراد ترکیب بین فلزی چندانی تشکیل نشده است. اندازه‌گیری ضخامت این لایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی این مساله را تائید می‌کند. با توجه به اینکه ضخامت این لایه کمتر از 5 میکرون است تاثیر چندانی بر استحکام اتصال نداشته است. این بررسی همچنین نشان می‌دهد که در دمای عملیات حرارتی 550 درجه سانتی‌گراد ترکیب بین فلزی تشکیل شده است و با توجه به اینکه ضخامت این لایه بیشتر از 10 میکرون بوده است استحکام اتصال به شدت کاهش یافته است. سطح شکست با بزرگنمایی 3300 برابر در شکل 12 نشان داده شده است.



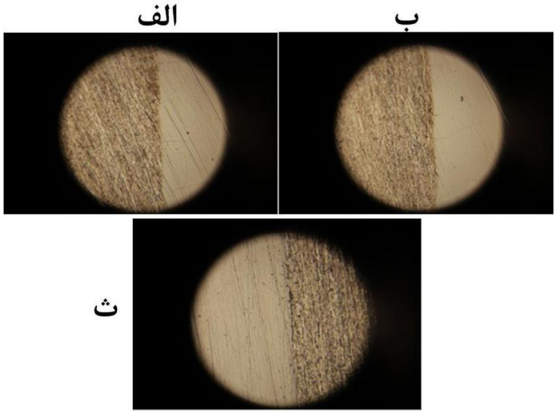
شکل 11 سطوح لایه‌کنی شده فولاد(الف1، الف2) و آلومینیوم(ب1، ب2). (کاهش ضخامت 55%، زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه و دمای عملیات حرارتی 475(الف1، ب1) و 550 (الف2، ب2) درجه سانتی‌گراد).



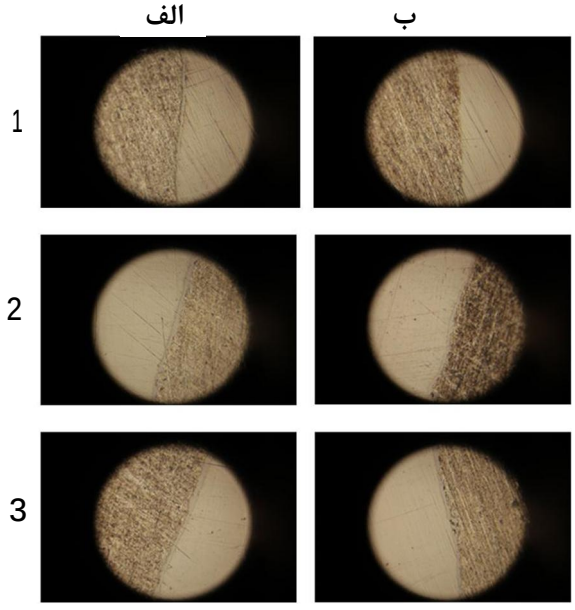
شکل 12 سطح شکست فولاد وآلومینیوم در دمای عملیات حرارتی 475 (الف) و 550 (ب) درجه سانتی‌گراد

در شکل‌های 13 الی 15 میزان ترکیب بین فلزی برای فولاد و آلومینیوم در شرایط مختلف اتصال چرخشی نشان داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که عکس‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 500 برابر و از منطقه‌ی حالت پایا گرفته شده است. در شکل 13 مشاهده می‌شود که در دمای عملیات حرارتی 400 درجه سانتی‌گراد به استثنای یک نمونه، ترکیب بین فلزی تشکیل نشده است. بر همین اساس می‌توان ادعا نمود که با افزایش درصد کاهش ضخامت و زمان عملیات حرارتی نفوذ اتم-های فلزات به شبکه‌های یکدیگر بیشتر شده، در نتیجه استحکام اتصال افزایش یافته است. در نمونه‌ای که ترکیب بین فلزی تشکیل شده است، با توجه به اینکه ضخامت این لایه کمتر از 5 میکرون است استحکام اتصال اندکی کاهش داشته است.

شکل 14 نشان می‌دهد که در دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی-گراد و زمان 120 دقیقه ترکیب بین فلزی ناچیزی تشکیل شده است.



شکل 13 میزان ترکیب بین فلزی برای فولاد و آلومینیوم (کاهش ضخامت 55%، دمای عملیات حرارتی 400 درجه سانتی‌گراد، زمان عملیات حرارتی 60(الف)، 120(ب) و 180(ث) دقیقه).



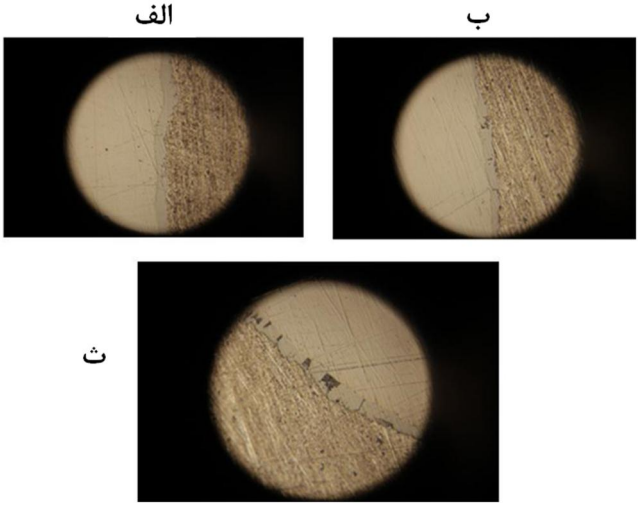
شکل 14 میزان ترکیب بین فلزی برای فولاد و آلومینیوم (کاهش ضخامت 35% (الف1، ب1)، 45% (الف2، ب2) و 55% (الف3، ب3)، دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 120 (الف1، الف2 و الف3) و 180 (ب1، ب2 و ب3) دقیقه).

با توجه به اینکه ضخامت این لایه از صفر تا 3 میکرون است، استحکام اتصال کاهش نداشته است. با افزایش زمان عملیات حرارتی به 180 دقیقه ضخامت این لایه نیز افزایش داشته است بطوری که استحکام اتصال اندکی کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد کاهش ضخامت، میزان نفوذ و ضخامت ترکیب بین فلزی در همان شرایط افزایش یافته است و با توجه به اینکه میزان نفوذ به دمای عملیات حرارتی بستگی دارد، می‌توان گفت که با افزایش درصد کاهش ضخامت، تاثیر دمای عملیات حرارتی بیشتر می‌شود. همانطور که در شکل 15 مشاهده می‌شود، در دمای عملیات حرارتی 550 درجه سانتی‌گراد، ترکیب بین فلزی نسبتاً ضخیمی تشکیل شده است و ضخامت این لایه با افزایش درصد کاهش ضخامت بیشتر شده است. بر همین اساس می‌توان گفت همانطور که نتایج استحکام اتصال نمونه‌ها نشان می‌دهد، با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی ضخامت ترکیب بین فلزی بیشتر شده،استحکام اتصال به شدت کاهش یافته است.

4- جمع بندی و نتیجه گیری

تحلیل نتایج حاصل از بررسی پارامترهای مورد مطالعه قرار گرفته بر روی استحکام اتصال و بررسی‌های ساختاری صورت گرفته را می‌توان در قالب محورهای زیر به عنوان جمع بندی پژوهش حاضر ارائه نمود.

- استحکام اتصال نمونه‌های عملیات حرارتی شده در مقایسه با نمونه-های بدون عملیات حرارتی، با افزایش زمان عملیات حرارتی تا حدی معین (120 دقیقه در دمای 475 درجه سانتی‌گراد به عنوان نمونه) به دلیل نفوذ درهم اتم‌های فلزات در شبکه‌های یکدیگر افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر زمان، تشکیل ترکیب بین فلزی اثر نفوذ درهم اتم-های فلزات در شبکه‌های یکدیگر را خنثی نموده و استحکام اتصال کاهش می‌یابد.
- دمای عملیات حرارتی و به دنبال آن درصد کاهش ضخامت بیشترین تاثیر را بر روی استحکام اتصال دارند و تاثیر زمان عملیات حرارتی با توجه به محدوده سطوح انتخابی در این مطالعه نسبت به دو عامل دیگر ناچیز بوده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین شرایط 55 درصد کاهش ضخامت، دمای عملیات حرارتی 475 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 120 دقیقه است که در این شرایط استحکام اتصال نمونه به استحکام تسلیم فلز پایه می‌رسد.
- افزایش دمای عملیات حرارتی باعث افزایش استحکام اتصال می شود، اما این روند تا حد معینی (500 درجه سانتی‌گراد در خصوص مواد این پژوهش) تداوم دارد و افزایش درجه حرارت عملیات بیش از آن به دلیل تشکیل ترکیب بین فلزی تاثیر معکوس داشته و منجر به کاهش استحکام خواهد شد. همچنین اثر زمان بر روی استحکام اتصال کاملا به دمای عملیات بستگی دارد.
- میزان اختلاف بین مقادیر استحکام اتصال، در دماهای مختلف با افزایش درصد کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر تأثیر دمای عملیات حرارتی در تغییر شکل‌های بالا زیاد می‌شود. در تغییر شکل کم ، مواد خام اندکی در نواحی اتصال در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، اما با افزایش درصد کاهش ضخامت، مواد بیشتری در تماس با یکدیگر قرار گرفته و افزایش نفوذ درهم اتم‌های فلزات در شبکه‌های یکدیگر که تابعی از سطح اتصال دو فلز و نرخ انتقال جرم است، منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود.



شکل 15 میزان ترکیب بین فلزی برای فولاد و آلومینیوم (درصد کاهش ضخامت 35%(الف)، 45%(ب) و 55%(ث)، دمای عملیات حرارتی 550 درجه سانتی‌گراد و زمان عملیات حرارتی 180 دقیقه).

5- مراجع

[1] J.A., Forster, S. Jha, and A. Amatruda, The Processing and Evaluation of Clad Metals. *Jom-Journal of the Minerals Metals & Materials Society,* Vol. 45, No. 6, pp. 35-38, 1993.

[2] A. Khosravifard, and R. Ebrahimi, Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process. Materials & Design, 2010. 31(1): pp. 493-499.

[3] N.R. Chitkara, and A. Aleem, Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalised slab method of analysis, *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 43, No. 12, pp. 2857-2882, 2001.

[4] Z. Chen, et al., Fabrication of composite pipes by multi-billet extrusion technique, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 137, No. 1–3, pp. 10-16, 2003.

[5] K. Bhanumurthy, , Development of tubular transition joints of aluminium/stainless steel by deformation diffusion bonding, *Materials Science and Technology,* Vol. 22, No. 3, pp. 321-330, 2006.

[6] D.L. Sponseller, G.A. Timmons, and W.T. Bakker, Development of clad boiler tubes extruded from bimetallic centrifugal castings. *Journal of Materials Engineering and Performance,* Vol. 7, No. 2, pp. 227-238, 1998.

[7] M.S. Mohebbi, and A. Akbarzadeh, Fabrication of copper/aluminum composite tubes by spin-bonding process: experiments and modeling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 54, No. 9-12, pp. 1043-1055, 2011.

[8] M.S. Mohebbi, and A. Akbarzadeh, A novel spin-bonding process for manufacturing multilayered clad tubes. *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 210, No. 3, pp. 510-517., 2010.

[9] L. Li, , K. Nagai, and F.X. Yin, Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials,* Vol. 9, No. 2, Article ID 023001, 2008.

[10] M.,Movahedi, A.H. Kokabi, and S.M.S. Reihani, Investigation on the bond strength of Al-1100/St-12 roll bonded sheets, optimization and characterization. *Materials & Design,* Vol. 32, No. 6, pp. 3143-3149, 2011.

[11] H.D. Manesh, and A.K. Taheri, Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet. *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 361, No. 1-2, pp. 138-143, 2003.

[12] V. Jindal, and V.C. Srivastava, Growth of intermetallic layer at roll bonded IF-steel/aluminum interface. *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 195, No. 1-3, pp. 88-93, 2008.

[13] M. Buchner, et al., Development of aluminium-clad steel sheet by roll-bonding for the automotive industry. *Proceedings of AIP Conference,* pp. 264-268, 2007.

[14] M. Buchner, et al., Investigation of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets. *International Journal of Material Forming,* Vol. 1, No. 1, pp. 1279-1282, 2008.

[15] M. M. Samandari et al., Production of Bilayer Al/St Tubes by Cold Spin Bonding and Investigation of Different Parameters on Bonding Strength of Layers. *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 15, pp. 111-118, 2014. (In Persian)