مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15، ص‌ص 111-118

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# تولید لوله‌های دولایه فولاد/آلومینیوم با استفاده از اتصال چرخشی سرد و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر استحکام اتصال لایه‌ها

محمدمهدی سمندری[1]، کارن ابری نیا[2*]، عباس اکبر زاده[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی 14395-515، cabrinia@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 شهریور 1393
پذیرش: 29 شهریور 1393
ارائه در سایت: 28 مهر 1393

*کلید واژگان:*
اتصال چرخشی
استحکام اتصال
پوست‌کنی
فلوفرمینگ

**چکیده**

اتصال چرخشی یکی از روش‌های تولید لوله‌های دولایه، بر مبنای فرآیند فلوفرمینگ، است. این روش جدید دارای پتانسیل بالایی در تولید لوله‌های دو فلزی جدار نازک و بدون درز است. با استفاده از این روش، آلومینیوم (به عنوان لایه‌ی داخلی یا لایه‌ی روکش)، و فولاد (به عنوان لایه‌ی خارجی)، با موفقیت اتصال داده شد و لوله‌های کامپوزیتی لایه‌ای تولید شدند. به عنوان پارامترهای مهم برای ایجاد یک اتصال مناسب، اثر پارامترهای درصد کاهش ضخامت کل، ضخامت و استحکام آلومینیوم اولیه، بر استحکام اتصال بررسی شد. استحکام اتصال با استفاده از آزمون پوست‌کنی اندازه‌گیری و سطوح پوست‌کنی شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی و بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که درصد کاهش ضخامت تأثیر زیادی بر استحکام و کیفیت اتصال ایجاد شده دارد. با افزایش درصد کاهش ضخامت پس از آستانه‌ی تغییر شکل (حدود 35%)، استحکام اتصال به سرعت افزایش می‌یابد تا به استحکام فلز ضعیف‌تر می‌رسد و نمونه‌ها در آزمون پوست‌کنی از فلز زمینه می‌شکنند. با نزدیک شدن استحکام دو فلز و کاهش ضخامت اولیه‌ی لایه‌ی روکش، به همراه تغییر شکل بیشتر، استحکام اتصال را افزایش می‌دهند. تصاویر سطح شکست، نشان از افزایش کسر سطحی نواحی اتصال، با بیشتر شدن تغییر شکل، نزدیک شدن استحکام دو فلز و کاهش ضخامت اولیه‌ی لایه‌ی روکش دارند. به علاوه، الگوی پراکندگی و شکل نواحی شکست، با افزایش تغییر شکل، از رگه‌های نامنظم به نواحی تقریباً مستقیم در امتداد طولی تغییر می‌یابد.

# Production of Bilayer Al/St Tubes by Cold Spin Bonding and Investigation of Different Parameters on Bonding Strength of Layers

Mohammad Mahdi Samandari[1], Karen Abrinia[1*], Abbas Akbarzadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Department of Materials Science & Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran, cabrinia@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 August 2014
Accepted 20 September 2014
Available Online 20 October 2014

*Keywords:*
Spin-Bonding
Bonding Strength
Peeling
Flow-Forming

ABSTRACT

Spin-bonding is a method for fabrication of bilayer tubes based on flow-forming process. This new method is a process with high potential in production of seamless thin-walled tubes. Utilizing this process, aluminum tube (as the inner layer or clad layer) has been bonded into steel tube (as the outer layer) to fabricate tubular laminate composites. As important parameters for creating a suitable bond, effects of thickness reduction, initial aluminum thickness and strength on bonding strength were investigated. The bond strength was evaluated by peel test and the peeled surfaces were examined using scanning electron microscopy (SEM). Results indicated that thickness reduction has great influence on strength and quality of the bond. After a threshold reduction (about 35%) the bond strength increases rapidly with the amount of deformation until it approaches the weaker metal strength, and samples fracture from the base metal in the peel test. Approaching the strength of the two metals and decreasing the initial thickness of the clad layer, with a high amount of deformation increased the bonding strength. Fracture surface images showed that the surface fraction of bonding area was increased when deformation increased. It was also increased with the reduction of the initial thickness of the clad layer and when the strength of the two layers approached each other. Additionally, distribution and shape of the fracture area changed from a disordered fibril structure to an approximately straight area, with an increase in the deformation.

## 1- مقدمه

فلزات روکش شده[1] جزو کامپوزیت‌های فلزی لایه‌ای[2] می‌باشند که در شکل‌های مختلف و با فرآیندهای گوناگون ساخته می‌شوند[1]. با پیشرفت صنایع مدرن استفاده از این ساختارهای کامپوزیتی، به دلیل خواص ترکیبی آن‌ها، روز به روز

1- Clad metals

2- Layered metallic composite material

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M.M. Samandari, K. Abrinia, A. Akbarzadeh, 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, 2015 (In Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]

افزایش می‌یابد[2, 3]. اتصال نوردی[1] رایج‌ترین فرآیند تولید این کامپوزیت‌ها در شکل صفحه‌ای است که می‌تواند به صورت نورد غیر متقارن[2] (اتصال نوردی برشی[3]) یا نورد عادی[4] انجام شود[4-6]. ساختارهای فولادی روکش شده با آلومینیوم، ترکیب خواص مقاومت در برابر خوردگی و هدایت حرارتی و الکتریکی بالای آلومینیوم را با استحکام بالا و هزینه‌ی پایین فولاد ممکن می‌سازند[8,7]. تا کنون تحقیقات زیادی روی اثر پارامترهای مختلف بر استحکام و کیفیت اتصال نوردی ورق‌های فولاد/آلومینیوم انجام شده است؛ اثر درصد کاهش ضخامت [10,9]، دمای انجام فرآیند و عملیات حرارتی بعد از اتصال [12,11] و نوع آماده‌سازی سطوح [13] از این جمله‌اند. علاوه بر آن تحقیقاتی نیز در مورد توضیح مکانیزم این اتصال انجام شده است[14, 15].

استفاده از لوله‌های دو جداره به منظور مقاومت در برابر خوردگی در سطح داخلی و استحکام و کم هزینه بودن فلز سطح خارجی مورد توجه قرار گرفته است. در بسیاری از موارد سطح داخلی و خارجی لوله‌ها در معرض محیط‌های متفاوتی قرار داشته و بنابراین نیاز به خواص متفاوتی دارند. تولید لوله‌های دو فلزی، می‌تواند با فرآیندهای اتصال متالوژیکی و یا مکانیکی انجام شود. از فرآیندهای متالوژیکی ساخت لوله‌ها می‌توان به اکستروژن[5][17,16]، اکستروژن چند شمشی[6][18]، اتصال انفجاری[7][19]، اتصال نفوذی[8][20] و ریخته‌گری گریز از مرکز[9][21] اشاره کرد. فرآیندهای اتصال مکانیکی شامل روش انطباق هیدرولیکی حرارتی[10] و انبساط هیدرولیکی[11] می‌شود[22]. بسیاری از این روش‌ها با محدودیت‌های تکنولوژیکی، متالوژیکی و اقتصادی روبرو هستند. برای مثال برای اتصال‌های مکانیکی، توان و نیروی بسیار بالا و تجهیزات گران قیمت و پیچیده نیاز خواهد بود؛ درحالی‌که روش‌های متالوژیکی باعث ایجاد تنش‌های پسماند در محل اتصال خواهند شد. این تنش‌ها در صورتی که با عملیات حرارتی حذف شوند، احتمال ایجاد فازهای بین فلزی ترد را بالا می‌برند؛ اما در صورت حذف نشدن منجر به ایجاد ترک ناشی از خوردگی تنشی[12] می‌شوند[22]. از محدودیت‌های تکنولوژیکی می‌توان به عدم توانایی ساخت لوله‌های جدار نازک با فرآیند اکستروژن و اتصال انفجاری اشاره کرد[23]. بنابراین چالش‌هایی برای یافتن روشی مناسب برای تولید لوله‌های دوجداره هنوز وجود دارد. به همین دلیل هر روزه فرآیندهایی جدید برای تولید این ساختارها معرفی می‌شوند. فرآیندهای سایش ساچمه[13][24] و چرخش لوله با فشار بالا[14][11]، روش‌هایی جدید برای تولید این لوله‌ها هستند.

اخیراً فرآیندی جدید توسط محبی و اکبرزاده [3, 23] به عنوان اتصال چرخشی[15] بر مبنای فرآیند فلوفرمینگ پیشنهاد شده است که پتانسیل بالایی برای تولید این لوله‌ها دارد. این محققان اثر بعضی پارامترها را بر اتصال چرخشی آلومینیوم/آلومینیوم [23] و آلومینیوم/مس [3] بررسی و مختصراً مکانیزمی برای ایجاد اتصال ارائه کردند اما بسیاری از جنبه‌های این فرآیند هنوز ناشناخته مانده است. اثر بسیاری از پارامترها، رفتار مواد دیگر تحت این عملیات و زوایای بسیار دیگری از این فرآیند می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد. در این کار پس از تولید پریفرم[16]های آلومینیومی و فولادی، چربی زدایی و برس زنی سطوح اتصال، لوله‌های دو فلزی فولاد/آلومینیوم با فرآیند اتصال چرخشی تولید شد. به علاوه، با استفاده از طراحی آزمایش، اثر میزان تغییر شکل، ضخامت و استحکام اولیه‌ی لایه‌ی روکش(آلومینیوم) بر استحکام اتصال بررسی شده است.

## 2- مواد و روش‌ها

ترکیبی که برای تحقیق حاضر استفاده شده است ساختار پرکاربرد فولاد/آلومینیوم می‌باشد. برای ساخت لوله‌های دو جداره‌ی فولاد/آلومینیوم، از آلومینیوم خالص تجاری 1050در سه سطح کارسرد[17] مختلف و فولاد ساده کربنی آنیل شده، با خواصی که در جدول 1 نشان داده شده است، 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؛ اول 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؛ طبق تحقیقات انجام شده، کرنش در ضخامت قطعه‌ی تحت فلوفرمینگ در سمت غلتک بیشتر است[25]. از این توزیع نایکنواخت کرنش برای یکنواخت شدن تغییر شکل ترکیب فولاد و آلومینیوم استفاده شده است.

به عنوان پارامترهای مهم برای ایجاد یک اتصال مناسب، اثر پارامترهای درصد کاهش ضخامت کل، ضخامت و استحکام آلومینیوم اولیه، بر استحکام اتصال بررسی شد. با در نظر گرفتن درصد کاهش ضخامت کل به عنوان پارامتر اصلی مؤثر بر اتصالات سرد، 5 سطح برای این پارامتر و برای هر کدام از دو عامل دیگر سه سطح در نظر گرفته شد. جدول 2 پارامترها را به همراه سطوح آن‌ها نشان می‌دهد (فولاد در حالت آنیل و با ضخامت 1 میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت).

انجام فرآیند اتصال چرخشی شامل مراحل زیر است:

(1) ساخت پریفرم‌ها؛ برای تولید لوله‌های دوجداره فولاد/آلومینیوم نیاز به لوله‌های اولیه با هندسه‌ی مناسب و مقدار درصد کار سرد بیان شده بود. پریفرم‌ها با استفاده از اسپینینگ ورق تولید شدند و کارسرد مورد نظر با استفاده از فلوفرمینگ و عملیات حرارتی میانی اعمال شد. قطر داخلی لوله‌ی آلومینیومی (لوله‌ی داخلی) برابر قطر مندرل[18] (51/8 میلیمتر) و قطر داخلی لوله فولادی برابر قطر خارجی لوله آلومینیومی ساخته شد.

**جدول 1** خواص کششی فولاد و آلومینیوم اولیه

| جنس | کارسرد (%) | خواص | | |
|---|---|---|---|---|
| | | استحکام تسلیم(MPa) | استحکام کششی(MPa) | درصد افزایش طول |
| آلومینیوم 1050 | صفر(*) | 47/5 | 92 | 36 |
| آلومینیوم 1050 | 17 | 86/2 | 105/6 | 14 |
| آلومینیوم 1050 | 37/5 | 111/7 | 124 | 9 |
| فولاد St12 | صفر(*) | 109 | 223 | 39 |

(*) آنیل شده

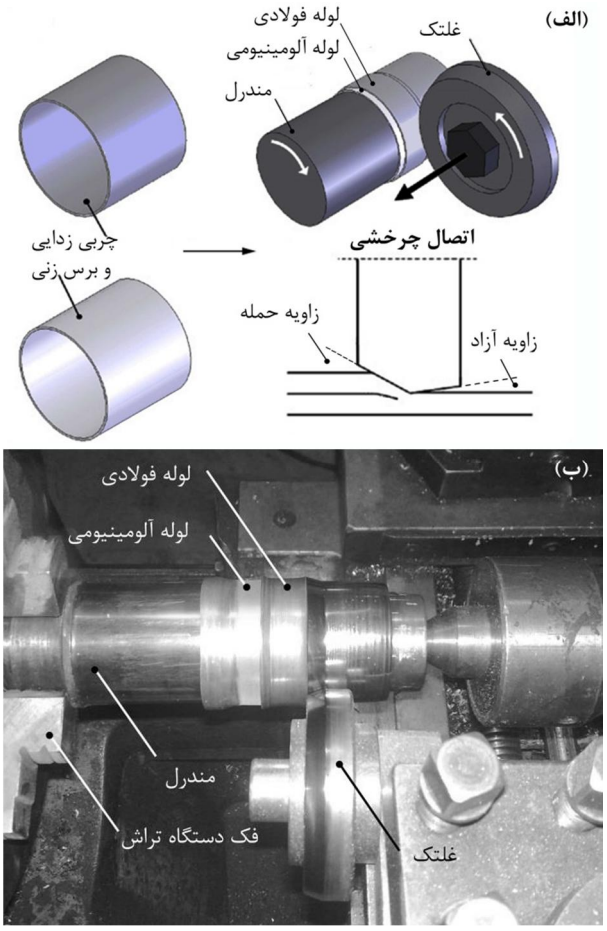
**جدول 2** سطوح پارامترهای ورودی

| پارامترها | سطوح |
|---|---|
| درصد کاهش ضخامت (تغییر شکل) | 35 43 51 59 67 |
| کارسرد آلومینیوم اولیه (%) | صفر 17 37/5 |
| ضخامت آلومینیوم اولیه (میلیمتر) | 0/5 0/75 1 |

1- Roll bonding
2- Asymmetrical roll bonding
3- Shear roll bonding
4- Convectional roll bonding or roll bonding
5- Extrusion
6- Multi billet extrusion
7- Explosive bonding
8- Diffusion bonding
9- Centrifugal casting
10- Thermo-hydraulic fit method
11- Hydraulic expansion method
12- Stress corrosion cracking(SCC)
13- Ball attrition
14- High pressure tube twisting( HPTT)
15- Spin bonding( SB)
16- Preform
17- Cold work (CW)
18- Mandrel



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]




**شکل 1** اتصال چرخشی: الف- فرآیند به صورت شماتیک؛ ب- فرآیند عملی روی دستگاه تراش

**جدول 3** ابعاد غلتک

| قطر (میلیمتر) | زاویه حمله (درجه) | زاویه آزاد (درجه) | شعاع (میلیمتر) |
|---|---|---|---|
| 80 | 17 | 3 | 1 |

(2) چربی زدایی سطوح اتصال با استون و خشک شدن در هوا و سپس برس‌زنی با برس به قطر 52 میلیمتر با سیم‌های فولاد ضد زنگ به قطر 0/35میلیمتر و سرعت دورانی2800 دور بر دقیقه.

(3) قرار دادن دو قطعه روی یکدیگر و انجام عملیات فلوفرمینگِ بدون کاهش ضخامت برای مطمئن شدن از ابعاد و قرارگیری مطلوب.

(4) اعمال کاهش ضخامت مورد نظر با انجام عملیات فلوفرمینگ در دمای اتاق.

در اینجا باید ذکر شود که درصد کاهش ضخامت اعمالی به قطعه کار، مقداری جزئی با مقادیر اسمی در طراحی آزمایش تفاوت داشت(حدود 1 تا 4 درصد). شکل 1-الف عملیات اتصال چرخشی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. این عملیات با استفاده از فرآیند فلوفرمینگ به صورت مستقیم و با استفاده از یک غلتک روی دستگاه تراش معمولی، به عنوان ماشین فلوفرمینگ انجام شد(شکل 1-ب). ابعاد غلتک در جدول 3 آمده است.

فرآیند اتصال چرخشی با سرعت دورانی اسپیندل 450 دور بر دقیقه و نرخ پیشروی 0/8 میلیمتر بر دور انجام شد. 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 و بنابراین احتمال ایجاد لایه‌ی اکسیدی جدید کاهش می‌یابد. ثانیاً با افزایش سرعت، زمان اعمال فشار بر روی ناحیه‌ی اتصال کاهش می‌یابد. این دو اثر، به صورت 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 [23]، با کاهش نرخ پیشروی، تغییر شکل آستانه کاهش و استحکام اتصال افزایش می‌یابد. بهترین مقدار گزارش شده توسط این گروه 0/8 میلیمتر بر دور است که در این تحقیق هم همین مقدار اتخاذ شد.

آزمایش‌ها به صورت کاملاً تصادفی انجام شدند. با توجه به تعداد بالای ترکیبات تیماری (5×3×3=45) از آزمایش‌های بدون تکرار استفاده شد. یک ریسک بدیهی در آزمایش‌های بدون تکرار آن است که اشتباهاً مدلی برازش شود. دو راه‌حل برای این مشکل و کم کردن خطا، در اثر گزارش نادرست، وجود دارد. راه‌حل اول آن است که متغیر پاسخ را به گونه‌ای محدود کنیم که از تغییرات کمتری برخوردار باشد، آنگاه شانس رسیدن به مقادیر نادرست و خطاهای بسیار زیاد، کم می‌شود. روش دیگر برای کسب اطمینان از مناسب بودن برآورد اثرات آن است که فاصله بین سطوح عامل مورد نظر کاهش یابد. با استفاده از این روش، خطای برازش مدل ناشی از گزارش نادرست یک داده کاهش می‌یابد[26]. توجه شود که محدوده‌ی استحکام اتصال می‌تواند بین صفر و استحکام لایه‌ی نرم‌تر تغییر کند و بنابراین متغیر پاسخ نامحدود نیست و این مورد خطا را در برآوردها کم خواهد کرد. علاوه بر آن سعی شد که سطوح درصد کاهش ضخامت، در حداکثر فاصله‌ی ممکن انتخاب شود. بدین منظور آزمایش‌های اولیه برای آشنایی با محدوده‌ی تغییرات ممکن پارامترهای ورودی انجام شد. با توجه به آزمایش‌های اولیه، مقدار آستانه‌ی تغییر شکل[1]در حدود 35% تخمین زده شد. علاوه بر آن نمونه‌های اولیه با کاهش ضخامت‌های حدود 70%، هنگام پوست‌کنی از آلومینیوم زمینه می‌شکستند. بنابراین مقادیر کاهش ضخامت برای آزمایش‌های اصلی بین 35% تا 67% انتخاب شد، که این بیش‌ترین فاصله‌ی ممکن بین سطوح پارامتر ورودی را باعث می‌شود.

پس از عملیات اتصال چرخشی چندین نمونه‌ی تسمه‌ای در راستای طولی از هر لوله‌ی دولایه بریده و آزمون پوست‌کنی با سرعت 20 میلیمتر بر دقیقه روی آن‌ها انجام شد (شکل 2-الف). نمونه‌ها در حدود 8 میلیمتر عرض و بین 40 تا 60 میلیمتر طول داشتند. نیروی پوست‌کنی متوسط در ناحیه‌ی پایا مطابق شکل 2-ب اندازه‌گیری شد. پس از آن با تقسیم نیروی متوسط بر عرض نمونه، استحکام اتصال (با واحد نیوتن بر میلیمتر) محاسبه می‌شود.

بلافاصله پس از پوست‌کنی، سطح جدایش نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

## 3- نتایج و بحث

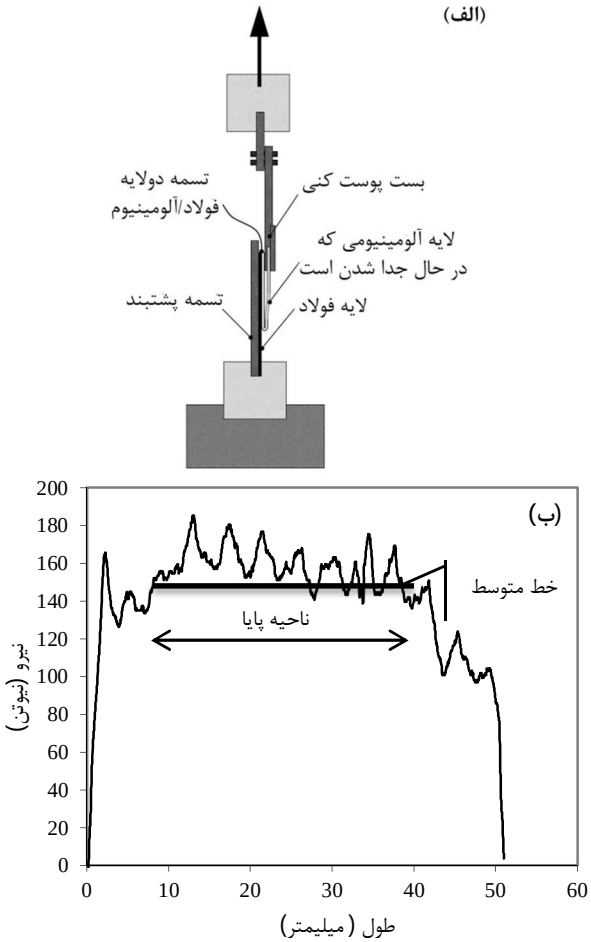
### 3-1- مکانیزم اتصال

شکل 3 پریفرم‌های اولیه و لوله‌های دولایه‌ی تولید شده با اتصال چرخشی را نشان می‌دهد. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توضیح مکانیزم اتصال حالت جامد انجام شده است. تا کنون چهار تئوری برای شرح مکانیزم اتصال ارائه شده است؛ تئوری فیلم[2][27-29] تئوری سد انرژی[3][27, 29] تئوری اتصال نفوذی[4][30] و تئوری تبلور مجدد[5][27]. از میان این مکانیزم‌ها مناسب‌ترین مکانیزم برای بیان اتصال نوردی و اتصال چرخشی سرد، تئوری فیلم است[2, 23, 31]. بر اساس تئوری فیلم مکانیزم ایجاد اتصال به صورت زیر است[10, 17, 29]:

1- Threshold
2- Film theory
3- Energy barrier theory
4- Diffusion bonding theory
5- Recrystallization theory



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]




**شکل 2** تست پوست‌کنی:الف- شماتیک تست؛ ب- نمودار نیروی پوست‌کنی در برابر طول پوست‌کنی شده

**شکل 3** قطعات آزمایش‌ها: الف- پریفرم‌ها؛ ب- قطعه نهایی با موقعیت نوعی نمونه تسمه‌ای برای تست پوست‌کنی ؛ ج- لوله‌های دولایه‌ی فولاد/آلومینیوم

1. شکستن لایه‌های سطحی متقابل به صورت همسان در اثر انبساط سطحی ایجاد شده ناشی از تغییر شکل(فشار ناشی از تغییر شکل مانع تشکیل لایه‌ی اکسیدی مجدد بعد از شکستن لایه‌ی سخت می‌شود.).
2. اکسترود شدن مواد خام[1] زیر لایه‌ای، در اثر فشار نورد، از ترک‌های لایه‌های سخت‌شده‌ی دو طرف.
3. ایجاد پیوند فلزی بین مواد خام اکسترود شده و تماس یافته.

توجه بدین نکته ضروری است که پیوند و اتصال اتمی بین دو لایه، تابع ساده‌ای از انبساط سطحی نیست بلکه مواد اکسترود شده باید به اندازه‌ی کافی باشند تا یک پیوند پایدار مستحکم را ایجاد کنند[31]. بر این مبنا یک مقدار آستانه‌ی تغییر شکل وجود خواهد داشت که در مقادیر کمتر از آن، تعداد و اندازه‌ی ترک‌های روی سطوح و در نتیجه فلزات خام، کمتر از حدی هستند که بتوانند اتصال قابل قبولی را ایجاد کنند[32].

همان طور که محبی و اکبرزاده [23] بیان کردند، از میان چهار تئوری اتصال فشاری، تئوری فیلم مطابقت بیشتری با اتصال نوردی و اتصال چرخشی دارد؛ هر چند ارائه این تئوری برای اتصال چرخشی به سادگی اتصال نوردی نیست. این امر از تفاوت ماهیت تغییر شکل در نورد و فلوفرمینگ و یا به عبارتی نوع تنش‌ها و کرنش‌ها و سابقه کرنش‌ها در این دو فرآیند ناشی می‌شود. بنابراین می‌توان تفاوت این دو فرآیند را در نوع تنش‌ها و کرنش‌ها و سابقه کرنش‌ها تقسیم‌بندی کرد[23]. اولین مورد نوع تنش‌ها در فرآیند اتصال چرخشی است. با توجه به فرآیند اتصال نوردی غیر متقارن، از نورد این فرآیند برای ایجاد تنش برشی بین لایه‌ها استفاده می‌کنند چون تنش برشی می‌تواند به ایجاد قفل شدگی در پستی و بلندی‌های سطوح متقابل، و ایجاد و گسترش ترک‌ها و همچنین از بین رفتن لایه آلاینده در اثر سایش، کمک کند[4, 6]. در فلوفرمینگ، برخلاف نورد، تنش برشی در هر سه صفحه وجود دارد[33]، بنابراین صفحات متقابل، تمایل به حرکت نسبی در جهت‌های محوری و محیطی خواهند داشت.

با توجه به تئوری فیلم می‌توان گفت آستانه تغییر شکل ناشی از دو علت است:

- آماده شدن شرایط برای تماس دو سطح فلز خام
- ایجاد فشار برای پیوند دو سطح مقابل

در فرآیند اتصال چرخشی نیز همان طور که نتایج محبی و اکبرزاده[23] نشان می‌دهد، تغییر شکل به صورت نموی و تدریجی است و می‌توان دو کاهش ضخامت «در هر گام» و «کاهش ضخامت در کل» را به صورت جداگانه در نظر گرفت. کاهش ضخامت در هر پاس (گام یا دوران) بسیار کمتر از کاهش ضخامت آستانه برای ایجاد اتصال است. در اینجا می‌توان گفت که کاهش ضخامت کل نقش آماده سازی شرایط برای تماس دو فلز خام را دارد و کاهش ضخامت در هر پاس نقش ایجاد فشار برای پیوند دو سطح متقابل. این نتیجه با دستاوردهای دیگر محققان نیز همخوانی دارد. با توجه به نتایج این بررسی، بین سطوحی که لایه اکسیدی سطحی ندارد، در تغییر شکل‌های بسیار اندک، اتصال برقرار می‌شود[29].

دومین مورد سابقه‌ی تنش و کرنش در فرآیند اتصال چرخشی است. در این فرآیند برخلاف نورد، تغییر شکل به صورت نموی و تدریجی است. بنابراین اتصال ایجاد شده در فرآیند فلوفرمینگ در یک گام باید توانایی تحمل تنش‌ها و کرنش‌های همسایگی ایجاد شده در گام‌های بعدی را داشته باشد تا اتصالی پایدار ایجاد کند.

با توجه به آنچه ذکر شد مکانیزم اتصال فولاد و آلومینیوم (لایه خارجی فولاد) با فرآیند اتصال چرخشی از نمونه‌های برس‌زنی شده، می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

1- Virgin metals



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]

### 3-1-1- آماده شدن شرایط برای تماس فلز خام دو سطح

از بین رفتن لایه‌های سطحی در آلومینیوم و فولاد از مکانیزم‌های متفاوتی پیروی می‌کند؛ این تفاوت ناشی از تفاوت لایه‌های سطحی دو فلز پس از برس‌زنی است. اکسید آهن پایدار در دمای اتاق$Fe_2O_3$است، اما لایه اکسیدی ناشی از این ترکیب بسیار متخلخل و با چسبندگی ضعیف است. حال آن‌که لایه اکسیدی آلومینیوم لایه‌ای پیوسته و سخت است[34]. بنابراین مکانیزم از بین رفتن لایه‌ی سطحی فولاد در حقیقت شکستن لایه‌ی کار سرد شده و شکننده ایجاد شده در اثر برس زنی، با انبساط سطحی و تنش‌های برشی خواهد بود، و برای آلومینیوم ، از بین رفتن لایه اکسیدی در اثر فشار و سایش.

این نتیجه را می‌توان با مقایسه تصاویر ناحیه شکست اتصال، توضیح داد. در شکل4 ترک ایجاد شده (مناطق تیره رنگ) در فولاد کاملاً واضح است، درحالی‌که چنین مکان‌هایی در آلومینیوم وجود ندارد. لازم به ذکر است که فاصله زمانی دو گام در اتصال چرخشی بسیار کم بوده و امکان تشکیل لایه اکسیدی ضخیم روی سطح فلز خام ایجاد شده در فاصله زمانی بین دو گام وجود ندارد. بنابراین سطوح خام فلزی شکل گرفته در هر گام را می‌توان به عنوان سطح خام فلزی برای گام‌های بعدی در نظر گرفت.

### 3-1-2- تماس مواد خام، ایجاد اتصال ناپایدار و به دنبال آن پایدار شدن نواحی اتصال با افزایش تغییر شکل

مطابق با مدل ارائه شده در تحقیقات قبلی[23]، با افزایش تغییر شکل، کسر سطحی فلز خام به طور مداوم و به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که به علت وجود دو فلز متفاوت مورد اتصال، یک تأخیر و غیریکنواختی در اکسترود شدن و در معرض تماس قرار گرفتن فلزات خام دو سطح وجود خواهد داشت. این ناشی از استحکام‌های متفاوت دو فلز است. این نکته را نیز باید در نظر داشت که در فلوفرمینگ سطوح خارجی در طرف غلتک تحت تنش‌های برشی و عمودی بیشتری قرار دارند، که این مورد در اینجا باعث یکنواخت‌تر شدن تغییر شکل می‌شود.

اتصالات ناپایدار در مراحل اولیه شکل می‌گیرند. این اتصالات از آن جهت ناپایدارند که اندازه آن‌ها به قدری نیست که بتواند تنش‌ها و کرنش‌های همسایگی در گام‌های بعد را تحمل کند.

با افزایش کسر سطحی فلز خام، اتصالات به تدریج پایدار می‌شوند. به عبارت دیگر کسر سطحی فلز خام به اندازه‌ای می‌رسد که اتصال ایجاد شده در یک گام بتواند آشفتگی ایجاد شده در اثر تنش‌ها و کرنش‌های همسایگی را در گام‌های بعد تحمل کند.

### 3-1-3- افزایش استحکام اتصال

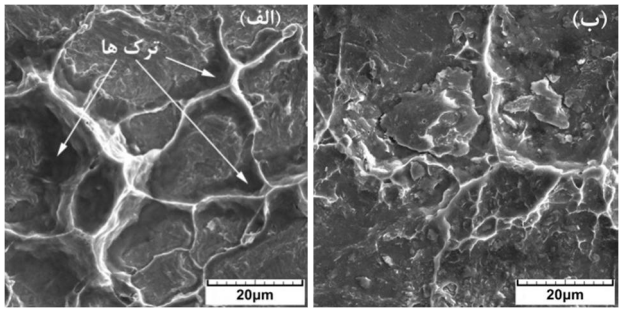
در این مرحله با افزایش تغییر شکل، کسر سطحی نواحی اتصال یافته افزایش می‌یابد.

## 3-2- اثر پارامترها بر استحکام اتصال

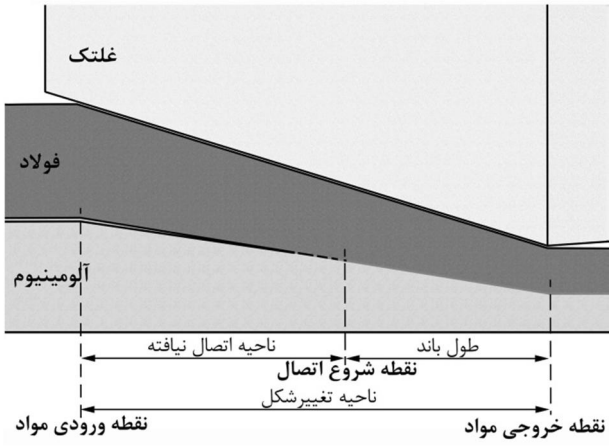
برای تحلیل اثر پارامترها، نیاز است تا ابتدا توضیحاتی ارائه شود. ناحیه‌ی تغییر شکل را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد: ناحیه‌ی قبل از نقطه‌ی شروع اتصال و ناحیه‌ی بعد از آن (شکل 5). طول باند، طولی از خط تماس دو لایه است که از نقطه‌ی زیر دماغه‌ی غلتک تا نقطه‌ی شروع اتصال ادامه می‌یابد.

### 3-2-1- اثر درصد کاهش ضخامت

نمودارهای شکل‌های 6 و 7 اثر درصد کاهش ضخامت بر استحکام اتصال (استحکام پوست‌کنی متوسط) در مقادیر مختلف ضخامت اولیه آلومینیوم (T0) و میزان کار سرد اولیه‌ی آلومینیوم (CW) را نشان می‌دهند.




**شکل 4** ترک‌های ایجاد شده در سطوح لایه‌کنی برای فولاد(الف). در آلومینیوم (ب) این ترک‌ها دیده نمی‌شوند.(کاهش ضخامت 51%ضخامت آلومینیوم اولیه‌ی 0/75 میلیمتر، درصد کار سرد آلومینیوم اولیه‌ی صفر.)




**شکل 5** شکل شماتیک ناحیه تغییر شکل در اتصال چرخشی

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.

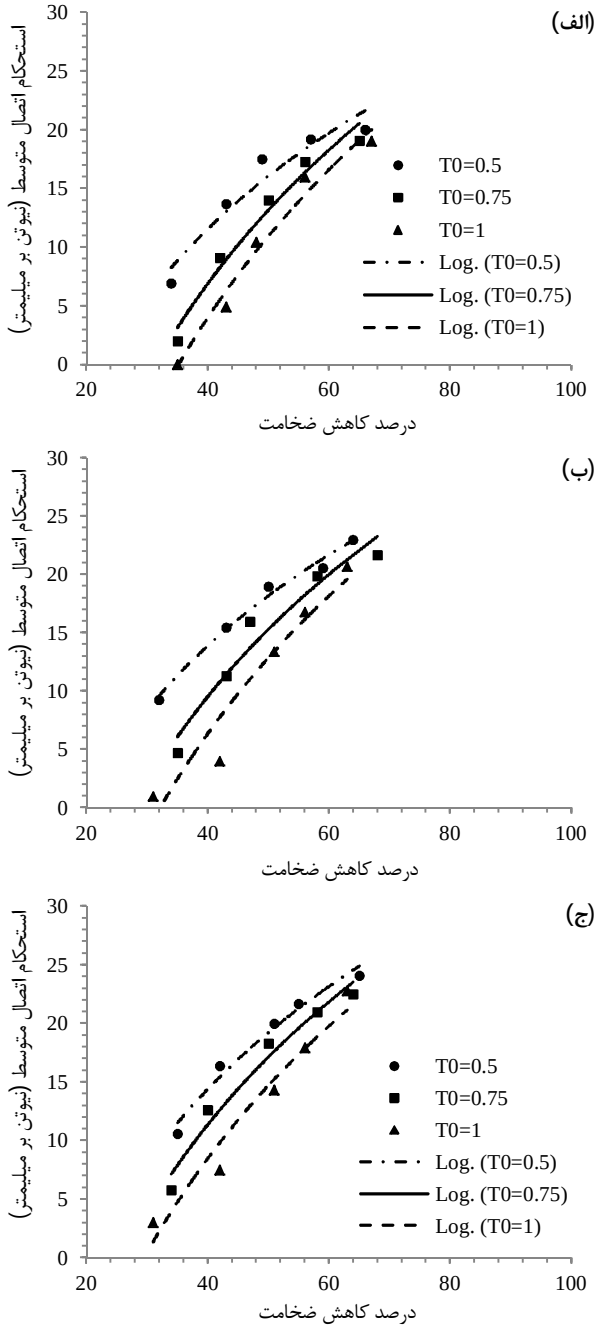
این مورد به دلیل آن است که در مقادیر انتهایی پایین و انتهایی بالای درصد کاهش ضخامت، ممکن است تمایل نمودار تغییر کند. البته تغییرات انتهایی بیشتر به دلیل شکست فلز زمینه و تغییرات ابتدایی به علت نزدیک بودن به مقدار آستانه‌ی تغییر شکل است. همان‌گونه که در این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش درصد کاهش ضخامت، بیشتر از مقدار آستانه (در حدود 35%)، استحکام اتصال به سرعت افزایش می‌یابد. افزایش میزان تغییر شکل باعث افزایش کسر سطحی اتصال خواهد شد و در نتیجه استحکام اتصال افزایش می‌یابد. این مورد که مهم‌ترین عامل افزایش استحکام است، در شکل 8 نشان داده شده است. عامل دیگر آن است که با افزایش درصد کاهش ضخامت، تنش شدیدی به لایه‌های خارجی وارد می‌شود و نایکنواختی حاصل از اختلاف استحکام فلزات، جبران خواهد شد. توجه به این نکته ضروری است که با یکنواخت شدن تغییر شکل، در مقدار درصد کاهش ضخامت ثابت، طول باند بیشتر می‌شود و نقطه‌ی شروع اتصال از دماغه‌ی غلتک دور خواهد شد. طول باند بیشتر به معنای آن خواهد بود که مرحله‌ی افزایش استحکام اتصال فرصت بیشتری پیدا خواهد کرد و به عبارت دیگر استحکام اتصال بیشتر خواهد شد.

### 3-2-2- اثر ضخامت اولیه‌ی آلومینیوم

همان طور که در نمودار شکل 6 آمده است، با کاهش ضخامت آلومینیوم اولیه، استحکام اتصال افزایش می‌یابد. کاهش ضخامت آلومینیوم اولیه چند اثر را در پی خواهد داشت:



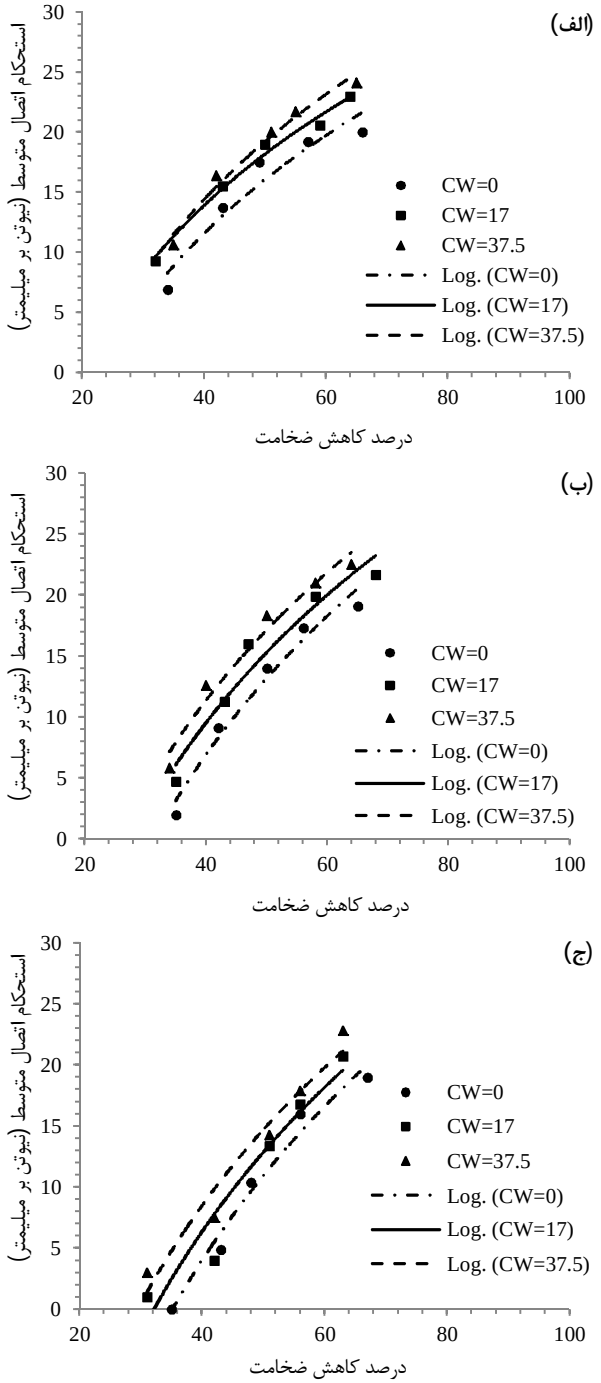
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]




**شکل 6** اثر درصد کاهش ضخامت بر استحکام اتصال در مقادیر مختلف ضخامت اولیه‌ی آلومینیوم (T0(mm ؛ میزان کار سرد اولیه‌ی آلومینیوم برابر الف- صفر، ب-17% و ج-37/5%.

1. طبق روابط ارائه شده از تحلیل‌های گور و تایروش [35]، مساحت ناحیه‌ی تماس غلتک با قطعه کاهش یافته و بنابراین فشار افزایش می‌یابد.
2. طبق بررسی‌های تحلیلی در فرآیند اتصال نوردی، ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک در اثر فشار بیشتر، بزرگ‌تر خواهد بود و بنابراین طول باند بیشتر خواهد شد[36].

این اثرات باعث افزایش استحکام اتصال خواهد شد. همچنین با کاهش ضخامت اولیه‌ی آلومینیوم ، اثر افزایش تغییر شکل بر استحکام اتصال کاهش می‌یابد. دلیل این نتیجه را نیز می‌توان چنین بیان کرد که با کاهش ضخامت آلومینیوم ، استحکام اتصال به مقدار فلز زمینه می‌رسد و بنابراین یک حد بالا برای استحکام اتصال وجود دارد.



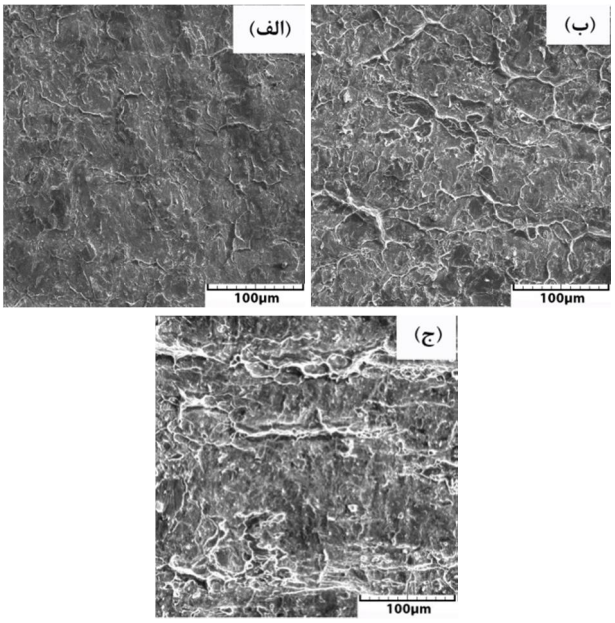

**شکل 7** اثر درصد کاهش ضخامت بر استحکام اتصال در مقادیر مختلف درصد کارسرد اولیه‌ی آلومینیوم (%)CW؛ضخامت اولیه‌ی آلومینیوم برابر الف- 0/5میلیمتر، ب- 0/75 میلیمتر، ج- 1میلیمتر

### 3-2-3- اثر استحکام آلومینیوم اولیه

شکل 7 اثر درصد کار سرد آلومینیوم اولیه را بر استحکام اتصال نشان می‌دهد. با افزایش استحکام اولیه‌ی آلومینیوم یکنواختی در اثر اختلاف کمتر استحکام‌ها، بالا می‌رود. این باعث می‌شود که تأخیر در آماده شدن سطح‌ها برای تماس فلزات خام کمتر شده، نقطه‌ی شروع اتصال از ناحیه‌ی دماغه‌ی غلتک دور شود و استحکام افزایش یابد. البته این افزایش استحکام، جزئی خواهد بود. علاوه بر آن اثر افزایش تغییر شکل بر میزان استحکام اتصال با زیاد شدن کار سرد اولیه بیشتر می‌شود.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]




**شکل 8** افزایش کسر سطحی نواحی اتصال با افزایش درصد کاهش ضخامت (نواحی روشن سطوح شکست مکان‌های اتصال یافته را برای فولاد نشان می‌دهند.)؛ الف- 35%، ب- 51%، ج- 67%. (ضخامت آلومینیوم اولیه 0/75 میلیمتر و درصد کار سرد آلومینیوم اولیه 17%)

## 4- نتیجه‌گیری

با استفاده از اتصال چرخشی بر مبنای فرآیند فلوفرمینگ، لوله‌های آلومینیوم و فولاد اتصال داده و لوله‌های کامپوزیتی لایه‌ای تولید شدند. آزمایش‌های اولیه برای آشنایی با محدوده‌ی تغییرات ممکن پارامترهای ورودی انجام شد و بر اساس آن‌ها، مقدار آستانه‌ی تغییر شکل در حدود 35% به دست آمد. با استفاده از طراحی آزمایش‌ها اثر پارامترهای درصد کاهش ضخامت کل و ضخامت و استحکام آلومینیوم اولیه بر استحکام اتصال بررسی شد.

بر اساس مشاهدات، نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی:

3. ایجاد اتصال در این فرآیند را می‌توان در سه مرحله بیان کرد:
- آماده شدن شرایط برای تماس فلز خام دو سطح.
- تماس مواد خام، ایجاد اتصال ناپایدار و به دنبال آن پایدار شدن نواحی اتصال با افزایش تغییر شکل.
- افزایش استحکام اتصال

4. از بین رفتن لایه‌های سطحی در آلومینیوم و فولاد در مرحله‌ی اول، از مکانیزم‌های متفاوتی پیروی می‌کند؛ این تفاوت ناشی از تفاوت لایه‌های سطحی دو فلز پس از برس‌زنی است. مکانیزم از بین رفتن لایه‌ی سطحی فولاد در حقیقت شکستن لایه‌ی کار سرد شده و شکننده ایجاد شده در اثر برس زنی، با انبساط سطحی و تنش‌های برشی خواهد بود، و برای آلومینیوم ، از بین رفتن لایه اکسیدی در اثر فشار و سایش.

5. درصد کاهش ضخامت و یکنواختی تغییر شکل لایه‌ها، تأثیر زیادی بر استحکام و کیفیت اتصال ایجاد شده دارند، هرچند اثر عامل اول بیشتر است. با افزایش درصد کاهش ضخامت پس از مقدار آستانه‌ی تغییر شکل، استحکام اتصال به سرعت افزایش می‌یابد تا به استحکام فلز ضعیف‌تر می‌رسد و نمونه‌ها در تست پوست‌کنی از زمینه می‌شکنند.

6. افزایش استحکام و کاهش ضخامت آلومینیوم اولیه، به همراه تغییر شکل بیشتر استحکام اتصال را افزایش می‌دهند.

## 5- مراجع

[1] L. C. Chen, Z. G. Yang, B. Jha, G. G. Xia, J. W. Stevenson, Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects, *Journal of Power Sources,* Vol. 152, No. 1, pp. 40-45, Dec 1, 2005. English

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

[3] M. S. Mohebbi, 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, Jun, 2011. English

[4] N. Bay, H. Bjerregaard, S. B. Petersen, C. H. G. dos Santos, Cross shear roll bonding, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 45, No. 1–4, pp. 1-6, 1994.

[5] S. H. Kim, H. W. Kim, K. Euh, J. H. Kang, J. H. Cho, Effect of wire brushing on warm roll bonding of 6XXX/5XXX/6XXX aluminum alloy clad sheets, *Materials & Design,* Vol. 35, pp. 290-295, Mar, 2012. English

[6] X. Li, G. Zu, Q. Deng, *An Investigation of Deformation Behavior of Bimetal Clad Sheets by Asymmetrical Rolling at Room Temperature,* in: *Light Metals 2011,* Eds., pp. 611-619: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[7] M. Buchner, B. Buchmayr, C. Bichler, F. Riemelmoser, Development of aluminium-clad steel sheet by roll-bonding for the automotive industry, *AIP Conference Proceedings,* Vol. 907, No. 1, pp. 264-268, 2007.

[8] H. D. Manesh, A. K. Taheri, The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials & Design,* Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, Dec, 2003. English

[9] H. D. Manesh, H. S. Shahabi, Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips, *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 476, No. 1-2, pp. 292-299, May 12, 2009. English

[10] M. S. A. Nezhad, A. H. Ardakani, A study of joint quality of aluminum and low carbon steel strips by warm rolling, *Materials & Design,* Vol. 30, No. 4, pp. 1103-1109, Apr, 2009. English

[11] R. Lapovok, H. P. Ng, D. Tomus, Y. Estrin, Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation, *Scripta Materialia,* Vol. 66, No. 12, pp. 1081-1084, Jun, 2012. English

[12] H. D. Manesh, 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, Oct 27, 2003. English

[13] M. Buchner, B. Buchner, B. Buchmayr, H. Kilian, F. Riemelmoser, 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, 2008/04/01, 2008. English

[14] H. D. Manesh, A. K. Taheri, Study of mechanisms of cold roll welding of aluminium alloy to steel strip, *Materials Science and Technology,* Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, Aug, 2004. English

[15] N. Bay, C. Clemensen, O. Juelstorp, T. Wanheim, Bond Strength in Cold Roll Bonding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* Vol. 34, No. 1, pp. 221-224, 1985.

[16] N. R. Chitkara, 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, Dec, 2001. English

[17] A. Khosravifard, R. Ebrahimi, Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process, *Materials & Design,* Vol. 31, No. 1, pp. 493-499, 2010.

[18] Z. Chen, K. Ikeda, T. Murakami, T. Takeda, J.-X. Xie, Fabrication of composite pipes by multi-billet extrusion technique, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 137, No. 1–3, pp. 10-16, 2003.

[19] X. J. Sun, J. Tao, X. Z. Guo, Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* Vol. 21, No. 10, pp. 2175-2180, Oct, 2011. English

[20] K. Bhanumurthy, Development of tubular transition joints of aluminium/stainless steel by deformation diffusion bonding, *Mater. Sci. Technol.,* Vol. 22, No. 3, pp. 321-330, 2006, 2006.

[21] D. L. Sponseller, G. A. Timmons, 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, Apr, 1998. English

[22] X. S. Wang, P. N. Li, R. Z. Wang, Study on hydro-forming technology of manufacturing bimetallic CRA-lined pipe, *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 45, No. 4-5, pp. 373-378, Apr, 2005. English

[23] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, A novel spin-bonding process for manufacturing multilayered clad tubes, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 210, No. 3, pp. 510-517, Feb 1, 2010. English

[24] Z. L. Zhan, Y. D. He, D. Wang, W. Gao, Cladding inner surface of steel tubes with Al foils by ball attrition and heat treatment, *Surface & Coatings Technology,* Vol. 201, No. 6, pp. 2684-2689, Dec 4, 2006. English

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]

[25] M. J. Roy, R. J. Klassen, J. T. Wood, Evolution of plastic strain during a flow forming process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 2, pp. 1018-1025, Jan 19, 2009. English

[26] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments, 6th Edition Set*: John Wiley & Sons, Limited, 2007.

[27] C. L. Cline, An Analytical and Experimental Study of Diffusion Bonding, *Welding journal ISSN 0043-2296 CODEN WEJUA3,* pp. 45 (11), 481-s, 1966.

[28] D. Pan, K. Gao, J. Yu, Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips, *Materials Science and Technology,* Vol. 5, No. 9, pp. 934-939, 1989.

[29] H. A. Mohamed, J. Washburn, Mechanism of solid state pressure welding, *Journal Name: Weld. J. (Miami); (United States),* pp. Medium: X; Size: Pages: vp, 1975.

[30] I. K. a. S. Kitayama, Study on diffusion bonding of metals, *Transactions of the Japan Institute of Metals,* pp. 18, (6), 455-465, 1977.

[31] S. A. Hosseini, M. Hosseini, H. D. Manesh, Bond strength evaluation of roll bonded bi-layer copper alloy strips in different rolling conditions, *Materials & Design,* Vol. 32, No. 1, pp. 76-81, Jan, 2011. English

[32] M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, *Materials & Design,* Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008. English

[33] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 210, No. 2, pp. 389-395, Jan 19, 2010. English

[34] S. L. Chawla, R. K. Gupta, *Materials Selection for Corrosion Control*: Asm International, 1993.

[35] M. Gur, J. Tirosh, Plastic Flow Instability Under Compressive Loading During Shear Spinning Process, *Journal of Engineering for Industry,* Vol. 104, No. 1, pp. 17-22, 1982.

[36] Y. Jiang, D. S. Peng, D. Lu, L. X. Li, Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 105, No. 1-2, pp. 32-37, Sep 7, 2000. English



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.4.1 ]