مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 253-262

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی-عددی فشار بین لایه‌ای طی فرایند کشش مفتول دو لایه آلومینیوم با روکش مس

مهدی راغبی[1*]، فریبرز فاتحی سیچانی[2]، سعید رهنما[1]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، raghebi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 آبان 1395

پذیرش: 30 آبان 1395

ارائه در سایت: 26 دی 1395

کلید واژگان:

مفتول دو لایه آلومینیوم پوشیده با مس

کشش سیم

فشار بین لایه‌ای

روش اجزاء محدود

انسیس

چکیده

مفتول دولایه آلومینیوم با پوشش مسی طبق استاندارد ASTM B566 قابل استفاده در شبکه‌های مخابراتی و انتقال سیگنال است. کیفیت این محصول از نظر اتصال متالورژیکی لایه پوشش، در استاندارد مذکور حائز اهمیت است. میزان فشار بین لایه‌ای طی فرایند کشش بر کیفیت اتصال دو ماده موثر است. نمونه مفتول دولایه با پوشش مس به ضخامت 0.45 میلی‌متر با قطر 9.5 میلی‌متر تولید شد. مفتول تولید شده تحت فرایند کشش سیم با نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% قرار گرفت. در این تحقیق اثر دو پارامتر فرایند کشش سیم شامل نیم زاویه قالب و درصد کاهش سطح مقطع بر تغییرات فشار بین لایه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار انسیس 17 مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه منحنی نیرو-جابجایی آزمون تجربی و مدل‌سازی انجام شده، صحت سنجی نتایج بررسی و مطلوب بود. طی تحقیق مشخص شد، با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، درصد افزایش فشار بین لایه‌ای بیشینه به مقدار نیم زاویه قالب بستگی دارد. به طوری که در نیم زاویه قالب 5 درجه افزایش نسبت کاهش سطح مقطع موجب افزایش فشار بین لایه‌ای بیشینه نمی‌شود. اما شدیدترین تأثیر تغییر نسبت کاهش سطح مقطع بر فشار بین لایه‌ای در نیم زاویه 45 درجه است. تغییرات این فشار با نیم زاویه قالب، به نسبت کاهش سطح مقطع بستگی دارد. به طوری‌که در نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% فشار بین لایه‌ای بیشینه با افزایش نیم زاویه قالب از 5 تا 45 درجه، کاهش می‌یابد. در صورتی که فشار بین لایه‌ای در نسبت کاهش سطح مقطع 20% با افزایش نیم زاویه قالب افزایش می‌یابد.

Experimental and numerical investigation on interlayer pressure at bimetallic Copper clad Aluminum wire drawing

Mehdi Raghebi*, Fariborz Fatehi-Sichani, Saeed Rahnama

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, raghebi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 October 2016
Accepted 20 November 2016
Available Online 15 January 2017

Keywords:
Bimetallic Copper clad Aluminum
Wire drawing
Interlayer pressure
FEM
Ansys

ABSTRACT

Bimetallic Copper clad aluminum according to standard ASTM B566 can be used in telecommunication networks and signal transmission. The quality of this product in terms of bonded layer's, in reference standard is important. The interlayer pressure was affected during the drawing process on the quality of bonded layer's. Sample of Bimetallic wire at diameter of 9.5 mm was produced by Copper clad with thickness of 0.45 mm. Bimetal wire was formed by wire drawing process with 6.2% reduction in area. In this study the effect of two parameters of wire drawing process: semi die angle and reduction of area on interlayer pressure using ANSYS 17 for simulation is examined. By comparing the force-displacement curve in experimental and modeling works, simulation accuracy was good. During the investigation it was found that, with reduction of area, percentage of the maximum interlayer pressure depends on semi die angle. So that by increases of reduction in area for 5 degrees semi die angle, interlayer pressure does not change. But, for 45 degree semi die angle the worst effect of reduction in area changes in interlayer pressure is sudden. The pressure changes with the increased semi die angle, depends on the reduction of area. So that the maximum interlayer pressure in 6.2% reduction in area is decreased with increases of semi die angle between 5 to 45 degrees; But, the interlayer pressure in 20% reduction in area, increases with increasing the semi die angle.

1- مقدمه

سیم‌های چند لایه به دلیل هزینه کم و خواص بهتر نسبت به سیم‌های از جنس مس خالص مورد توجه زیاد هستند. سیم‌های دولایه آلومینیوم پوشیده با مس به دو دلیل قیمت و چگالی کمتر از مس دارای جذابیت برای جایگزینی با فلز مس هستند. زمانی که نسبت مساحت فلز مس در مقطع سیم دو لایه آلومینیوم-مس 15 درصد باشد، وزن سیم حدود 62.5 درصد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Raghebi, F. Fatehi-Sichani, S. Rahnama, Experimental and numerical investigation on interlayer pressure at bimetallic Copper clad Aluminum wire drawing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 253-262, 2017 (in Persian)

کمتر از سیم مسی با قطر مشابه است. همچنین وزن سیم در مقایسه با سیم مسی خالص با مقاومت الکتریکی مشابه حدود 55 درصد کمتر است. به دلیل اثر پوستی، هدایت سیم دولایه آلومینیوم-مس در فرکانسهای بالا مشابه سیم مسی خالص است. امروزه سیم دولایه آلومینیوم-مس به صورت گسترده در هادی‌های کابل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. به لحاظ خواص میله‌های دو لایه کاربرد و نیاز آن‌ها در صنایع مختلف همواره در حال افزایش است [2]. مقاومت به خوردگی، خواص الکترومغناطیسی و حرارتی مطلوب همزمان با خواص مکانیکی مناسب از جمله ویژگی‌های مواد چند لایه است [3]. تحقیقات در مورد ساخت مواد دو لایه از موضوعات جدید و جذاب است [4]. از جمله روش‌های ساخت مواد دولایه عبارتند از فرایندهای آبکاری، جوشکاری انفجاری، جوشکاری اصطکاکی نوردی، اکستروزن و اکستروژن غیر مستقیم که از این فرایندها معمولا در پوشش‌دهی ورق‌ها و پروفیل‌ها استفاده می‌شود. به دلایل دمای بالا، سرعت تولید کم و هزینه تولید بالا، فرایندهای شکل‌دهی بیان شده، مناسب تولید مفتول‌های دو لایه نیستند. همچنین در فرایند آبکاری ضخامت لایه پوشش در مقایسه با فرایندهای شکل‌دهی ناچیز است که برای تولید مفتولهای دولایه آلومینیوم-مس قابل استفاده نیست [5].

کشش مفتول یکی از فرایندهای شکل‌دهی مفتول‌ها و سیم‌ها است که عمدتا برای ساخت هادی‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طی این فرایند سطح مقطع با کشش طی چندین مرحله از قالب‌های مخصوص کاهش می‌یابد. طی فرایند کشش تغیر شکل خمیری در ماده موجب تغییر خواص مکانیکی آن می‌شود. پارامترهای موثر بر تغییر خواص مکانیکی مفتول طی فرایند کشش عبارتند از نیم زاویه قالب، نسبت کاهش سطح مقطع، ضریب اصطکاک میان قالب و مفتول و نرخ کرنش. نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح مقطع، دارای محدودیت‌هایی هستند و به جنس مفتول و استحکام شکست آن بستگی دارند. نوع روانکار استفاده شده، تعیین کننده ضریب اصطکاک و سرعت کشش تعیین کننده نرخ کرنش است. وگا و همکارانش طی بررسی آزمایشگاهی اثر نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح مقطع مفتول تک لایه مس دریافتند با افزایش این پارامترها نیروی کشش فرایند افزایش می‌یابد [6].

مک آلن و همکارش طی تحلیل آزمایشگاهی کشش مفتول دو لایه مس-فولاد ضد زنگ کیفیت فضای اتصال بین دو لایه را مورد ارزیابی قرار دادند. طی این تحقیق دریافتند شکاف‌های بین دو لایه می‌تواند طی فرایند کشش یا در زمان بکارگیری مفتول ایجاد شود. با افزایش میزان نفوذ فولاد ضد زنگ در مس و ایجاد اتصال مناسب بین این دو ایجاد فاصله، حفره و شکاف بین دو لایه کاهش می‌یابد [7]

ساپاناتان و همکارانش استحکام پیوند را بین مس و آلومینیوم در یک میله دولایه ساخته شده به روش اکستروژن مورد ارزیابی قرار دادند. در روش آنها یک برش عرضی از مفتول مرکب به صورتی تحت بار قرار گرفت که لایه اتصال دو ماده در جهت محیطی، تحت تنش برشی خالص باشد. بنابراین لبه پوشش مسی بر روی تکیه گاه قرار گرفته و با پانچ هسته آلومینیومی تحت نیروی فشاری قرار داده شد. این تحقیق به دو روش عددی و تجربی انجام شد که طی آن اثر ضخامت لایه مسی، لقی سنبه و ماتریس و شعاع سنبه بر توزیع کرنش مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج تجربی و عددی، روش عددی تکنیک قابل قبولی برای تعیین استحکام پیوند بین دو ماده در میله مرکب تشخیص داده شد [8].

لازاروتو و همکارانش روشی عددی را برای تعیین ضریب اصطکاک کولمبی طی فرایند کشش سیم پیشنهاد دادند که با نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد. اطلاع از مقدار ضریب اصطکاک دقیق در شبیه‌سازی عددی فرایندهای شکل دهی بسیار مهم است و برای قابل مقایسه بودن نتایج عددی و تجربی این مقدار باید به روش مناسبی تعیین گردد [9].

بینگ لی و همکارانش اثر نورد نامتقارن و عملیات حرارتی مفتول چند لایه مرکب آلومینیوم-مس را بر تغییر میکرو ساختار و خواص مکانیکی آن مورد ارزیابی قرار دادند. طی تحقیق ایشان مشخص شد، تغییر شکل خمیری زیاد موجب ریز شدن دانه‌ها و اتصال مستحکم‌تر میان دولایه می‌شود. دمای بالای آنیل موجب نفوذ بیشتر دو ماده در یکدیگر و افزایش ضخامت ماده بین لایه‌ای می‌شود. بیشترین استحکام بین دو لایه، طی آنیل در دمای 300 درجه ایجاد شد [10].

شنگ و همکارانش تأثیر عملیات حرارتی را بر استحکام اتصال بین لایه‌ای با آزمایش لایه برداری[1] یک ورق دولایه آلومینیوم-مس مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد عملیات حرارتی در دمای پایین به بهبود استحکام اتصال بین لایه‌ای کمک می‌کند. اما زمان طولانی عملیات حرارتی موجب افزایش ضخامت ماده بین لایه‌ای است، که موجب کاهش استحکام می‌شود [11].

دوربان و همکارانش فرایند کشش لوله‌ها و مفتول‌های چند لایه را مورد تحلیل قرار دادند. ایشان در تحقیقشان تعداد لایه‌ها را نامحدود در نظر گرفته و جریان در ناحیه خمیری را کروی تصور کردند. مدل مواد را به صورت صلب-خمیری کامل و بدون کارسختی در نظر گرفتند. تنش بیشینه را طی فرایند کشش برای میله‌های دو لایه فولاد-مس و فولاد-برنج به صورت تجربی تعیین کردند. در مقایسه نتایج تحیل آنها با نتایج تجربی، تنها تا مقدار کرنش موثر 0.16 همخوانی وجود دارد [12].

جلال و همکارانش فرایند کشش مفتول دو لایه فولاد-مس و فولاد-برنج را مورد تحقیق قرار دادند. در این مواد دولایه هسته از جنس فولاد ساختمانی و پوسته از جنس مس و در نمونه‌ای دیگر پوسته از جنس برنج در نظر گرفته شد. آنها اثر نسبت کاهش سطح مقطع را بر نیروی کشش و کرنش محوری مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد با افزایش نسبت سطح مقطع، نیروی کشش و کرنش محوری افزایش می‌یابد. با کاهش اصطکاک بین قالب و مفتول دو لایه با استفاده از روانکار، اختلاف کرنش بین لایه‌ای حداکثر، برای مفتول دو لایه فولاد-مس و فولاد-برنج در نسبت کاهش سطح مقطع 0.2 بوجود می‌آید. در بررسی فشار بین قالب و مفتول و فشار بین لایه‌ای مشخص شد، با افزایش ضریب اصطکاک بین قالب و مفتول، فشار بین مفتول و قالب و فشار بین لایه‌ای کاهش می‌یابد [13].

طاهری، کشش نوار سه لایه بدون اتصال بین لایه‌ای را در قالب گوه‌ای مورد مطالعه قرار داد. او به کمک روش تحلیل حد بالائی و با فرض عدم لغزش بین لایه‌ها، نیروی فرایند را مورد بررسی قرار داد و نتایج را با آزمایش تجربی بر روی نوار سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم مقایسه کرد. وی تطابق خوبی میان نتایج تجربی و تحلیلی مشاهده کرد [14].

کو و همکارانش اثر ضخامت پوشش مسی را در فرایند کشش مفتول دو لایه فولاد-مس مورد بررسی قرار دادند. اثر نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح مقطع بر حداکثر آسیب به پوشش و تغییرات ضخامت لایه پوشش طی فرایند کشش بررسی شد. در قالب با نیم زاویه کمتر تغییرات ضخامت پوشش کاهش یافت [15].

[1] Peeling test

لی و همکارانش اثر نوع آنیل را بر ریزساختار و مقاومت الکتریکی مفتول دولایه فولاد-مس تحت کشش سرد بررسی کردند. با افزایش دمای آنیل، مقاومت الکتریکی سیم دولایه افزایش یافت، همچنین میزان نفوذ بین لایه‌ای بیشتر شد. میزان نفوذ طی عملیات آنیل در دمای 800 درجه سانتی‌گراد دو برابر حالت بدون عملیات حرارتی گردید. همچنین در سیم با قطر کمتر که دارای نسبت کاهش سطح مقطع بیشتری است، میزان نابجایی‌ها و انرژی ذخیره شده افزایش یافته، که منجر به افزایش نفوذ بین لایه می‌گردد [16].

لوئیس و همکارانش مقایسه‌ای میان روش المان محدود و روش تحلیلی حد بالایی برای فرایند کشش سیم انجام دادند. ایشان تغییرات انرژی درونی را طی فرایند کشش سیم مورد بررسی قرار دادند. تأثیر نیم زاویه قالب در دو روش تحقیق مورد اشاره، همسان اما در روش تحلیلی قاچی این تأثیر متفاوت بود. در یکی از نتایج مهم این تحقیق، به نامناسب بودن روش تحلیل قاچی زمانی که انرژی درونی در فرایند نقش دارد اشاره شده است [17].

با توجه به استاندارد، اتصال بین پوسته و هسته از معیارهای مهم کیفیت مفتول دو لایه مس-آلومینیوم[1] است. از پارامترهای موثر بر کیفیت این اتصال، نیروی فشار بین لایه‌ای در حین فرایند تولید است [18]. فشار بین لایه‌ای در حین فرایند کشش مفتول، ایجاد می‌شود. تاکنون اثر پارامترهای فرایند کشش مفتول دولایه بر تغییرات فشار بین لایه‌ای به روش عددی بررسی نشده است. در این تحقیق هدف، بررسی اثر نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح مقطع بر فشار بین لایه‌ای است. مفتول دولایه مد نظر، دارای هسته آلومینیومی و پوششی از جنس مس است. پس از چند مرحله کشش، قطر مفتول دولایه ساخته شده به 9.5 میلی‌متر کاهش یافته است. آزمون کشش سیم، برای بررسی منحنی نیرو-جابجایی انجام شده است. تحلیل عددی با کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار تجاری انسیس انجام شده است. خواص مکانیکی مس و آلومینیوم با آزمون کشش تعین شده و منحنی تنش کرنش واقعی به نرم‌افزار وارد شده است. با در نظر گرفتن تماس بین دو لایه، در شبیه‌سازی، فشار تماسی در حین فرایند، معرف فشار بین لایه‌ای است.

2- آزمایش‌های تجربی

نسبت ضخامت پوشش به قطر مفتول دو لایه مس-آلومینیوم بر اساس استاندارد ASTM B 566 تعیین شده است. بر این اساس مساحت مس 15 درصد مساحت مقطع مفتول دو لایه است. مواد اولیه برای ساخت نمونه‌های دولایه آلومینیوم-مس عبارت است از نوار مس به پهنای 34 میلی‌متر با ضخامت 0.45 میلی‌متر که از شرکت مس باهنر کرمان خریداری شده است. همچنین مفتول آلومینیوم به قطر 9.5 میلی‌متر که به صورت خالص تهیه شده است. اکسید و چربی موجود بر روی نوار مس و مفتول آلومینیوم موجب عدم اتصال بین فلزی خواهد بود [19]. بنابراین نوار مس و مفتول آلومینیوم قبل از استفاده کاملاً اکسید و چربی زدائی شده است. برای ساخت مفتول دو لایه دستگاه ساخته شده مطابق شکل 1 مورد استفاده قرار گرفته است. در این دستگاه، نوار مس به دور مفتول آلومینیوم به کمک زوج غلتک‌های خاصی در 5 مرحله در مختصات طولی به صورتی لوله می‌شود که همواره درز لوله در جهت بالا قرار دارد. فرایند لوله شدن تدریجی نوار مس به دور مفتول آلومینیوم در شکل 2 نشان داده شده است. درز لوله به روش جوش تیگ[2] و تحت گاز آرگون جوش می‌شود. سپس مفتول دو لایه آلومینیوم-مس ساخته شده طی یک مرحله کشش تحت کاهش سطح مقطع قرار گرفته و فضای خالی میان هسته و پوسته از میان می‌رود. این فرایند درست پس از جوش درز انجام می‌شود و این موجب تخلیه هوای محبوس در فضای بین دولایه خواهد شد. در این مرحله قطر مفتول دو لایه به اندازه نامی 9.5 میلی‌متر می‌رسد. سطح مقطع مفتول دو لایه قبل از کشش و بعد از آن در شکل 3 ملاحظه می‌شود. سطح مقطع میله پس از فرایند کشش یکنواخت است و ناحیه درز جوش بر سطح مفتول دو لایه و سطح مقطع آن به سادگی قابل مشاهده نیست. تغییر خواص مکانیکی لایه پوشش و لایه هسته در این مفتول دو لایه، به دلیل کار خمیری در اثر فرایند لوله شدن نوار مس، تغییرهای ناشی از حرارت جوش درز، عملیات خنک کاری و کار خمیری در اثر فرایند کشش تا رسیدن به قطر 9.5 میلی‌متر است. میله دولایه ساخته شده برای آزمایش کشش سیم به قطر 9.5 میلی‌متر است و عملیات حرارتی به منظور آنیل بر این نمونه انجام نشده است.

با توجه به اینکه در شبیه‌سازی کامپیوتری فرایند کشش مفتول دو فلزی مس-آلومینیوم، منحنی تنش واقعی-کرنش واقعی برای مس و آلومینیومی مورد نیاز است که مفتول دولایه تهیه شده را تشکیل می‌دهد، بنابراین نمونه آزمون کشش مس و آلومینیوم با انجام وایرکات از مفتول دولایه ساخته شده تهیه شد.

برای عبور اولیه مفتول دو لایه از قالب کشش، باید قطر مقداری از مفتول به میزان لازم کم شود. به این منظور مشابه کار کوکیچ و همکاران از

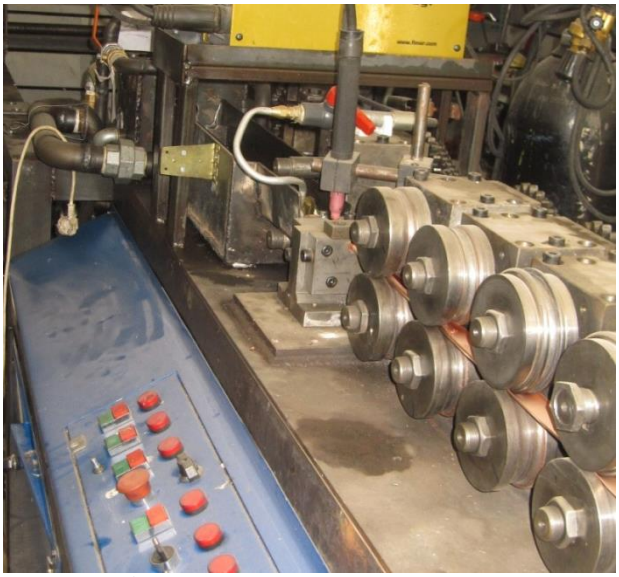

Fig. 1 Devices for making copper clad aluminum bimetallic wire

شکل 1 دستگاه ساخت مفتول دو لایه مس- آلومینیوم

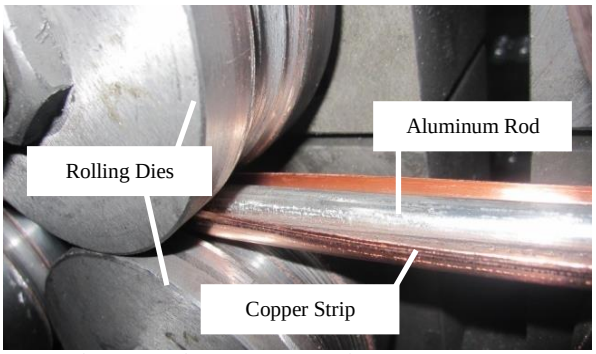

Fig 2 One of the steps of copper stripe roll forms

شکل 2 یکی از مراحل لوله کردن نوار مس

[1] Copper clad Aluminum wire rod
[2] Tig

فرایند سوئیج[1] استفاده شد [4]. برای اجرای این فرایند از یک دستگاه تراش استفاد شد. ابتدا قالب کشش مربوطه به سه نظام بسته شد و مفتول بر روی ابزارگیر مقید شد. با ورود مفتول به قالب چرخان قطر مفتول در طول مورد نیاز کاهش یافت.

جهت اجرای فرایند کشش بر مفتول دو لایه و تعیین منحنی نیرو جابجایی، از دستگاه آزمون کشش زوییک[2] مدل 6000 استفاده شده است. برای نگهداری قالب کشش از مجموعه قید و بند نشان داده شده در شکل 4 استفاده شد. نگهدارنده قید و بند به فک بالایی دستگاه مقید شده و مفتول دو لایه پس از عبور از قالب، به فک پایین دستگاه محکم شده است. با حرکت فک بالایی دستگاه، مفتول از داخل قالب کشیده شده و فرایند کشش بر روی مفتول دو لایه انجام می‌شود. نیم زاویه قالب مورد استفاده برابر 15 درجه و قطر خروجی برابر 9.2 میلی‌متر است. آزمایش با سه شرط اصطکاکی شامل خشک، روانکار روغن و گریس انجام شد. سرعت کشش نیز برابر 5 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

برای مقایسه نتایج آزمایش‌ها با نتایج عددی، باید ضریب اصطکاک به صورت یک مقدار عددی تعیین شود. برای این منظور آزمایش حلقه[3] از روش‌های توصیه شده و مناسب است [20]. حلقه با نسبت قطر خارجی، قطر داخلی و ارتفاع معادل 3:2:1 از دو ماده ساخته شد. طی آزمون فشار برای حلقه متناسب با اینکه شرایط اصطکاکی میان حلقه و سطح کوبه به چه صورت باشد، قطر داخلی افزایش یا کاهش می‌یابد. معمولاً در ضرایب اصطکاک کوچک در حین فشرده شدن حلقه، قطر داخلی افزایش یافته و در ضرایب اصطکاک بزرگ، قطر داخلی حلقه حین فشرده شدن، کاهش می‌یابد.

جهت تعیین مقدار ضریب اصطکاک، منحنی کالیبراسیون عددی تهیه شده توسط صنیعی و فاتحی مورد استفاده قرار گرفت (شکل 5) [21]. سطح بین حلقه و فشارنده صلب، برای سه حالت شرایط اصطکاک خشک، روانکار روغن و گریس مد نظر قرار گرفت. حلقه با شرایط اصطکاکی فوق در چند مرحله تحت فشار قرار گرفته و در هر مرحله قطر داخلی و ارتفاع ثبت شد. درصد کاهش ارتفاع و درصد تغییر قطر داخلی مطابق مقادیر ثبت شده، تعیین شد. مقادیر به‌طور جداگانه برای شرایط اصطکاکی مختلف بر روی منحنی کالیبراسیون وارد شد. در شکل 5 محور افقی درصد تغییر ارتفاع و محور قائم، درصد تغییر در قطر داخلی است. بنابراین مطابق منحنی کالیبراسیون برای اصطکاک خشک، ضریب 0.14، برای روانکار روغن

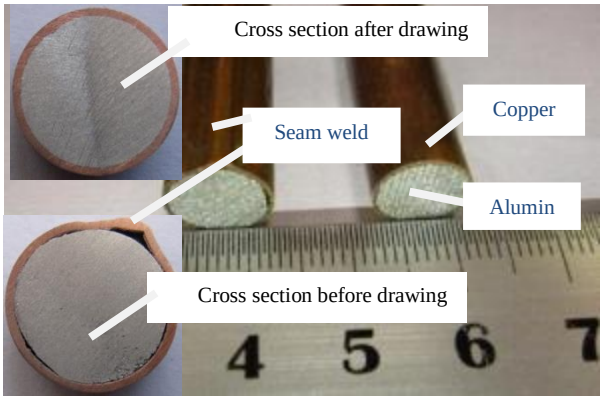

Fig 3 Copper clad aluminum wire manufactured

شکل 3 مفتول دو لایه آلومینیوم- مس ساخته شده

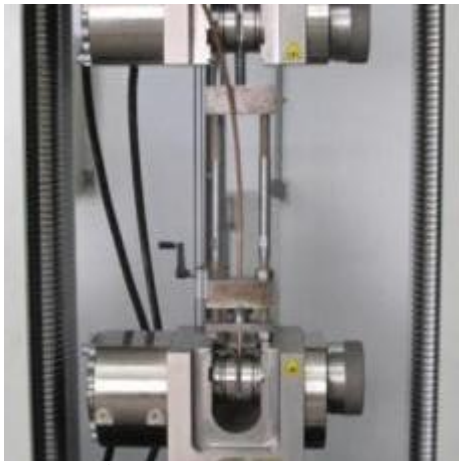

Fig. 4 Wire drawing fixture and experiment by zwick machine

شکل 4 قید و بند متصل بر دستگاه کشش زوییک در حال اجرای آزمایش کشش سیم با قالب مخروطی

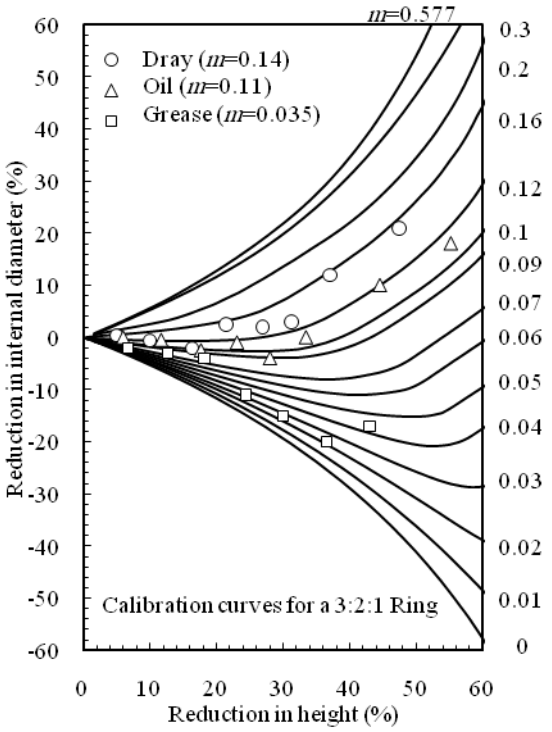

Fig. 5 Friction calibration curve [21]

شکل 5 منحنی کالیبراسیون اصطکاک[21]

ضریب 0.11 و برای گریس ضریب 0.035 تعیین شد.

3- شبیه‌سازی عددی

به منظور تعیین فشار بین لایه‌ای تحلیل عددی، به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس17 انجام شد. شبیه‌سازی در حالت متقارن محوری انجام شد. ابعاد مدل شامل ابعاد هندسی هسته، پوسته و قالب مشابه نمونه‌های آزمایش است به طوری که ضخامت لایه پوشش متناسب با استاندارد ASTM B566 به صورتی است که مساحت لایه پوسته معادل 15 درصد سطح مقطع باشد. مدل‌سازی هسته و پوسته در حالت متقارن محوری و با استفاده از المان Plane 183 انجام شد. برای شبیه‌سازی تماس بین لایه هسته و پوسته و همچنین بین پوسته و قالب از المان Conta175 و Targe

[1] Swaged
[2] Zwick
[3] Ring Test

169 استفاده شده است. تماس بین هسته و پوسته از نوع نقطه به سطح[1] و در حالت شکل پذیر انتخاب شده است. قالب در حالت متقارن محوری به صورت خط و صلب مدل شده و تماس بین قالب و پوسته از نوع نقطه به سطح و در حالت غیر شکل پذیر انتخاب شده است. برای تعیین ضرایب اصطکاک از مدل کولمب مور استفاده شد و ضرایب اصطکاک تشریح شده در بخش قبل مورد استفاده قرار گرفت. المان‌های مدل هسته و پوسته از نوع دو بعدی 8 گره‌ای مربعی است. تعداد المان بهینه برای شبیه‌سازی فرایند کشش مفتول با بررسی اثر تراکم شبکه بر منحنی نیرو جابجایی به‌دست آمد. اندازه المان بهینه برای هسته 0.5mm و برای پوسته 0.1mm به‌دست آمد. نوع بارگذاری باید به صورتی باشد که مدل مفتول از داخل قالب کشیده شود بنابراین بارگذاری به صورت جابجایی در راستای محور تقارن مدل در جهتی که قطر مدل کاهش یابد داده شده است. بار کششی به صورت جابجایی در گره‌های خط پایینی مدل بر روی هسته و پوسته داده شده است (شکل 6). مدل قالب صلب در تمام جهات مقید شد. حل در حالت استاتیکی با در نظر گرفتن تغییر شکل زیاد انجام شد. تعداد مرحله حل 1000 در نظر گرفته شده که با انتخاب نرم‌افزار تا 5000 مرحله قابل افزایش است. برای تعیین نیروی شکل‌دهی از گزینه نیروی عکس العمل[2] برای گره مبنی[3] قالب استفاده شد. مقدار این نیرو در برابر جابجایی گره‌های پایین مدل، محل اعمال شرط مرزی به دست آمده است. همچنین برای تعیین فشار بین لایه‌ای از گزینه فشار تماس[4] برای محل تماس هسته و پوسته استفاده شد. این گزینه برای یکی از المان‌های تماسی، قبل از ناحیه خمیری قالب استفاده شد. تغییرات فشار، طی اعمال بار و حرکت المان از ناحیه خمیری در برابر جابجایی گره‌های پایین مدل، محل اعمال شرط مرزی به دست آمد.

یکی از پارامترها برای امکان پذیری اجرای فرایند کشش مفتول دو لایه، حد تحمل تنش در لایه پوسته است. چنانچه این تنش از حد تحمل ماده بیشتر شود، لایه پوسته دچار پارگی محیلی خواهد شد. کانتور تنش شعاعی و تنش طولی برای مدل شبیه‌سازی شده با نیم زاویه 15 درجه و نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است. تنش شعاعی بیشینه در ناحیه ورودی قالب معادل 527MPa فشاری و تنش طولی ماکزیمم در لایه خارجی پوسته در محل تماس با قالب معادل 337MPa کششی است.

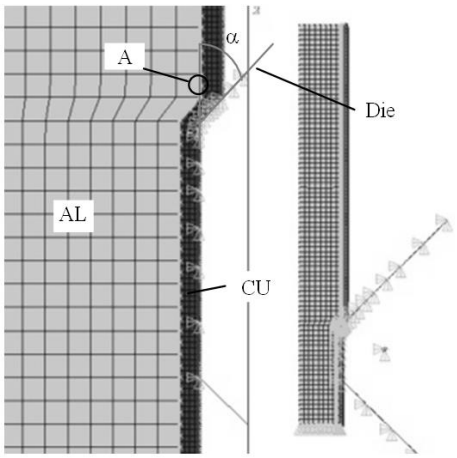

Fig. 6 Axially symmetric model of tow-layer wire

شکل 6 مدل متقارن محوری مفتول دولایه درون قالب کشش

[1] Node to Surface
[2] Reaction Forces
[3] Pilot Node
[4] Contact Pressure

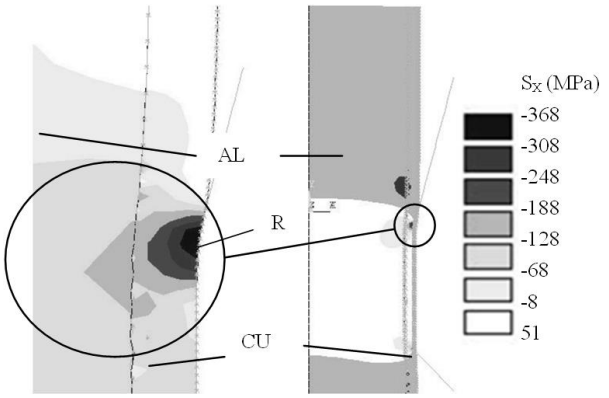

Fig. 7 Radial stress changes in axially symmetric model in 15° die angle & 6.2% reduction in area

شکل 7 تغییرات تنش شعاعی در مدل متقارن محوری در نیم زاویه °15 و نسبت کاهش سطح 6.2%

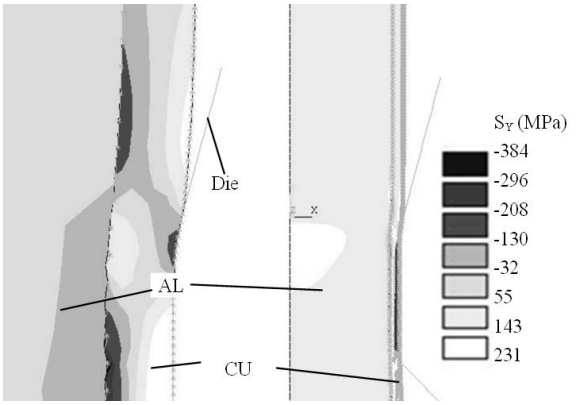

Fig. 8 Longitudinal stress changes in axially symmetric model in 15° die angle & 6.2% reduction in area

شکل 8 تغییرات تنش طولی در مدل متقارن محوری در نیم زاویه °15 و نسبت کاهش سطح 6.2%

4- نتایج و بحث

برای قابل مقایسه بودن نتایج تحلیل عددی و آزمایش‌ها، باید شرایط کاملاً یکسان باشد. یکی از این شرایط خواص مکانیکی مواد است. با توجه به مدل‌های مواد المان Plane 183 که برای شبیه‌سازی هسته و پوسته انتخاب شد، منحنی تنش واقعی کرنش واقعی مواد باید برای نرم‌افزار تعریف شود. بنابراین پس از نمونه برداری برای آزمایش کشش از مفتول دولایه ساخته شده با قطر 9.5 میلی‌متر، منحنی تنش کرنش واقعی برای مس و آلومینیوم به دست آمد. با استفاده از مدل هالومان برای مواد، منحنی نمایی از داده‌ها گذر داده شد و ضرائب استحکام (K) و کارسختی (n) برای مس و آلومینیوم مطابق جدول 1 به دست آمد. یکی دیگر از شرایط، ضریب اصطکاک سطح تماس پوسته و قالب است. با توجه به منحنی کالیبراسیون شکل 5 و انتخاب مدل اصطکاکی کولمب مور ضرایب اصطکاک 0.14 برای اصطکاک خشک، 0.11 برای استفاده از روانکار روغن و 0.035 برای استفاده از روانکار گریس انتخاب شد. در مشاهدات تجربی طی فرایند کشش، بقای جرم در ناحیه خمیری برقرار بوده و بین مس و آلومینیوم لغزشی طی آزمایش لغزش مشاهده نشد، بنابراین اصطکاک سطح تماس بین مس و آلومینیوم چسبان در نظر گرفته شد. برای مقایسه نتایج تجربی و عددی نیم زاویه قالب (α)، 15 درجه و نسبت کاهش سطح مقطع (RA)، 6.2 درصد مد نظر قرار گرفت. برای بررسی اثر نیم زاویه قالب به روش عددی، زوایای 5، 10، 15، 20، 25،

30، 35، 40 و 45 درجه در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی اثر نسبت کاهش سطح مقطع، نسبت‌های 6.2، 10، 15 و 20 درصد در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه برای نیم زاویه قالب بزرگتر از 15 درجه، برای المان‌های در تماس با قالب، لبه تیز بوجود می‌آید، لبه خروجی قالب با شعاع R مدل‌سازی شد (شکل 7). این شعاع دو برابر قطر مفتول قبل از ورود به قالب (d_b) در نظر گرفته شد. در تمام شبیه‌سازی‌های این تحقیق d_b برابر 9.5 میلی‌متر در نظر گرفته شد. پارامترهای مورد بررسی و سطوح پارامترها در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در جدول 2 مشاهده می‌شود.

4-1- نتایج آزمون کشش مفتول و مقایسه با شبیه‌سازی

کشش سیم با نسبت کاهش سطح مقطع 6.2 درصد انجام شد. منحنی نیرو-جابجایی برای شرایط اصطکاکی مختلف در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. همان‌طور در این شکل‌ها 10 ملاحظه می‌شود، روند افزایش نیرو تا جابجایی حدود 0.5 میلی‌متر ادامه دارد سپس با تغییرات اندکی کشش تا جابجایی 4 میلی‌متر ادامه دارد. نیروی بیشینه در همه حالات در جابجایی حدود 0.5 میلی‌متر در اصطکاک خشک در حدود 1300 N، برای روانکار روغن در حدود 850 N و برای روانکار گریس نیز در حدود 670 N است. برای بررسی تکرار پذیری آزمون اصطکاک خشک سه مرتبه تکرار شده است (شکل 9). در بررسی منحنی‌های نیرو جابجایی به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها ملاحظه می‌شود، نیروی بیشینه در همه حالات در جابجایی حدود 0.4 میلی‌متر ایجاد شده به طوری‌که در ضریب اصطکاک 0.14 در حدود 1350 N، برای ضریب اصطکاک 0.11 در حدود 1000 N و برای اصطکاک 0.035 نیز در حدود 800 N است (شکلهای 9 و 10). اختلاف میان نتایج تجربی و عددی برای نیروی بیشینه، در ضریب اصطکاک 0.035 در حدود 130N معادل 19.5% است(شکل 10). این اختلاف برای ضریب اصطکاک 0.11 در حدود 200N معادل 25% است (شکل 10). برای ضریب اصطکاک 0.14 در حدود 50N معادل 4% است (شکل 9).

در بررسی اختلاف مقادیر بوجود آمده بین نتایج تجربی و عددی ملاحظه می‌شود، اختلاف مقادیر نیروی بیشینه در ضریب اصطکاک خشک ناچیز است. در این حالت همان‌طور که در شکل 9 ملاحظه می‌شود، مقدار میانگین 3 آزمایش گزارش شده است. چنانچه اختلاف با تکرار سوم آزمایش تجربی مقایسه شود، اختلاف نیروی بیشینه در حدود 150N معادل 11% می‌شود. بنابراین با تکرار آزمایش و رسم منحنی میانگین اختلاف نتایج تجربی و عددی کاهش یافته است.

یکی از علل بروز خطا در شبیه‌سازی عددی منحنی تنش کرنش مس است. مس روکش شده پس از جدا شدن از میله مرکب با قطر 9.5 میلی‌متر با کار خمیری تخت شده و نمونه تست کشش از آن ساخته می‌شود. این مورد موجب بروز مقداری خطا خواهد بود. همچنین از علل دیگر خطا مدل هندسی مواد در ناحیه خمیری قالب است. در این حالت زاویه فصل مشترک دو ماده در ناحیه خمیری قبل از آغاز تحلیل، برابر با نیم زاویه قالب در نظر گرفته شده است. در صورتی که در مدل آزمایشگاهی این زاویه با زاویه قالب یکسان نیست. همچنین به صورتی که در شکل 7 نیز مشاهده می‌شود، پس از تحلیل مدل و اعمال جابجایی زاویه مورد اشاره در فصل مشترک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین یکی از علل مهم اختلاف میان نتایج تجربی و عددی یکسان بودن زاویه فصل مشترک و قالب در ناحیه خمیری است. به طوری که در منحنی نیرو جابجایی روش عددی در ضرائب اصطکاک 0.035 و 0.11 مشاهده می‌شود، در جابجایی پس از 0.4 میلی‌متر مقدار نیرو کاهش یافته و به حدود مقادیر تجربی می‌رسد. این موضوع با توجه به مطالب بیان شده در فوق اثبات کننده اثر زاویه فصل مشترک مدل بر اختلاف نیروی بیشینه در دو روش است.

در بررسی اثر نیم زاویه بر نیروی کشش مفتول دو لایه آلومینیوم-مس طی روش عددی ملاحظه شد، با افزایش نیم زاویه قالب از 10 درجه تا 45 درجه مقدار نیروی بیشینه کشش افزایش می‌یابد (شکل 11). در بررسی منحنی‌های نیرو جابجایی مشاهده می‌شود منحنی‌ها دارای دو ناحیه است، در ناحیه اول طی شیب نسبتاً زیاد مقدار نیرو افزایش یافته تا به مقدار بیشینه می‌رسد. این شیب با افزایش نیم زاویه قالب زیاد می‌شود. به طوری‌که در نیم زاویه 10 درجه نیروی بیشینه معادل 1kN در حدود جابجایی 0.5 میلی‌متری ایجاد می‌شود. این نیرو در نیم زاویه 45 درجه در حدود 1.8kN و در جابجایی 0.25 میلی‌متر ایجاد می‌شود. مقدار نیرو در تمام حالات پس از مقدار بیشینه تا حدود 2.5 درصد کاهش می‌یابد. یکی از دلایل این کاهش نیرو، تغییر زاویه فصل مشترک دو لایه در ناحیه خمیری، نسبت به مقدار اولیه در مدل هندسی است.

4-2- بررسی اثر نیم زاویه قالب

برای بررسی فشار بین لایه‌ای یک المان تماسی قبل از ورودی قالب (ناحیه A در شکل 6) انتخاب شد. فشار تماس از نتایجی است که می‌توان از نرم‌افزار استخراج نمود. برای هر شبیه‌سازی منحنی فشار تماس برای المان انتخاب

جدول 1 خواص مس و آلومینیوم منتج از آزمون کشش

Table 1 Mechanical property of copper and aluminum from tensile test

ماده	$\dot{\varepsilon}$ (1/min)	K(MPa)	n
مس	0.55	538	0.204
لومینیوم	0.55	169	0.160

جدول 2 مشخصات آزمایشات و شبیه‌سازی‌های انجام شده

Table 1 Properties of experimental works and numerical simulations

پارامتر	محدوده	*Num.*	*Exp.*
m	0.035, 0.11, 0.14	all	all
α (°)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45	all	15
RA (%)	6.2, 10, 15, 20	all	6.2
d_b (mm)	9.5	9.5	9.5
تعداد آزمایش	-	39	9

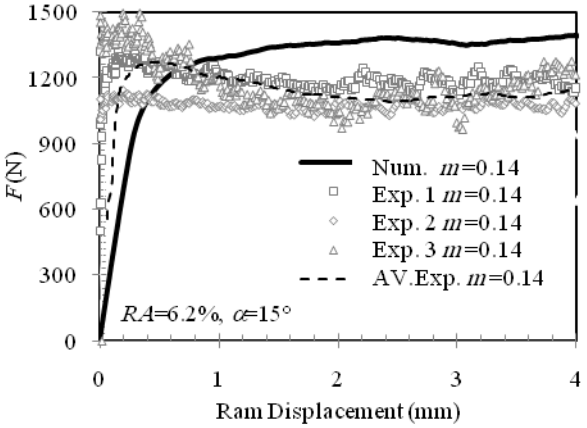

Fig. 9 Force-Displacement curve for experiment and numerical simulation

شکل 9 نمودار نیرو- جابجایی برای آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

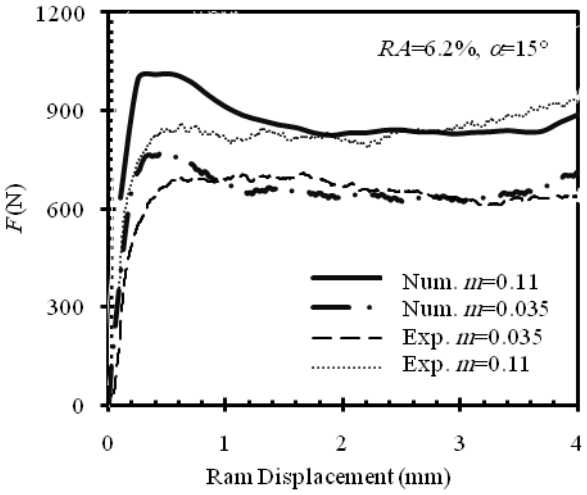

Fig. 10 Force-Displacement curve for various die coefficient friction in experiment and numerical simulation

شکل 10 نمودار نیرو- جابجایی برای ضرایب اصطکاک مختلف حاصل آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی

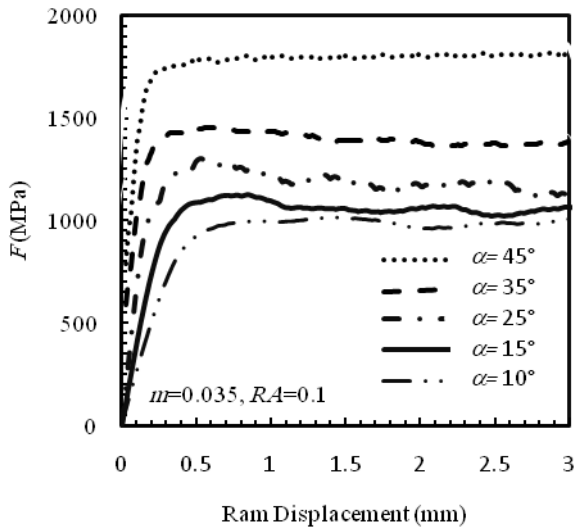

Fig. 11 Force-Displacement curve for various die angles

شکل 11 نمودار نیرو- جابجایی برای زوایای قالب مختلف منتج از شبیه‌سازی

شده در برابر جابجایی رام به دست آمد. در شکل‌های 12 و 13 منحنی فشار تماس بر حسب جابجایی رام با تغییرات نیم زاویه قالب مشاهده می‌شود. در هر دو شکل، مقدار فشار برای هر نیم زاویه با شیب بالائی به مقدار بیشینه رسیده و در اغلب موارد با حدود همان شیب کاهش یافته و به یک مقدار ثابت می‌رسد. شکل 12 مربوط به نسبت کاهش سطح 6.2% و شکل 13 مربوط به نسبت کاهش 20 درصد می‌باشد. در هر دو شکل، با افزایش نیم زاویه، مقدار فشار بیشینه در جابجایی کمتری ایجاد شده است. فشار بیشینه در ناحیه تغییر شکل خمیری قالب ایجاد شده است. با توجه به اینکه با افزایش نیم زاویه قالب در نسبت کاهش سطح یکسان، طول ناحیه مخروطی قالب کاهش می‌یابد، کاهش جابجایی فشار بیشینه، با افزایش نیم زاویه توجیه می‌شود.

در نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% با افزایش نیم زاویه قالب فشار بین لایه‌ای بیشینه کاهش می‌یابد. به طوری که در نیم زاویه 10 درجه این فشار در حدود 1000MPa و در نیم زاویه 45 درجه در حدود 300MPa است. این روند در نسبت کاهش سطح مقطع 20% معکوس است. چنانچه در شکل 13 مشاهده می‌شود. با افزایش نیم زاویه قالب فشار بین لایه‌ای بیشینه افزایش می‌یابد، به طوری که در نیم زاویه 5 درجه این فشار در حدود 750MPa و در نیم زاویه 45 درجه در حدود 1700MPa است.

تقریباً در تمام حالات فشار پس از مقدار بیشینه کاهش یافته و به یک مقدار ثابتی می‌رسد. همان‌طور که در شکل 12 ملاحظه می‌شود، برای کاهش سطح مقطع 6.2% این کاهش حدود 50% است. به طوری‌که در نیم زاویه 45 درجه فشار بیشینه حدود 300MPa است که پس از کاهش فشار با افزایش جابجایی به مقدار حدود 150MPa می‌رسد و با افزایش بیشتر جابجائی مقدار این فشار ثابت باقی می‌ماند. تغییرات فشار با جابجایی در نسبت کاهش سطح 20% پس از مقدار بیشینه فشار در زوایای مختلف، متفاوت است (شکل 13). در این حالت روند مشخصی مشاهده نمی‌گردد.

تغییرات فشار بین لایه‌ای بیشینه با نیم زاویه قالب برای نسبت‌های کاهش سطح مقطع 0.062، 0.1، 0.15 و 0.2 با تقریب خطی از داده‌ها به‌دست آمد (شکل 14). برای نسبت‌های 6.2% و 10% با افزایش نیم زاویه قالب از 5 درجه تا 45 درجه، فشار بیشینه بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. میزان این کاهش برای نسبت کاهش سطح 10% کمتر است. برای نسبت‌های 15% و 20% با افزایش نیم زاویه قالب از 5 درجه تا 45 درجه، فشار بیشینه بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. میزان این افزایش برای نسبت کاهش سطح 20% بیشتر است. با مشاهده تغییرات شیب خطوط در شکل 14 نسبت کاهش سطح مقطعی بین 10% و 15% وجود دارد که در آن فشار بین لایه‌ای بیشینه با تغییر نیم زاویه قالب، تغییر نخواهد کرد. یکی از علل تفاوت اثر نیم زاویه قالب بر فشار بین لایه‌ای بیشینه در نسبت‌های کاهش سطح مقطع مختلف، طول ناحیه مخروطی قالب است که فرایند تغییر شکل خمیری در آن انجام می‌شود. با افزایش نیم زاویه قالب و کاهش نسبت سطح مقطع این طول کاهش می‌یابد.

3-4- بررسی اثر نسبت کاهش سطح مقطع

تغییرات نیرو با جابجائی رام برای سه نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% و 0.1% و 0.2% در شکل 15 ملاحظه می‌شود. روند تغییر نیرو تا جابجائی حدود 0.4 میلی‌متر، افزایشی است و پس از آن با افزایش جابجائی مقدار نیرو

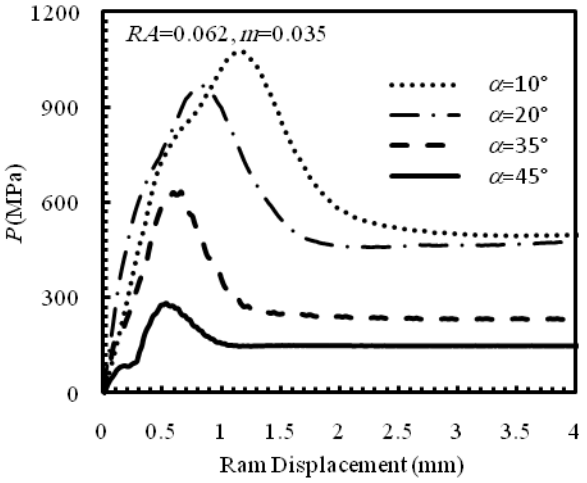

Fig. 12 Interlayer pressure-Displacement with semi die angle

شکل 12 تغییرات منحنی فشار بین لایه‌ای-جابجایی با تغییر نیم زاویه قالب برای RA=0.062

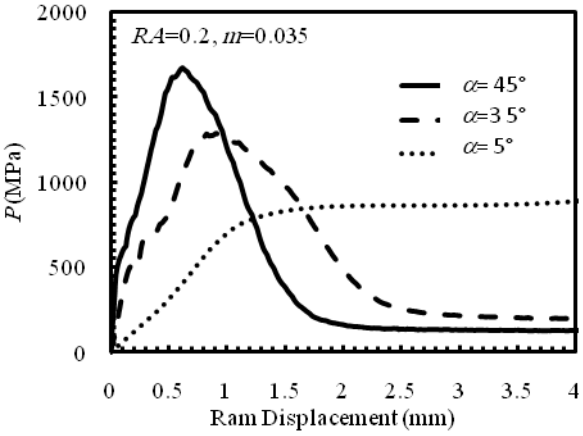

Fig. 13 Interlayer pressure-Displacement diagram with semi die angle

شکل 13 تغییرات منحنی فشار بین لایه‌ای-جابجایی با تغییر نیم زاویه قالب برای RA=0. 2

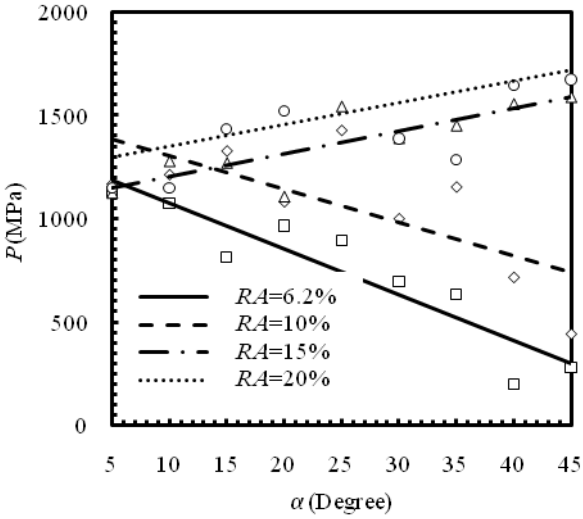

Fig. 14 Maximum Interlayer pressure with semi die angle

شکل 14 تغییرات فشار بین لایه‌ای بیشینه با تغییر نیم زاویه قالب

تقریباً ثابت باقی می‌ماند. مقدار نیرو با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، افزایش می‌یابد. به طوری‌که در شکل 15 مشاهده می‌شود، بیشینه نیرو در نسبت کاهش سطح مقطع 6.2% حدود 700N و در نسبت کاهش سطح مقطع 20% در حدود 2000N است.

در شکل 16 تغییرات فشار بین لایه‌ای با جابجائی رام مشاهده می‌شود. تمام نمونه ها در این شکل با نیم زاویه 10 درجه مد نظر قرار گرفته است. با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع مقدار بیشینه فشار در جابجائی بزرگتری ایجاد شده است. این موضوع نشان دهنده این است که افزایش طول ناحیه خمیری موجب افزایش فشار بین لایه‌ای شده و محل این ناحیه نیز درون قالب تغییر می‌کند. فشار بیشینه برای نسبت 6.2% در جابجایی 1.4 میلی‌متر و برابر 1050MPa ایجاد شده است. در صورتی‌که این فشار برای نسبت کاهش سطح مقطع 20% در جابجائی حدود 3 میلی‌متر و برابر 1350MPa بوده است. با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع فشار بین لایه‌ای بیشینه افزایش یافته است. فشار بین لایه‌ای با افزایش جابجایی رام پس از مقدار بیشینه کاهش یافته و در یک مقدار مشخصی ثابت می ماند. در تمام نسبت‌های کاهش سطح مقطع مقدار فشار بین لایه‌ای ثابت حدود 50% کمتر از مقدار بیشینه است (شکل 16).

در مقایسه شکل 15 با شکل 16 ملاحظه می‌شود، افزایش نسبت کاهش سطح مقطع از 6.2% به 20% مقدار نیروی لازم برای کشش را 1300N افزایش داده که معادل 1.9 برابر مقدار اولیه است. در صورتی که فشار بین لایه‌ای از مقدار 1050MPa به 1350MPa افزایش یافته که حدودا معادل 0.3 برابر است.

در بررسی اثر نسبت کاهش سطح مقطع بر فشار بین لایه‌ای بیشینه برای نیم زاویه‌های مختلف قالب، مشاهده شد در تمام زوایا، با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، فشار بین لایه‌ای بیشینه افزایش می‌یابد. شدت این افزایش با افزایش نیم زاویه قالب از 15 درجه تا 45 درجه با افزایش نیم زاویه قالب افزایش می‌یابد. در نیم زاویه 5 درجه این تغییرات کاهشی است اما شدت این کاهش بسیار کم است. فشار بین لایه‌ای بیشینه برای نیم زاویه قالب 5 درجه در نسبت‌های کاهش سطح مقطع 6.2% تا 20% در حدود 1150MPa و تقریباً ثابت است (شکل 17).

در زوایای مختلف با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، طول ناحیه مخروطی قالب افزایش می‌یابد. اثر این افزایش برای نیم زاویه‌های بزرگتر

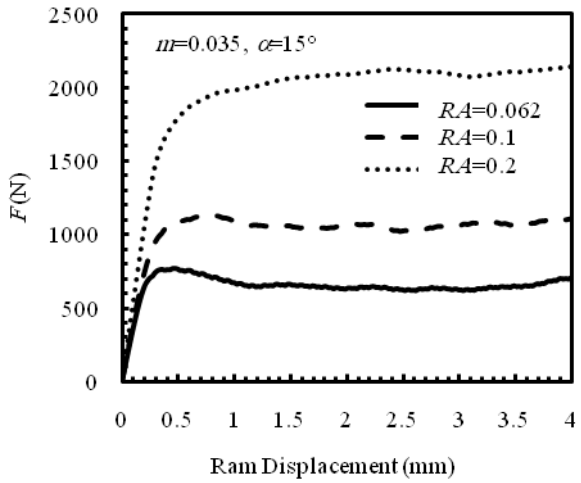

Fig. 15 Force-Displacement diagram with reduction in area

شکل 15 تغییرات نیرو-جابجایی با تغییر نسبت کاهش سطح مقطع برای α=15°

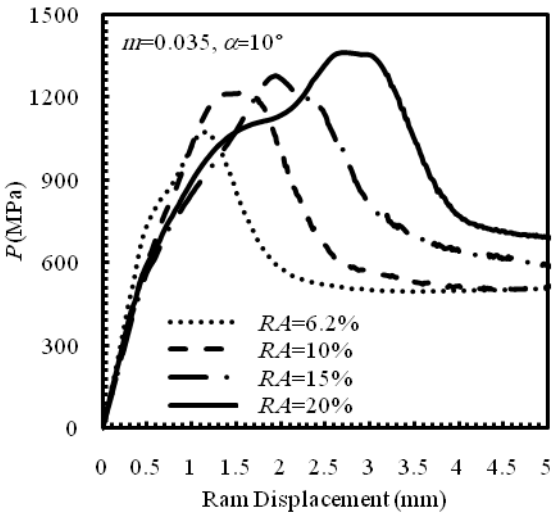

Fig. 16 Interlayer pressure-Displacement with reduction in area

شکل 16 تغییرات منحنی فشار بین لایه‌ای-جابجایی با تغییر نسبت کاهش سطح مقطع برای α=10°

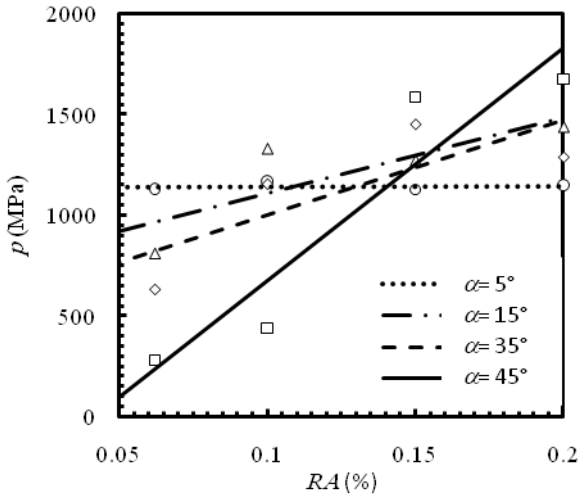

Fig. 17 Maximum Interlayer pressure with reduction in area

شکل 17 تغییرات فشار بین لایه‌ای بیشینه با تغییر نسبت کاهش سطح

شدیدتر است.

5- نتیجه‌گیری

منحنی‌های نیرو-جابجائی آزمایشات تجربی با شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار انسیس تطابق مناسبی داشت. فشار بین لایه‌ای با اندازه‌گیری فشار تماس در سطح تماس ایجاد شده بین دو لایه به‌دست آمد.

با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، نیروی کشش و فشار بین لایه‌ای افزایش می‌یابد. اما اثر تغییر نسبت کاهش سطح مقطع در تغییر نیرو بیش از اثر آن بر فشار بین لایه‌ای است.

همواره با افزایش نیم زاویه قالب، مقدار نیروی کشش افزایش می‌یابد. اما اثر افزایش نیم زاویه قالب بر فشار بین لایه‌ای در نسبت‌های کاهش سطح مختلف، متفاوت است. به طوری‌که در نسبت‌های کاهش سطح مقطع کوچکتر از 10% فشار بین لایه‌ای با افزایش نیم زاویه قالب کاهش می‌یابد و در نسبت‌های کاهش سطح مقطع بزرگتر از 15% فشار بین لایه‌ای با افزایش نیم زاویه قالب افزایش می‌یابد.

کمترین مقدار بیشینه فشار بین لایه‌ای برای نیم زاویه قالب 45 درجه با نسبت کاهش سطح 6.2% معادل 300MPa است. بیشترین مقدار بیشینه فشار بین لایه‌ای برای نیم زاویه قالب 45 درجه با نسبت کاهش سطح مقطع 20% معادل 1700MPa است.

بیشینه مقدار فشار بین لایه‌ای ثابت در میان منحنی‌های نشان داده شده در این تحقیق مربوط به نیم زاویه 5 درجه با نسبت کاهش سطح مقطع 20 درصد معادل 800MPa است. کمینه مقدار فشار بین لایه‌ای ثابت در میان منحنی‌های نشان داده شده در این تحقیق مربوط به نیم زاویه 45 درجه با نسبت کاهش سطح مقطع 20 درصد معادل 150MPa است.

بیشترین فشار بین لایه‌ای ثابت و بیشترین فشار بین لایه‌ای بیشینه در نسبت کاهش سطح مقطع 20% ایجاد شده است. بنابراین هر چه نسبت کاهش سطح مقطع افزایش یابد، فشار بین لایه‌ای بیشتر می‌شود. بیشترین فشار بین لایه‌ای بیشینه در نیم زاویه 45 درجه و بیشترین فشار بین لایه‌ای ثابت در نیم زاویه 5 درجه ایجاد شده است.

6- فهرست علائم

d_b	قطر میله دو لایه قبل از کشش (mm)
F	نیروی کشش (N)
K	ضریب رابطه تنش هالومان (ضریب استحکام)
m	ضریب برشی اصطکاک بین قالب و مفتول
n	توان رابطه تنش هالومان (ضریب کارسختی)
P	فشار بین لایه‌ای (MPa)
R	شعاع لبه قالب (mm)
RA	نسبت کاهش سطح مقطع
V	سرعت رام (mm/min)

علائم یونانی

α	نیم زاویه قالب (Degree)
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش (1/min)

زیرنویس‌ها

b	مفتول قبل از ورود به قالب

7- مراجع

[1] Y. Ma, Y. Wu, H. Gao, Y. Zhang, S. Liu, Microstructure and mechanical properties of copper clad aluminum wire by drawing at room temperature, *Key Engineering Materials*, pp. 317-320, 2007.

[2] S. Lee, M.-G. Lee, S.-P. Lee, G.-A. Lee, Y.-B. Kim, J.-S. Lee, D.-S. Bae, Effect of bonding interface on delamination behavior of drawn Cu/Al bar clad material, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, Supplement 3, pp. s645-s649, 2012.

[3] X. Li, G. Zu, P. Wang, Effect of strain rate on tensile performance of Al/Cu/Al laminated composites produced by asymmetrical roll bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 575, pp. 61-64, 2013.

[4] R. Kocich, A. Macháčková, L. Kunčická, F. Fojtík, Fabrication and characterization of cold-swaged multilayered Al–Cu clad composites, *Materials & Design*, Vol. 71, pp. 36-47, 2015.

[5] M. Hosseini, H. Danesh Manesh, Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding, *Materials & Design*, Vol. 81, pp. 122-132, 2015.

[6] G. Vega, A. Haddi, A. Imad, Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 3308-3312, 2009.

[7] P. J. McAllen, P. Phelan, Experimental analysis of drawn composite wire, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1–3, pp. 701-703, 2006.

[8] T. Sapanathan, R. Ibrahim, S. Khoddam, S. H. Zahiri, Shear blanking test of a mechanically bonded aluminum/copper composite using experimental and numerical methods, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 623, pp. 153-164, 2015.

[9] L. Lazzarotto, L. Dubar, A. Dubois, P. Ravassard, J. Oudin, Identification of Coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing process, *Wear*, Vol. 211, No. 1, pp. 54-63, 1997.

[10] X.-b. Li, G.-y. Zu, P. Wang, Microstructural development and its effects on mechanical properties of Al/Cu laminated composite, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 1, pp. 36-45, 2015.

[11] L. Y. Sheng, F. Yang, T. F. Xi, C. Lai, H. Q. Ye, Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 6, pp. 1468-1473, 2011.

[12] D. Durban, Drawing and extrusion of composite sheets, wires and tubes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 20, No. 7, pp. 649-666, 1984.

[13] M. S. Ragab, A. S. Wifi, G. M. A. Galal, On the deformation of bimetal wires by drawing, *Journal of Materials Shaping Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 67-75, 1991.

[14] A. K. Taheri, Analytical study of drawing of non-bonded trimetallic strips, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 33, No. 1, pp. 71-88, 1993.

[15] D. C. Ko, S. K. Lee, B. M. Kim, H. H. Jo, H. Jo, Evaluation of copper coating ratio in steel/copper clad wire drwaing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 22-26, 2007.

[16] H. Li, Z. Ding, J. Fang, Y. Gao, C. Sun, Effects of annealing process on microstructure and electrical properties of cold-drawn thin layer copper cladding steel wire, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 25, No. 11, pp. 5107-5113, 2014.

[17] J. L. o. C.J. Luis , R. Luri, Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1218-1225, 2005.

[18] A. Gueydan, B. Domengès, E. Hug, Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires after thermal aging, *Intermetallics*, Vol. 50, pp. 34-42, 2014.

[19] T. Sapanathan, S. Khoddam, S. H. Zahiri, A. Zarei-Hanzaki, Strength changes and bonded interface investigations in a spiral extruded

aluminum/copper composite, *Materials & Design*, Vol. 57, pp. 306-314, 2014.
[20] F. Fereshteh-Saniee, S. M. Pezeshki, Simultaneous determination of interfacial friction and flow curves of temperature and rate dependent materials for bulk metal forming processes, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 1, pp. 201-208, 2012.
[21] F. Fereshteh-Saniee, F. Fatehi-Sichani, An investigation on determination of flow curves at room temperature and under forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 478-482, 2006.