



## بررسی اثر پارامترها بر فشار بین لایه‌ای طی فرآیند کشش مفتول مرکب مس - آلومینیوم

سعید رهنما<sup>1\*</sup>، فریبرز فاتحی سیجانی<sup>2</sup>، مهدی راغبی<sup>1</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

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

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 29 بهمن 1394  
پذیرش: 12 اسفند 1394  
ارائه در سایت: 16 فروردین 1395  
کلید واژگان:  
مفتول دو فلزی مس-آلومینیوم  
کشش سیم  
فشار بین لایه‌ای

### چکیده

مفتول مرکب مس - آلومینیوم یک محصول کاربردی مورد استفاده در صنعت سیم و کابل است. تولید این محصول مرکب عموماً طبق استاندارد ASTM B566 انجام می‌شود. یکی از پارامترهای مهم طبق این استاندارد، کیفیت اتصال بین لایه‌ای است. فشار بین لایه‌ای در طی فرآیند تولید، نقش مهمی در کیفیت اتصال دولا به دارد. در این تحقیق اثر چند پارامتر فرآیند کشش سیم شامل نیم زاویه قالب، درصد کاهش سطح و ضریب اصطکاک بر تغییرات فشار بین لایه‌ای با استفاده از روش قاجی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از ساخت نمونه مشابه با نمونه صنعتی، آزمایش کشش سیم جهت تعیین نیروی فرآیند با سه حالت اصطکاک خشک، روان کار روغن و روان کار گریس انجام شده است. تطابق خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و روش تحلیلی مشاهده گردید. افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌ای موجب افزایش فشار بین لایه‌ای شد. افزایش نیم زاویه قالب موجب افزایش قابل توجه فشار بین لایه‌ای گردید. به طوری که با افزایش نیم زاویه قالب از 5 درجه به 75 درجه، فشار بین لایه‌ای حدود 3 برابر افزایش یافت. همچنین، افزایش نسبت کاهش سطح مقطع موجب افزایش فشار بین لایه‌ای شد. اما تغییر ضریب اصطکاک قالب، اثر ناچیزی در افزایش فشار بین لایه‌ای داشت.

## Investigation of wire drawing parameters on interlayer pressure at Copper clad Aluminum wire

Saeed Rahnama\*, Fariborz Fatehi Sichani, Mehdi Raghebi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, srahnama@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 18 February 2016  
Accepted 02 March 2016  
Available Online 04 April 2016

#### Keywords:

Cu clad Al bimetallic wire rods  
Wire drawing  
Interlayer pressure

### ABSTRACT

Copper clad aluminum composite wire used in wire and cable industry is an applied product. This product must be manufactured according to standard ASTM B566. According to this standard the connection between the layers is one of the quality parameters. Interlayer pressure during the production process plays an important role in the quality of connection between two layers. The effects of important wire drawing parameters, including a half-angle dies, reduction ratio and coefficient of friction on the interlayer pressure were discussed by slab methods. After samples making, test of wire drawing process was conducted to determine the force with three modes of dry friction, oil lubrication and grease lubrication. There was good agreement between experimental and analytical methods. With increase in friction coefficient of interlayer the interlayer pressure will increase. With increase in half angle of die, the interlayer pressure increased significantly. So by increasing the half angle of die from 5 to 75 degrees, the interlayer pressure increases about 3 times. Also, with increase in reduction of area the interlayer pressure increased. But, it was found that the friction coefficient of die does not have a role in interlayer pressure changes.

### 1- مقدمه

اقتصادی و خواص فیزیکی مناسب‌تر هستند [1]. به‌عنوان مثال، یک ماده مرکب مس - آلومینیوم می‌تواند در حدود 50 درصد کاهش وزن نسبت به نوع تک فلزی با خواص الکتریکی یکسان داشته باشد. این در حالی است که قیمت آن نیز در حدود 30-50 درصد نسبت به آلیاژهای مسی کاهش می‌یابد [2].

به دلیل ویژگی‌های میله‌های مرکب کاربرد و تقاضای آن در صنایع گوناگون به طور پیوسته در حال افزایش است [3]. تحقیق بر روی ساخت مواد مرکب یکی از موضوعات برجسته و به روز است. در مواد مرکب فلزی تمرکز زیادی بر مواد با ترکیب مس و آلومینیوم وجود دارد. البته این مواد

در مفتول‌های دو فلزی از ویژگی‌های دو فلز در یک مفتول مرکب استفاده می‌شود. جنس پوسته و هسته این میله‌ها معمولاً از مس، آلومینیوم یا فولاد است. یک نوع از این میله‌ها دارای هسته‌ی آلومینیوم و پوسته‌ی مسی است که در انتقال جریان الکتریکی در فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرکانس بالا اثر پوستی موجب می‌شود جریان از سطح سیم عبور کند. بنابراین از مس با هدایت الکتریکی بالاتر و مقاومت به خوردگی بهتر نسبت به آلومینیوم، در پوسته و آلومینیوم با چگالی کمتر در هسته استفاده می‌شود. مفتول‌های مرکب نسبت به مفتول‌های از جنس مس و یا آلومینیوم، به لحاظ

مفتول مرکب مس-آلومینیوم<sup>1</sup> از نظر استاندارد است. یکی از پارامترهای موثر بر کیفیت این اتصال نیروی فشرده‌گی بین لایه‌ای در حین فرآیند تولید می‌باشد [10]. در فرآیند تولید مدنظر، فشار بین لایه‌ای در حین فرآیند کشش ایجاد می‌شود. لذا بررسی اثر پارامترهای مختلف فرآیند کشش بر این فشار و انتخاب پارامترهای بهینه برای نیل به حداکثر فشار بین لایه‌ای، هدف تحقیق حاضر می‌باشد. در این تحقیق مفتول با هسته از جنس آلومینیوم خالص و پوشش از مس خالص به صورت درزدار ساخته شده است. پس از چند مرحله کشش قطر مفتول به مقدار 9.5 میلی‌متر کاهش داده شده است. آزمون کشش مفتول جهت بررسی نیرو با ضرایب اصطکاک مختلف انجام شده است. تحلیل در ناحیه پلاستیک به روش قاچی<sup>2</sup> انجام شده و از آن نیروی کشش و فشار بین لایه‌ای به دست آمده است. در این تحقیق فرآیند تولید به صورت پایدار مدنظر است و نسبت مساحت پوسته به کل مقطع در طول محصول ثابت است. بنابراین، با توجه به قانون بقای جرم برای ناحیه پلاستیک، در هر مقطع باید حاصل ضرب سرعت در مساحت مقطع هسته و پوسته به طور جداگانه برابر مقداری ثابت باشد. بنابراین در این حالت، لغزش بین هسته و پوسته وجود ندارد و در تحلیل، بیشترین ضریب اصطکاک که نشان‌دهنده اتصال بدون لغزش است، برای ناحیه بین لایه‌ای لحاظ شده است.

## 2- تحلیل

به منظور تعیین فشار بین لایه‌ای مفتول مرکب دو لایه مس - آلومینیوم در ناحیه پلاستیک قالب، روش قاچی از جمله روش‌های تحلیلی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تحلیل به این روش، ناحیه خمیری و فصل مشترک مواد به صورتی که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است. معادلات تعادل به صورت مجزا برای هسته و پوسته با توجه به دو جزء مجزای در نظر گرفته شده، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده، نوشته می‌شود. پس از حل معادلات، نیروی فرآیند و فشار بین لایه‌ای تعیین می‌گردد. تحلیل صورت گرفته، با الگو از تحلیل تعادل نیروهای اکستروژن لوله مرکب توسط چیتکارا، انجام شده است [11].

با توجه به شکل 2 معادله تعادل برای جزء هسته در راستای z به صورت معادله (1) خواهد بود. پارامترها و متغیرهای این معادله بر روی دو شکل 1 و 2 نشان داده شده است.

$$\sigma_{zc} F(z)^2 \pi - (\sigma_{zc} + d\sigma_{zc}) (F(z) - dF(z))^2 \pi - P_2 \sin(\beta) \left( 2\pi F(z) \frac{dz}{\cos(\beta)} \right) - \tau_2 \cos(\beta) \left( 2\pi F(z) \frac{dz}{\cos(\beta)} \right) = 0 \quad (1)$$

با توجه به شکل 2 می‌توان نوشت:

$$\tan(\beta) = \frac{dF(z)}{dz} = \hat{F}(z) \quad (2)$$

با تقسیم معادله (1) بر dz و با استفاده از رابطه (2) و نیز با حذف دیفرانسیل‌های مرتبه بالا، رابطه عبارت است از:

$$\frac{d\sigma_{zc}}{dz} = \frac{-2(\sigma_{zc} F(z) \hat{F}(z) + P_2 \hat{F}(z) F(z) + \tau_2 F(z))}{F(z)^2} \quad (3)$$

معادله تعادل هسته در راستای شعاع عبارت است از:

$$\sigma_r 2\pi F(z) dz - P_2 \cos(\beta) \left( 2\pi F(z) \frac{dz}{\cos(\beta)} \right) + \tau_2 \sin(\beta) \left( 2\pi F(z) \frac{dz}{\cos(\beta)} \right) = 0 \quad (4)$$

می‌توانند به صورت ورق یا میله یا اشکال دیگر باشند. برخی فرآیندهای ساخت مواد مرکب مس - آلومینیوم در حالت جامد عبارتند از: جوش کاری انفجاری و جوش کاری اصطکاکی که این دو دماهای بالایی نیاز دارند و مناسب تولید انبوه، مخصوصاً برای مفتول‌ها نیستند. نورد و اکستروژن دوفلزی از جمله روش‌هایی هستند که معمولاً تنش‌های پس ماند زیادی در محصول باقی می‌گذارند و مناسب تولید به ترتیب برای ورق‌ها و پروفیل‌ها هستند [4].

فرآیند کشش مفتول معمولاً برای تولید مفتول‌ها و سیم‌ها با قطرهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوربان فرآیند کشش مفتول‌ها و لوله‌های مرکب چند لایه را مورد بررسی قرار داد. وی در تحلیل خود تعداد نامحدود لایه در نظر گرفت. جریان در ناحیه پلاستیک را به صورت کروی فرض کرد و مواد را صلب - پلاستیک کامل و بدون لحاظ کارسختی در نظر گرفت. وی تنش ماکزیمم را طی فرآیند کشش برای میله‌های دوفلزی فولاد - مس و فولاد - برنج به صورت تجربی تعیین کرد. در مقایسه با تئوری خود به این نتیجه رسید که نتایج تئوری تنها تا مقدار کرنش موثر 0.16 با نتایج تجربی تطابق دارد [5]. رقب و همکارانش طی مقاله‌ای، فرآیند کشش مفتول مرکب فولاد-مس و فولاد- برنج را مورد مطالعه قرار دادند. در کار تجربی آن‌ها هسته از جنس فولاد ساختمانی و پوشش به صورت لوله‌های مسی و برنجی در نظر گرفته شد. طی تحقیق آن‌ها اثر نسبت کاهش سطح مقطع بر نیروی کشش و کرنش محوری بررسی شد. آن‌ها نشان دادند همواره با افزایش این نسبت، نیروی کشش و کرنش محوری افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند در شرایط استفاده از روان‌کار، اختلاف کرنش بین لایه‌ای بیشینه، برای مفتول مرکب فولاد-مس و فولاد- برنج در نسبت کاهش سطح مقطع حدود 20 درصد بوجود می‌آید. آن‌ها همچنین در بررسی فشار بین قالب و مفتول و همچنین فشار بین هسته و پوسته دریافتند که با افزایش ضریب اصطکاک بین قالب و مفتول فشار بین مفتول و قالب و همچنین فشار بین دو لایه فولاد و پوشش مسی کاهش می‌یابد [6]. طاهری بر روی کشش نوار سه لایه بدون اتصال در قالب گوه‌ای مطالعاتی انجام داد. وی تحقیق خود را به روش حد بالایی انجام داده و بین لایه‌ها لغزش در نظر گرفت. او نتایج تحلیل خود را با کار تجربی بر روی نوار سه لایه آلومینیوم - مس - آلومینیوم مقایسه کرده و تطابق خوبی میان نتایج آزمایشی و تحلیل گزارش کرد [7]. کو و همکارانش تغییرات ضخامت لایه مس طی فرآیند کشش مفتول مرکب فولاد-مس را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها اثر نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح مقطع بر حداکثر آسیب به پوشش و تغییرات پوشش طی فرآیند کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که در قالب با زاویه کوچک‌تر تغییرات درصد پوشش کمتر است [8]. لی و همکارانش اثر عملیات حرارتی را بر ریزساختار و هدایت الکتریکی مفتول مرکب فولاد-مس تحت کشش سرد مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن‌ها با افزایش دمای عملیات حرارتی، علاوه بر افزایش مقاومت الکتریکی سیم مرکب میزان نفوذ بین لایه‌ای افزایش می‌یافت، به طوری که میزان نفوذ در عملیات آنیل 800 درجه سانتی‌گراد به دو برابر میزان خود در حالت بدون عملیات حرارتی می‌رسید. در تحقیق آن‌ها بیان شد که در سیم با قطر کمتر که تحت تغییر شکل شدیدتری قرار گرفته است، میزان نایجایی‌ها و انرژی ذخیره شده بیشتر است که منجر به افزایش نفوذ بین لایه می‌شود [9].

اتصال بین پوسته مس و هسته آلومینیوم یکی از معیارهای مهم کیفیت

1- Copper clad Aluminum wire rod

2- Slab Method



تغییر شکل یکسان خواهد بود. با توجه به شکل 1 و مقدار بیان شده:

$$V_b R_{sb}^2 \tan(\alpha) = cte \quad (30)$$

در تحلیل در همه موارد  $R_{sb}$  یکسانی در نظر گرفته شده و در بررسی اثر زاویه، برای داشتن نرخ کرنش ثابت، سرعت کشش متفاوت باید مد نظر باشد. با توجه به رابطه (28) و تعریف سرعت و قانون پیوستگی و انتگرال گیری از  $R_{sb}$  تا  $R_{sp}$  برای  $R(z)$  و از 0 تا T برای  $t$ :

$$V_b A_b T = \frac{\pi(Z_2 - Z_1)}{3(R_{sb}^3 - R_{sp}^3)} (R_{sb}^3 - R_{sp}^3) \quad (31)$$

با انتگرال گیری از رابطه (25) و جایگزینی در رابطه (31) و با وارد کردن رابطه  $\epsilon = \ln\left(\frac{A_b}{A_p}\right)$ ، برای محاسبه سرعت کشش با داشتن یک نرخ کرنش متوسط:

$$V_p = \frac{\dot{\epsilon}(R_{sb}^3 - R_{sp}^3)}{6R_{sb}^2 \ln\left(\frac{R_{sb}}{R_{sp}}\right) \tan(\alpha)} \left(\frac{R_{sb}^2}{R_{sp}^2}\right) \quad (32)$$

بنابراین برای قابل مقایسه بودن تحلیل‌ها، باید تغییرات نرخ کرنش در ناحیه پلاستیک برای همه موارد یکسان باشد. با محاسبه سرعت کشش از رابطه (32) با نرخ کرنش ثابت می‌توان به این هدف رسید.

به هر حال نیروی کشش و فشار بین دو لایه با استفاده از روابط (18)، (23) و (24) تعیین می‌شود. جهت حل معادلات دیفرانسیل و تعیین مقادیر نیرو و فشار از نرم‌افزار Maple 18 استفاده شده است.

### 3- ساخت نمونه و آزمون‌های تجربی

مفتول مرکب مس-آلومینیوم مدنظر، دارای ویژگی‌های ابعادی مطابق استاندارد ASTM B 566 است. مطابق این استاندارد مس، 15 درصد مقطع مفتول مرکب را تشکیل می‌دهد. مس مورد استفاده برای ساخت نمونه طبق این استاندارد، مس خالص است. نوار مس با عرض 34 میلی‌متر و ضخامت 0.45 میلی‌متر طی سفارشی توسط شرکت مس باهنر کرمان تولید شده است. مفتول آلومینیوم با قطر 9.5 میلی‌متر به صورت خالص تهیه شده است. اکسید و چربی موجود بر روی نوار مس و مفتول آلومینیوم بر استحکام بین لایه‌های اثر نامطلوبی دارد [12]. نوار مس و مفتول آلومینیوم قبل از استفاده کاملاً اکسید و چربی‌زدائی شده است. برای تولید مفتول مرکب از دستگاه ساخته شده مطابق شکل 3 استفاده شد. در این دستگاه نوار مس به دور مفتول آلومینیوم طی 5 مرحله که یکی از مراحل در شکل 4 نشان داده شده است، لوله می‌شود. سپس درز لوله با استفاده از جوش تیگ<sup>1</sup> بدون پرکننده همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است در حضور گاز آرگون جوش می‌شود. امپر، قطر الکتروود تنگستن، دبی گاز آرگون، فاصله الکتروود از درز جوش، سرعت حرکت مفتول و دمای مایع خنک کننده پس از جوش از جمله پارامترهایی است که پس از انجام آزمایش‌های متعدد به صورت بهینه برای بهترین درز جوش تعیین شده است.

در مرحله بعد مفتول پوشش شده از قالب کشش عبور داده شده و فضای خالی میان هسته آلومینیومی و پوشش مسی حذف می‌شود. کار پلاستیک به نحوی است که قطر مفتول پوشش شده در این مرحله، برابر 9.5 میلی‌متر است. در شکل 6 مفتول مرکب با درز جوش پوشش مس، قبل از کشش و پس از کشش مشاهده می‌شود. مقطع میله پس از کشش یکنواخت است و درز جوش با چشم غیرمسلح بر روی سطح میله و سطح مقطع قابل مشاهده نیست. خواص مکانیکی مس و آلومینیوم در این مفتول مرکب، متاثر از کار پلاستیک ناشی از لوله شدن، تغییرهای ناشی از حرارت جوش درز، عملیات خنک کاری و کار پلاستیک ناشی از فرآیند کشش تا رسیدن به قطر 9.5

$$F(z) = R_{cb} - (z - z_1) \tan(\beta) \\ \dot{F}(z) = -\tan(\beta) \quad (20)$$

$$R_{cp} = \frac{R_{cb} R_{sp}}{R_{sb}} \quad (21)$$

$$\tan(\beta) = \frac{R_{cb} - R_{cp}}{R_{sb} - R_{sp}} \tan(\alpha) \quad (22)$$

با حل معادلات (10) و (22) و با جایگزینی روابط (19) و (20) برای روابط پروفیل قالب و مرز مشترک و با فرض  $(\sigma_{zc})_{z=z_2} = 0$  و  $(\sigma_{zs})_{z=z_3} = 0$ ، نیروی کشش در مقطع مورد نظر به دست می‌آید:

$$F = F_c + F_s \quad (23)$$

$$F_s = \sigma_{zs} (R_{sb}^2 - R_{cb}^2) \text{ at } z = z_4 \\ F_c = \sigma_{zc} R_{cb}^2 \text{ at } z = z_1 \quad (24)$$

یکی از پارامترهای مهم و تا اندازه‌ای مؤثر بر نیرو، سرعت کشش است. اثر سرعت در مقدار نرخ کرنش ایجاد شده در ماده خواهد بود و برای مواد حساس به نرخ کرنش، از اهمیت زیادی برخوردار است. چون این مواد نرخ‌های متفاوت کرنش دارای منحنی تنش کرنش متفاوت هستند، بایستی حتی‌الامکان اثر نرخ کرنش در تمام آزمایش‌ها و قالب‌ها یکسان باشد. به این ترتیب سرعت کشش باید به‌گونه‌ای تعیین شود که تغییرات نرخ کرنش در ناحیه پلاستیک تمامی قالب‌ها تقریباً یکسان باشد.

برای بررسی سرعت کشش چهار فرض مدنظر قرار گرفته است:

1- مخروطی بودن قالب

2- همگن بودن میله در حال تغییر شکل

3- حاکم بودن قانون پیوستگی

4- یکسان بودن نرخ کرنش در هر مقطع درون قالب

چنانچه نرخ کرنش به صورت مشتق کرنش نسبت به زمان مدنظر باشد:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (25)$$

دیفرانسیل کرنش با توجه به سطح مقطع قبل و بعد از کشش برابر است با:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{A_b}{A_d}\right) \Rightarrow d\epsilon = -\frac{2dR(z)}{R(z)} \quad (26)$$

در رابطه (26)،  $A_b$  مساحت میله مرکب قبل از کشش و  $A_d$  مساحت یک مقطع میله مرکب در ناحیه پلاستیک است. با توجه به تعریف رابطه سرعت مطابق  $V = \frac{dz}{dt}$  و با توجه به روابط (25) و (26):

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2dR(z)}{R(z)} V \quad (27)$$

با توجه به شکل 1 رابطه هندسی بین شعاع و طول به دست می‌آید.

$$R(z) = R_{sb} - \frac{z - Z_1}{Z_2 - Z_1} (R_{sb} - R_{sp}) \Rightarrow \\ \frac{dR(z)}{dz} = -\frac{(R_{sb} - R_{sp})}{Z_2 - Z_1} \quad (28)$$

با استفاده از قانون پیوستگی مطابق فرض انجام شده  $(V_b A_b = V_d A_d)$  و با اعمال روابط (27) و (28) رابطه بسیار مهمی که بیانگر تغییرات نرخ کرنش با شعاع یک قالب (از ورودی تا خروجی) است، به دست می‌آید:

$$\dot{\epsilon} = -\left(\frac{2}{R(z)}\right) R_{sb}^2 \left(\frac{V_b}{Z_2 - Z_1}\right) (R_{sb} - R_{sp}) \quad (29)$$

در رابطه (29) تغییرات نرخ کرنش به صورت تابعی درجه 3 از  $R(z)$  (تغییرات شعاع مخروط با  $z$ ) و وابسته به مقادیر ثابتی همچون سرعت کشش  $(V_b = \frac{A_p}{A_b} V_p)$  و شعاع ورودی و خروجی و طول قالب می‌باشد. بهترین شرایط برای مقایسه نتایج حالتی است که تغییرات نرخ کرنش با تغییرات هندسه قالب در تمام تحلیل‌ها یکسان باشد، در این صورت می‌توان ادعا کرد اثر نرخ کرنش در تمام موارد یکسان بوده است.

در رابطه (29) هرگاه در تمام موارد مقدار  $R_{sb}^2 \left(\frac{V_b}{Z_2 - Z_1}\right) (R_{sb} - R_{sp})$  برابر یک عدد ثابت باشد، تغییرات نرخ کرنش با شعاع ناحیه مخروطی در حین

1- Tig

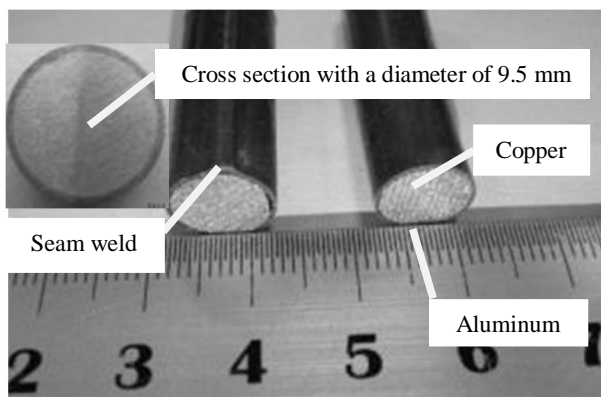


Fig 6 Copper clad aluminum wire manufactured

شکل 6 مفتول مرکب آلومینیوم- مس ساخته شده

شده در شکل 7 برای نگهداری قالب کشش استفاده شد. نگهدارنده قید و بند به فک بالایی مقید شده و مفتول مرکب تیز شده پس از عبور از قالب، به فک پایینی دستگاه متصل شده است. با حرکت فک بالایی دستگاه عملیات کشش از داخل قالب انجام می‌شود. قالب به‌کار رفته دارای نیم زاویه 15 درجه و شعاع خروجی برابر 9.2 میلی‌متر است. آزمایش با سه شرط اصطکاکی شامل خشک، روان‌کار روغن و گریس انجام گرفته است. سرعت کشش معادل 5 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

همچنین به‌منظور تعیین خواص مکانیکی مس و آلومینیوم نمونه، آزمون کشش مورد استفاده قرار گرفته است. برای قابل مقایسه بودن نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی باید خواص مس و آلومینیوم مفتول مرکب ساخته شده، با قطر 9.5 میلی‌متر تعیین شده و از این خواص برای محاسبات تحلیلی استفاده گردد.

وگا<sup>3</sup> و همکاران طی آزمون‌های کشش بر روی مس در سرعت‌های 0.5، 10، 20 میلی‌متر بر دقیقه، تفاوت در منحنی تنش- کرنش را نشان دادند [13]. بنابراین با توجه به اهمیت این موضوع و حساس بودن منحنی تنش کرنش مس نسبت به نرخ کرنش و با توجه به تفاوت نتایج در سرعت‌های مختلف، لازم است نرخ کرنش متوسط آزمون کشش بر نمونه مسی و

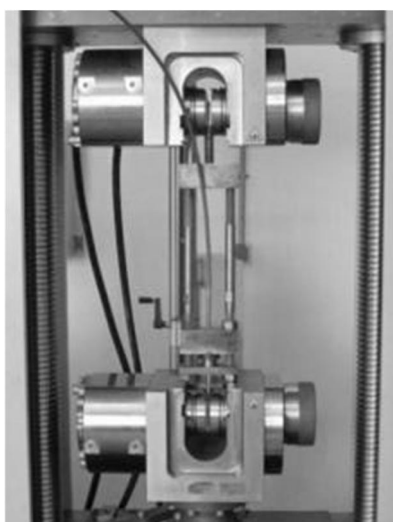


Fig. 7 Wire drawing fixture and experiment by zwick machine

شکل 7 قید و بند متصل بر دستگاه کشش زوییک در حال اجرای آزمایش کشش سیم با قالب مخروطی

میلی‌متر است. میله مرکب آماده شده برای آزمون دارای قطر اولیه 9.5 میلی‌متر است و هیچ گونه عملیات حرارتی جهت آنیل بر روی این نمونه انجام نشده است.

جهت تیز کردن نمونه برای عبور اولیه از قالب، با الگو گرفتن از کار کوچک و همکاران ابتدا قالب به سه نظام دستگاه تراش متصل شد، سپس نمونه به جای قلم به ابزار گیر بسته شده و طی فرآیند سوئیچ<sup>1</sup> به میزان لازم قطر آن کم شد [4]. برای انجام فرآیند کشش مفتول، از دستگاه آزمون کشش زوییک<sup>2</sup> مدل 6000 استفاده شده است. مجموعه قید و بند نشان داده



Fig. 3 A view of devices made for making the copper clad aluminum composite wire

شکل 3 نمایی از دستگاه ساخته شده برای ساخت مفتول مرکب مس - آلومینیوم

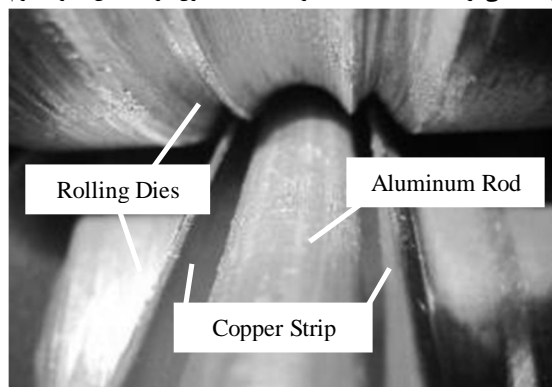


Fig 4 One of the steps of roll form machine for manufacture the copper clad aluminum wire

شکل 4 یکی از مراحل شکل‌دهی دستگاه ساخته شده برای ساخت مفتول مرکب مس - آلومینیوم

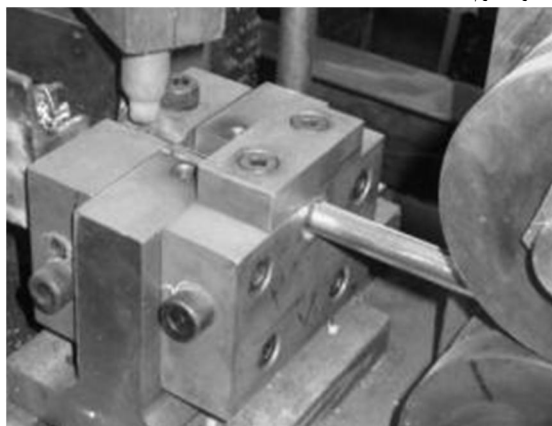


Fig. 5 Place of seam welding on machine

شکل 5 محل جوش درز پوشش مسی در دستگاه ساخته شده

3- G. Vega

1- Swaged  
2- Zwick

گرفته شده است. به طوری که در شکل 10 مشاهده می‌شود، شیب افزایش نیرو با افزایش ضریب اصطکاک برای هر دو روش تقریباً یکسان است. مقدار نیرو در ضریب اصطکاک 0.035 برای روش آزمایشگاهی 670 N و برای روش تحلیلی تقریباً 720 N بدست آمده که دارای 8.3% خطا است. در ضریب اصطکاک 0.11 برای روش آزمایشگاهی در حدود 950 N و برای روش تحلیلی مقدار نیرو در حدود 1080 N بدست آمده که دارای خطای 10.5% است. برای ضریب اصطکاک 0.14 مقدار نیروی روش آزمایشگاهی در حدود 1310 N و برای روش تحلیلی در حدود 1200 N بدست آمده که نشان‌دهنده خطای 7.2% است.

یکی از علل بروز خطا منحنی تنش کرنش مس است. مس روکش شده پس از جدا شدن از میله مرکب با قطر 9.5 میلی‌متر با کار پلاستیک تخت شده و نمونه تست کشش از آن ساخته می‌شود. این مورد موجب بروز مقداری خطا خواهد بود. علت دیگر بروز خطا فرض خطی بودن معادله فصل مشترک در ناحیه خمیری است که می‌تواند با واقعیت متفاوت باشد. در هر حال روش تحلیلی با خطای مطرح شده در حد قابل قبول است.

#### 2-4 - بررسی اثر ضریب اصطکاک قالب

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، افزایش فشار بین لایه‌ای در ناحیه پلاستیک جهت بهبود نفوذ بین لایه‌ای و در نتیجه استحکام پیوند بین لایه‌ای مطلوب

جدول 1 خواص مس و آلومینیوم منتج از آزمون کشش

Table 1 Mechanical property of copper and aluminum from tensile test.

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

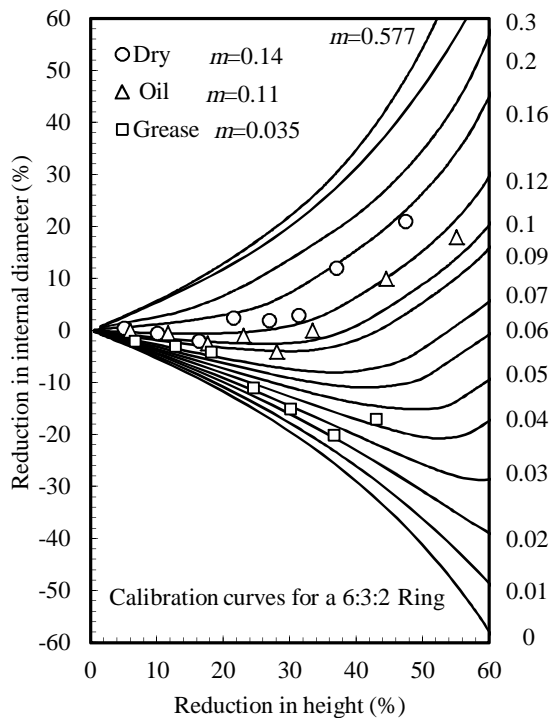


Fig. 8 Friction calibration curve [15]

شکل 8 منحنی کالیبراسیون اصطکاک [15]

آلومینیومی جهت تعیین خواص، مدنظر قرار گرفته و برای آزمون کشش مفتول به کار رود. آزمون کشش برای نمونه نوار مسی و مفتول آلومینیومی در نرخ کرنش  $0.55 \frac{1}{\text{min}}$  انجام شد، که نتایج آن با توجه به رابطه توانی لودویک<sup>1</sup> ( $\sigma = k\epsilon^n$ ) در جدول 1 نشان داده شده است.

#### 4- نتایج و بحث

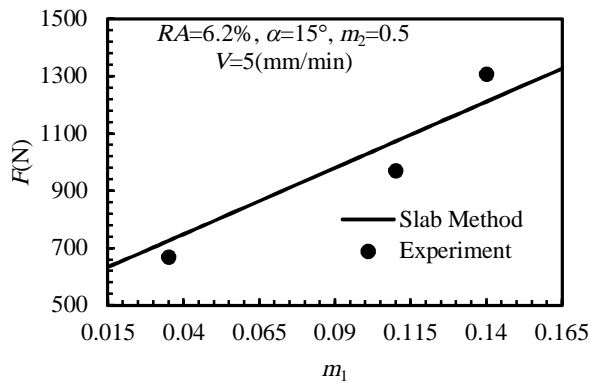
به منظور قابل مقایسه بودن نتایج آزمایش‌ها با نتایج تحلیلی، لازم است ضریب اصطکاک به صورت یک مقدار عددی تعیین شود. برای این منظور آزمون حلقه<sup>2</sup> یکی از روش‌های توصیه شده و مناسب است [14]. در این آزمون از حساس بودن جریان ماده طی تغییر شکل به ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه استفاده می‌شود. به این صورت که معمولاً در ضرایب اصطکاک کوچک در حین تغییر شکل قطر داخلی حلقه افزایش یافته در صورتی که در ضرایب اصطکاک بزرگ قطر داخلی حلقه در حین تغییر شکل کاهش می‌یابد. برای این آزمون همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، منحنی کالیبراسیون عددی تهیه شده توسط صنیعی و فاتحی مورد استفاده قرار گرفته است [15]. حلقه با نسبت نوشته شده در شکل 8 ساخته شده است. سطح میان حلقه و فشارنده صلب، مطابق شرایط اصطکاک خشک، روان‌کار روغن و گریس مدنظر قرار گرفته است. حلقه با شرایط بیان شده در چند مرحله تحت فشار قرار گرفته و در هر مرحله قطر داخلی و ارتفاع ثبت شده است. درصد کاهش ارتفاع و درصد تغییر قطر داخلی براساس پارامترهای ثبت شده، محاسبه شده است و به‌طور جداگانه برای شرایط اصطکاک مختلف بر روی منحنی کالیبراسیون وارد شده است. در شکل 8 محور افقی درصد تغییر ارتفاع و محور قائم، درصد تغییر در قطر داخلی است. به طوری که مشاهده می‌شود اصطکاک خشک دارای ضریب 0.14، روان‌کار روغن دارای ضریب 0.11 و گریس دارای ضریب 0.035 است.

#### 1-4 - نتایج آزمایش کشش مفتول و مقایسه با نتایج تحلیلی

آزمون کشش سیم با نسبت کاهش سطح مقطع 6.2 درصد انجام شده است. شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی را برای شرایط اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. به طوری که در شکل مشخص است، نیرو تا جابجایی حدود 0.5 میلی‌متر افزایشی است و بعد از آن با تغییر ناچیز تا کشش به میزان 4 میلی‌متر ثابت است. برای اصطکاک خشک نیرو در حدود 1310 N، برای روان‌کار روغن نیرو در حدود 950 N و برای روان‌کار گریس نیرو در حدود 670 N است. یکی از آزمون‌ها سه مرتبه تکرار گردیده که در شکل 9 نشان داده شده است. با مشاهده تشابه نتایج تکرار آزمایش، از تکرارپذیری بودن آزمون اطمینان حاصل شده است.

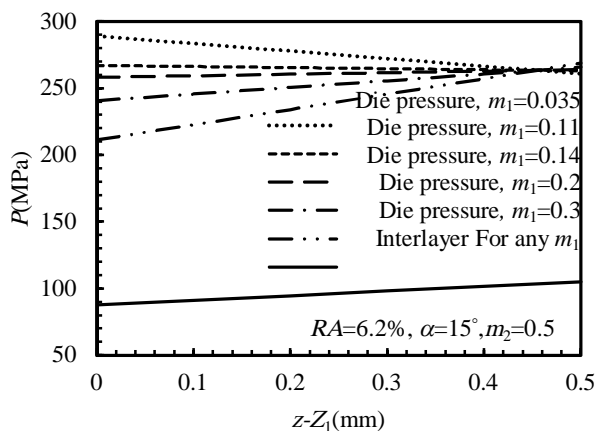
در روش تحلیلی با تعیین زاویه قالب، ضرایب اصطکاک برای تماس مفتول و قالب و همچنین تماس بین لایه‌ای و نسبت کاهش سطح مقطع مقادیر نیروی کشش، فشار بین لایه‌ای و فشار بین مفتول و قالب تعیین گردیده است. شکل 10 تغییرات نیروی کشش مفتول مرکب را با تغییرات ضریب اصطکاک سطح تماس مفتول و قالب برای روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. تحلیل با فرض عدم لغزش بین دولایه انجام شده است. بنابراین ضریب اصطکاک 0.5 که به مفهوم چسبان بودن سطح تماس است، برای این قسمت تعیین شده است. برای مقایسه دو روش در شکل 10 زاویه قالب برابر 15 درجه و نسبت کاهش سطح مقطع برابر 6.2 درصد در نظر

1- Ludwick's Power Law  
2- Ring Test



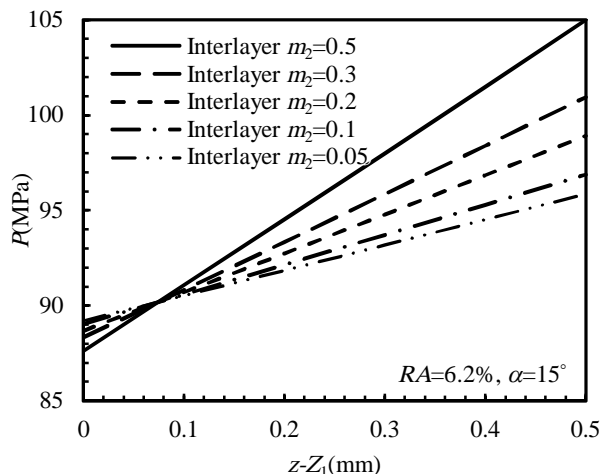
**Fig. 10** Drawing force changes with die coefficient friction changes

شکل 10 تغییرات نیروی فرآیند کشش با تغییر ضریب اصطکاک قالب



**Fig. 11** Interlayer pressure and die pressure changes in die length at z direction with die coefficient friction changes.

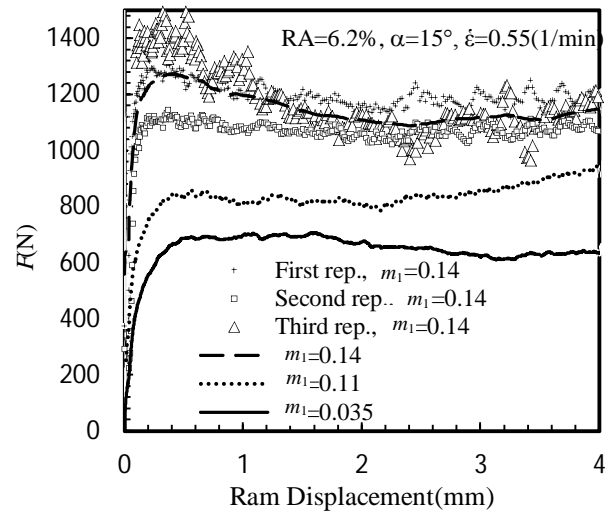
شکل 11 تغییرات فشار بین لایه‌ای و فشار بین قالب و مفتول در طول قالب در جهت Z با تغییر ضریب اصطکاک قالب.



**Fig. 12** Interlayer pressure changes in die length at z direction with interlayer coefficient friction changes

شکل 12 تغییرات فشار بین لایه‌ای در طول قالب در جهت Z با تغییر ضریب اصطکاک بین لایه‌ای

برای تمام ضرایب اصطکاک بین لایه‌ای فشار بین لایه‌ای در طول قالب به



**Fig. 9** Force-Displacement curve for various die coefficient friction in experiment

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی برای ضرایب اصطکاک قالب مختلف حاصل آزمایشات تجربی

است. به این منظور اثر ضریب اصطکاک بین لایه‌ای، ضریب اصطکاک بین مفتول و قالب، نیم زاویه قالب و نسبت کاهش سطح بر فشار بین لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل 11 تغییرات فشار در طول قالب در راستای محور z نشان داده شده است. این تغییرات نیز برای فرآیند کشش در قالب با زاویه 15 درجه و نسبت کشش 6.2 درصد با ضریب اصطکاک 0.5 در نظر گرفته شده است. تغییر ضریب اصطکاک قالب ( $m_1$ ) اثری در تغییرات فشار بین لایه‌ای در طول قالب ندارد. فشار بین لایه‌ای از ورودی قالب تا خروجی به صورت خطی افزایش یافته است. به طوری که فشار بین لایه‌ای در ورودی قالب در حدود 88 MPa و در خروجی قالب در حدود 120 MPa مشاهده می‌شود. فشار قالب نیز در حدود 20 درصد طول نزدیک به خروجی قالب برای تمام ضرایب اصطکاک قالب، یکسان و در حدود 260 MPa است.

اما این مقدار در ورودی قالب با تغییر ضریب اصطکاک قالب تغییر می‌کند. به طوری که با افزایش ضریب اصطکاک فشار در ورودی کاهش می‌یابد. در ضریب اصطکاک 0.035 فشار ورودی در حدود 300 MPa و در ضریب اصطکاک 0.3 این فشار به حدود 210 MPa کاهش می‌یابد. تغییرات فشار قالب نیز مانند فشار بین لایه‌ای در طول قالب در راستای محور z به صورت خطی است. به طوری که در شکل 11 مشاهده می‌شود، در اصطکاک 0.14 فشار قالب در طول آن بدون تغییر و معادل 210 MPa است. بنابراین با توجه به ضریب اصطکاک خشک به دست آمده از آزمون حلقه که معادل 0.14 است، نتیجه‌گیری می‌شود، در این حالت فشار قالب در طول آن یکسان و برابر 210 MPa است.

#### 3-4 - بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین لایه‌ای

در شکل 12 اثر تغییرات ضریب اصطکاک بین لایه‌ای بر روی تغییرات فشار بین لایه‌ای در ناحیه پلاستیک در طول قالب نشان داده شده است. در این حالت نیز زاویه قالب برابر 15 درجه و نسبت کاهش سطح مقطع برابر 6.2 درصد در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار در طول قالب در راستای محور z نشان داده شده است. این تغییرات برای ضرایب اصطکاک بین لایه‌ای مختلف 0.5، 0.3، 0.2، 0.1، 0.05 مورد بررسی قرار گرفته است.

فشار بین لایه‌های بیشینه، مطلوب است. در صورتی که فشار کمینه بین قالب و مفتول حالت مطلوب است. همچنین نیروی فرآیند نیز هر چه کمتر باشد مطلوب‌تر است. بنابراین با بررسی روند تغییرات این سه پارامتر، نیم زاویه 60 درجه به‌عنوان بهترین گزینه برای فرآیند کشش مفتول مرکب پیشنهاد می‌شود.

#### 5-4- بررسی اثر نسبت کاهش سطح

نسبت کاهش سطح نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرآیند کشش سیم است. تغییرات فشار بین لایه‌های، فشار بین قالب و مفتول و نیروی فرآیند کشش با نسبت کاهش سطح مقطع برای دو نیم زاویه قالب 15 درجه و 60 درجه در شکل 14 نشان داده شده است. در این بررسی ضریب اصطکاک بین لایه‌های به صورت چسبان و برابر 0.5 و ضریب اصطکاک بین قالب و مفتول برابر 0.035 در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار بین لایه‌های، فشار بین قالب و مفتول و نیروی فرآیند کشش سیم در محدوده 5 تا 30 درصد کاهش سطح مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. افزایش نسبت کاهش سطح مقطع برای زاویه 15 درجه موجب افزایش حدود 20 درصد در فشار بین لایه‌های شده است. در زاویه 60 درجه نیز تغییرات فشار بین لایه‌های با افزایش نسبت کاهش سطح، افزایش می‌یابد و این افزایش بیشتر از زاویه 15 درجه و در حدود 25 درصد می‌باشد. در این حالت فشار بین لایه‌های بیشینه در حدود 200 MPa است.

به طوری که در شکل 14 مشاهده می‌شود، افزایش نسبت کاهش سطح مقطع از 10 درصد به 30 درصد در نیم زاویه 15 درجه باعث افزایش فشار بین قالب و مفتول به صورت خطی می‌گردد. به طوری که در نسبت 10 درصد مقدار این فشار 340 MPa و در نسبت 30 درصد به حدود 580 MPa افزایش می‌یابد. اما همین تغییرات برای زاویه 60 درجه به صورت غیرخطی است، به طوری که در نسبت 10 درصد فشار بین قالب و مفتول حدود 300 MPa، در محدوده نسبت 15 الی 20 درصد تقریباً ثابت و برابر 340 MPa و در نسبت 30 درصد در حدود 400 MPa می‌باشد.

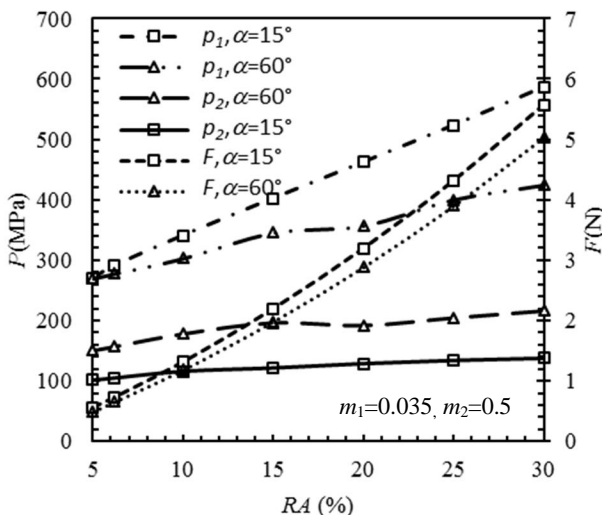


Fig. 14 Interlayer pressure, the pressure between the die and wire and drawing force with reduction in area

شکل 14 تغییرات فشار بین لایه‌های، فشار بین قالب و مفتول و نیروی کشش با تغییر نسبت کاهش سطح

در شکل 14 تغییرات نیروی فرآیند کشش سیم با افزایش نسبت کاهش سطح

صورت خطی افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب اصطکاک، شیب این تغییر بیشتر می‌شود. به طوری که در ورودی قالب تغییرات فشار ناشی از تغییرات ضریب اصطکاک بین لایه‌های از 88 MPa تا 89 MPa تغییر کرده است. در ضریب اصطکاک بین لایه‌های 0.05 مقدا فشار بین لایه‌های در خروجی قالب در حدود 96 MPa است. با افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌های به 0.5، فشار بین لایه‌های در خروجی به حدود 105 MPa افزایش می‌یابد.

تغییرات ضریب اصطکاک از 0.05 به 0.5 موجب 9 درصد تغییر در مقدار فشار بین لایه‌های در خروجی قالب می‌شود و این تغییرات برای ورودی قالب کمتر از 1 درصد است.

#### 4-4- بررسی اثر نیم زاویه قالب

یکی از مهمترین پارامترهای فرآیند کشش سیم، نیم زاویه قالب است. اثر نیم زاویه قالب بر فشار بین لایه‌های، فشار بین قالب و مفتول و همچنین نیروی فرآیند در شکل 13 نشان داده شده است. تغییرات برای نیم زاویه قالب 5 درجه تا 80 درجه در شکل 13 رسم شده است. این تغییرات نیز در نسبت کاهش سطح ثابت 6.2 درصد، ضریب اصطکاک بین لایه‌های 0.5 و ضریب اصطکاک قالب 0.035 مورد بررسی قرار گرفته است. محور قائم سمت چپ شکل مقدار فشار و محور قائم سمت راست نیروی فرآیند را نشان می‌دهد. در بررسی تغییرات فشار بین لایه‌های مشاهده می‌شود که از زاویه 5 درجه تا حدود 60 درجه مقدار فشار بین لایه‌های با یک شیب ثابت افزایش می‌یابد. به طوری که در نیم زاویه 5 درجه مقدار فشار بین لایه‌های در حدود 100 MPa و برای نیم زاویه 60 درجه در حدود 160 MPa مشاهده می‌شود. از نیم زاویه 60 تا 80 درجه تغییرات فشار باشیب بزرگتری افزایش می‌یابد. به طوری که در زاویه 80 درجه فشار بین لایه‌های به حدود 320 MPa می‌رسد.

تغییرات فشار بیشینه بین قالب و مفتول از زاویه 5 درجه تا زاویه 20 درجه کاهشی است. به طوری که در زاویه 5 درجه این فشار بیشینه معادل 380 MPa و در زاویه 20 درجه در حدود 280 MPa است. از زاویه 20 تا 60 درجه فشار بیشینه بین قالب و مفتول تقریباً ثابت مانده و از آن به بعد روند صعودی دارد. به طوری که در زاویه 80 درجه به 380 MPa می‌رسد. روند تغییرات نیروی فرآیند کشش مفتول نیز مشابه روند تغییرات فشار بین قالب و مفتول است. به طوری که در زاویه 5 درجه این نیرو در حدود 1000 N و از زاویه 5 تا 60 درجه در حدود 700 N و در زاویه 80 درجه در حدود 800 N است.

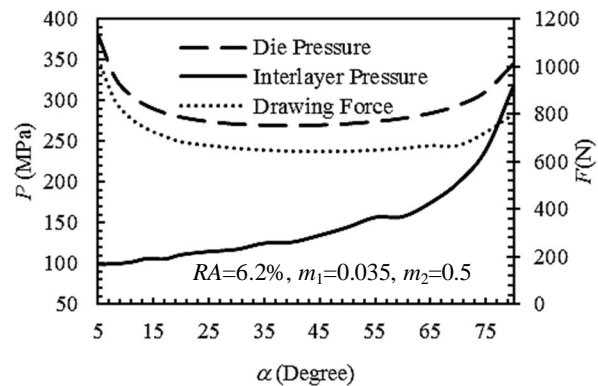
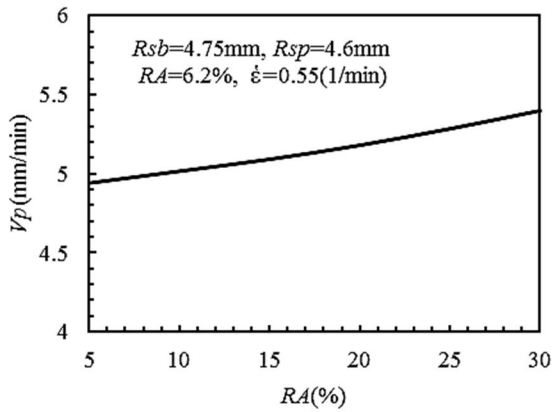


Fig. 13 Interlayer pressure, the pressure between the die and wire and drawing force with semi die angle

شکل 13 تغییرات فشار بین لایه‌های، فشار بین قالب و مفتول و نیروی کشش با تغییر نیم زاویه قالب

با توجه به مطالب بیان شده در مقدمه در طی فرآیند کشش مفتول مرکب





**Fig. 16** Velocity wire drawing with reduction in area for constant strain rate

شکل 16 تغییرات سرعت کشش سیم با تغییر نسبت کاهش سطح برای یکسان ماندن نرخ کرنش

نیروی فرآیند کشش دارای تغییرات مشابهی با نیم زاویه قالب هستند، به طوری که از زاویه 5 درجه تا زاویه 20 درجه روند تغییرات کاهشی است. از زاویه 5 درجه تا زاویه 60 درجه این فشار و نیرو تغییرات محسوسی ندارند. از زاویه 60 درجه به بعد روند تغییرات هر دو پارامتر فشار بین قالب و مفتول و نیروی فرآیند صعودی است. جهت نیل به فشار بین لایه‌ای بیشینه، فشار بین مفتول و قالب کمینه و همچنین نیروی فرآیند کمینه، نیم زاویه قالب 60 درجه بهینه‌ترین گزینه برای کشش مفتول مرکب مس-آلومینیوم است.

فشار بین لایه‌ای با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع در محدوده 10 تا 30 درصد برای دو نیم زاویه قالب 15 و 60 درجه، افزایش می‌یابد. فشار بین قالب و مفتول نیز با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع افزایش می‌یابد. این روند در زاویه 15 درجه شدید و به صورت خطی است. اما در زاویه 60 درجه این روند غیرخطی و ملایم‌تر بوده و در محدوده نسبت کاهش سطح مقطع 15 الی 20 درصد تغییرات فشار تقریباً ثابت است. بنابراین در صورت استحکام مناسب مفتول، نسبت کشش بهینه مقداری در محدوده نسبت کاهش سطح مقطع 15 تا 20 درصد است.

تغییر ضریب اصطکاک قالب تأثیری بر فشار بین لایه‌ای و فشار بین قالب و مفتول در خروجی قالب نداشته، اما افزایش این ضریب باعث کاهش فشار بین قالب و مفتول در ورودی قالب می‌گردد. افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌ای موجب افزایش فشار بین لایه‌ای در خروجی قالب می‌شود. برای نیم زاویه قالب 15 درجه و نسبت کاهش سطح مقطع 6.2 فشار بین لایه‌ای در خروجی قالب حدود 10 درصد بیش از فشار بین لایه‌ای در ورودی قالب است.

#### 6- فهرست علائم

$A_b$	مساحت میله مرکب قبل از کشش ( $\text{mm}^2$ )
$A_d$	مساحت مقطع میله مرکب در ناحیه پلاستیک ( $\text{mm}^2$ )
$A_p$	مساحت میله مرکب بعد از کشش ( $\text{mm}^2$ )
$F$	نیروی کشش (N)
$F(z)$	تابع مرز دولایه در ناحیه پلاستیک (mm)
$K$	ضریب رابطه تنش هالومان
$m_1$	ضریب برشی اصطکاک بین قالب و مفتول
$m_2$	ضریب برشی اصطکاک بین دو لایه
$n$	توان رابطه تنش هالومان

مقطع روند افزایشی و تقریباً خطی دارد. به طوری که در نسبت 10 درصد این نیرو برای هر دو زاویه 15 و 60 درجه مقدار 140 N است. در نسبت 30 درصد برای هر دو زاویه 15 و 60 درجه با اختلاف اندکی در حدود 25 N مقدار این نیرو در حدود 600 N است.

با توجه مطالب بیان شده مشخص شد، نیم‌زاویه 60 درجه نیم‌زاویه مطلوبی است. همچنین تغییرات نسبت سطح بر فشار بین لایه‌ای تأثیر چندانی ندارد، بنابراین نسبت کاهش سطح مناسب با توجه به نیرو، فشار بین قالب و مفتول و استحکام کششی مفتول تعیین می‌شود.

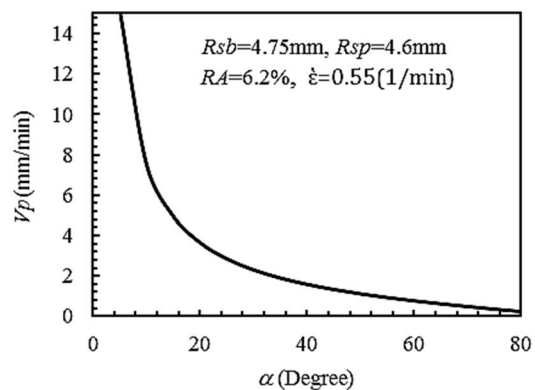
#### 4-6- بررسی تغییرات نرخ کرنش

با توجه به رابطه (32) برای یکسان بودن تغییرات نرخ کرنش در شرایط مختلف، سرعت کشش باید تغییر کند. در شکل 15 به طوری که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه قالب باید سرعت کاهش یابد. به طوری که بیشترین تغییرات سرعت مربوط به 5 الی 25 درجه است. سرعت در زاویه 5 درجه در حدود 15 mm/min و در زاویه 25 درجه به حدود 3mm/min کاهش می‌یابد. در بررسی میزان تأثیر نسبت کاهش سطح بر تغییرات مورد نیاز سرعت به منظور ثابت ماندن نرخ کرنش متوسط، به طوری که در شکل 16 مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع سرعت کشش باید افزایش یابد. اما تأثیر نسبت سطح به اندازه زاویه قالب قابل توجه نیست. به طوری که برای ثابت ماندن نرخ کرنش متوسط معادل 0.55(1/min) در نسبت کاهش سطح 5 درصد سرعت در حدود 4.9 mm/min به دست آمده و در نسبت کاهش 30 درصد این مقدار در حدود 5.4 mm/min به دست آمده است.

#### 5- نتیجه گیری

براساس بحث و بررسی انجام شده، روش قاچی یک روش مناسب جهت مطالعه نیروی فرآیند کشش مفتول مرکب و همچنین فشار بین لایه‌ای و فشار قالب است. به طوری که نتایج نیرویی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

با افزایش نیم زاویه قالب از 5 درجه تا 60 درجه، فشار بیشینه بین لایه‌ای به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. شدت این افزایش از زاویه 60 تا 80 درجه بیشتر می‌شود. به هر حال با تغییر زاویه قالب از 5 درجه به 80 درجه فشار بین لایه‌ای حدود 3 برابر می‌شود. فشار بیشینه بین قالب و مفتول و



**Fig. 15** Velocity wire drawing with semi die angle for constant strain rate

شکل 15 تغییرات سرعت کشش با تغییر نیم زاویه قالب برای یکسان ماندن نرخ کرنش

## 7-مراجع

- [1] E. Hug, N. Bellido, Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 22-23, pp. 7103-7106, 2011.
- [2] I.-K. Kim, S. I. Hong, Effect of heat treatment on the bending behavior of tri-layered Cu/Al/Cu composite plates, *Materials & Design*, Vol. 47, No. 1, pp. 590-598, 2013.
- [3] 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. 645-649, 2012.
- [4] R. Kocich, A. Machackova, L. Kuncicka, F. Fojtik, Fabrication and characterization of cold - swaged multilayered Al - Cu clad composites, *Materials & Design*, Vol. 71, No. 1, pp. 36-47, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] D. C. Ko, S. K. Lee, B. M. Kim, H. H. Jo, H. Jo, Evaluation of copper coating ratio in steel/copper clad wire drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 22-26, 2007.
- [9] 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.
- [10] A. Gueydan, B. Domengès, E. Hug, Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires after thermal aging, *Intermetallics*, Vol. 50, No. 1, pp. 34-42, 2014.
- [11] N. R. Chitkara, A. Aleem, Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and application of a generalised slab method of analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 1, pp. 2857-2882, 2001.
- [12] 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, No. 1, pp. 306-314, 2014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

$P_1$	فشار بین قالب و مفتول (MPa)
$P_2$	فشار بین لایه‌های (MPa)
$R$	متغیر شعاع (mm)
$RA$	نسبت کاهش سطح مقطع
$R(z)$	تابع شعاع مخروط قالب (mm)
$V$	سرعت رام (mm/min)
$V_b$	سرعت جریان ماده هسته و پوسته قبل از کشش (mm/min)
$V_d$	سرعت جریان ماده هسته و پوسته در ناحیه پلاستیک (mm/min)
$V_p$	سرعت جریان ماده هسته و پوسته بعد از کشش (mm/min)
$z$	متغیر طول (mm)
$Z_1, Z_4$	فاصله ورودی قالب از مبدا (mm)
$Z_2, Z_3$	فاصله خروجی قالب از مبدا (mm)

## علائم یونانی

$\alpha$	نیم زاویه قالب (Degree)
$\beta$	زاویه مرز لایه‌ها در ناحیه پلاستیک (Degree)
$\epsilon$	کرنش حقیقی
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش (1/min)
$\tau_1$	تنش برشی بین قالب و مفتول (MPa)
$\tau_2$	تنش برشی بین لایه‌های (MPa)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	تنش‌های اصلی (MPa)
$\sigma_{mc}$	تنش تسلیم متوسط (MPa)
$\sigma_{r1}$	تنش شعاعی در سطح تماس قالب و مفتول (MPa)
$\sigma_{r2}$	تنش شعاعی در سطح تماس دو لایه (MPa)
$\sigma_z$	تنش عمودی در راستای طول (MPa)

## زیرنویس‌ها

b	مفتول قبل از ورود به قالب
c	هسته
p	مفتول پس از خروج از قالب
s	پوسته