

ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س



mme.modares.ac.ir

## بررسی تجربی فرایند شکلدهی لولههای آلومینیومی با روش دمش گاز در دماهای بالا و تولید قطعات با سطح مقطع مربعی

مهرداد نصرالله زاده<sup>1</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>2\*</sup>، سیدجلال هاشمی<sup>3</sup>، بهنام عباسزاده<sup>4</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>5</sup>

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

5 - دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی moslemi@modares.ac.ir ،14115-143

| چکیدہ   | اطلاعات مقاله   |
|---|---|
| در سالهای اخیر استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن و مقاومت بالا در برابر خوردگی در صنایع هوا<br>فضا و خودروسازی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مشکل اصلی در کاربرد این آلیاژها شکلپذیری کم در دمای اتاق میباشد. برای رفع این | مقاله پژوهشی کامل<br>دریافت: 30 شهریور 1394<br>پذیرش: 29 مور 1394 |
| مشکل از شکلدهی در دماهای بالا استفاده می شود. از آنجا که دمای مقاومت حرارتی روغن بیشتر از $ m C^{\circ}300$ نمی باشد، برای شکلدهی در  | پدیوس. 25 مهر ۲۵۶۹<br>ارائه در سایت: 14 آذر 1394                  |
| — دماهای بالا باید از سیالات دیگر مانند هوا و گاز نیتروژن استفاده کرد. در این پژوهش، تجهیزات شکل دهی دمشی در دماهای بالا ساخته شده و  | کلید واژگان:  |
| تغییر مقطع لولههای ألومینیومی AA6063 از دایره به مربع به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصله در دمای محیط  | آلومينيوم   |
| مقایسه شده است. پس از تولید قطعات مربعی توزیع ضخامت، شعاع گوشه، فشار شکلدهی و اثر زمان اعمال فشار بر شکلگیری گوشههای  | شکلدهی با دمش گاز در دمای بالا                                    |
| نمونههای تولید شده در دماهای مختلف باهم مقایسه شد و محل وقوع پارگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد با افزایش دما،  | قطعه مربعى  |
| کاهش محسوسی در شعاع شکل گرفته شده و فشار شکل دهی به وجود آمده، به طوری که شعاع از mm19.5 در دمای محیط با فشار   |   |
| شکلدهی bar154 به mm5.8 در دمای $ m C^{\circ}500$ با فشار شکلدهی bar11 میرسد. همچنین با افزایش زمان اعمال فشار و در واقع   |   |
| کاهش سرعت فرایند، گوشههای شکل گرفته شده تیزتر شده است. با بررسی پارگی مشاهده شده است که اکثر پارگیها در ناحیه تبدیل مقطع  |   |
| دایره به مربع که دارای بیشترین تغییر شکل و کرنش کششی است اتفاق افتاده است.  |   |

# Experimental investigation of Aluminum tubes hot gas forming and production of square cross-section specimens

Mehrdad Nasrollahzade<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>1\*</sup>, Seyed Jalal Hashemi<sup>2</sup>, Behnam Abbaszadeh<sup>1</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IR Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, IR Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, IR Iran.

\*P.O.B. 14115-143, Tehran, moslemi@modares.ac.ir

#### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 21 September 2015 Accepted 21 October 2015 Available Online 05 December 2015

#### ABSTRACT

In recent years, aluminum, magnesium and titanium alloys have become highly regarded in the aerospace and automotive industries due to their high strength to weight ratio and resistance to

#### Keywords: Aluminum Gas Forming At High Temperatures Square Parts

corrosion. The main problem of the use of these alloys is their low formability at room temperature. To solve this problem, the metal forming process is done at high temperatures. Since oil's heat resistant temperature is not more than 300°C, other fluids such as air and nitrogen gas should be used at high temperatures. In this study, blow forming equipment at high temperatures has been developed, and changing of AL6063 tubes cross-section from circular to square is experimentally investigated and compared with the results of the experiments at room temperature. After producing square products, thickness distribution, corner radius, forming pressure, and effect of pressure time in corner radius at different temperatures were compared and the location of bursting was also examined. The results indicated that by increasing temperature, formed radius and pressure time significantly reduce, so that the amount of radius decreases from 19.5 mm at the temperature of 25°C and 154 bar forming pressure, to 5.8 mm in the temperature of 500°C at 11 bar forming pressure. The results showed that by increasing time pressure, which causes velocity of process to decrease, the formed corners become sharper. By investigating burst of specimens, bursting occurs in the area of converting circular cross section to square one, which has a high deformation and tensile strain.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Nasrollahzade, H. Moslemi Naeini, S. J. Hashemi, B. Abbaszadeh, J. Shahbazi Karami, Experimental investigation of Aluminum tubes hot gas forming and production of square cross-section specimens, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 435-442, 2015 (In Persian)

#### 1- مقدمه

در روشهای سنتی برای تولید قطعات مربعی که به صورت یکپارچه با سطح مقطع دایروی هستند، ابتدا با روش خم کاری، با چند خم متوالی ورق صاف را به شکلی با سطح مقطع مربع درمیآورند؛ سپس دو انتهای ورق را به هم جوش میدهند؛ در نهایت قطعه مربعی تولید شده را با استفاده از جوش به لوله متصل مىكنند. اين روش معايب فراوانى دارد، از جمله زمانبر بودن فرايند، بالا بودن هزينه توليد، دقت ابعادي يايين محصول نهايي، وزن بالاي قطعه، وجود عيوب متعدد در خط جوش و غير يكنواختي خواص قطعه به علت وجود جوش. برای برطرف کردن این عیوب و تولید قطعهای پیوسته، در سالهای اخیر، محققان تحقیقاتی را در زمینه هیدروفرمینگ این قطعات انجام دادهاند و توانستهاند قسمت عمدهای از معایب روش سنتی را برطرف كنند. هيدروفرمينگ لوله داراي پيشينه تقريبا صد ساله ميباشد ولي كاربرد آن در صنعت از حدود دو دهه پیش آغاز شده است. کاربردهای این روش شکل دهی شامل ساخت قطعات لوله ای شکل بکار رفته در موتور و سیستمهای خروج گاز میباشد. علاوه براین، تعداد زیادی از قطعات شاسی و بدنه مانند قطعات در و کایوت نیز با فرایند هیدروفرمینگ تولید می شوند. مزيت اصلى اين فرايند بالا بردن نسبت استحكام به وزن قطعات مىباشد. از مزیتهای دیگر این فرایند می توان به هزینه کمتر تجهیزات، عملیات اضافی کمتر پس از تولید، دقت ابعادی بالاتر و برگشت فنری کمتر و همچنین کاهش دور ریز اشاره کرد [1]. این فرایند بر خلاف فرایند اکستروژن، قادر به توليد قطعاتي توخالي با سطح مقطع متغير ميباشد. موفقيت اين فرايند در گرو پارامترهای دخیل در فرایند میباشد. این پارامترها عبارتند از فشار داخلی، تغذیه محوری، ضریب اصطکاک و شکل پذیری ماده. برای تولید قطعهای سالم ضروری است تمام این پارامترها به طور دقیق و صحیح انتخاب شود. شکل 1 نمایی از فرایند هیدروفرمینگ لوله را نشان میدهد.

کاهش وزن قطعات مورد استفاده در صنعت حمل و نقل، یکی از مهم ترین روشهای صرفه جویی در انرژی و کاهش گازهای گلخانهای است. در سالهای اخیر استفاده از آالیاژهای منیزیم و آلومینیم با توجه به لزوم تولید قطعاتی با وزن پایین و مقاومت در برابر خوردگی در صنعت خودرو و هوافضا مورد توجه قرار گرفته است. مشکل اصلی در کاربرد این آلیاژها، شکل پذیری پایین آنهاست. به دلیل وجود درصد بالای عناصر آلیاژی در آلیاژهای آلومینیوم و ساختار بلوری ششوجهی فشرده (HCP) در منیزیم، این فلزات دارای شکلپذیری پایین در دمای اتاق به دلیل کاهش تعداد صفحات لغزش مىباشند [2]. از اينرو، توليد قطعاتى با هندسه پيچيده از اين آلياژها، به سختی توسط روشهای شکلدهی سرد سنتی انجام می شود. یکی از روش-های مؤثر برای افزایش شکل پذیری این آلیاژها، بالا بردن دمای فرایند و درنتيجه افزايش سيستمهاى لغزشي ميباشد. بدين منظور محققان از روش هیدروفرمینگ گرم با استفاده از سیال روغن استفاده کردهاند، اما این روش



شکل 1 فرایند هیدروفرمینگ لوله [4]

فرایند شکل دهی در دمای بالا انجام دادهاند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره شده است.

لی و همکارانش هیدروفرمپذیری لولههای آلومینیومی (AA7075) بین دمای اتاق تا دمای 300°C را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده هیدروفرمپذیری با افزایش دما زیاد میشود [5]. کیگلر و همکارانش شکل پذیری، توزیع ضخامت دیواره و ریزساختار قبل و بعد از انجام فرایند و توزیع کرنش در دماهای بالا برای یک آلیاژ آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند [6]. یوان و همکارانش تأثیر دما را بر روی خواص مکانیکی لولههای آلومینیومی (5A02) بصورت تجربی در فرایند هیدروفرمینگ لوله و آزمایش کشش تک محوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج هر دو آزمایش نشان داد که تغییر طول و شکلپذیری لولهها در دماهای بالا افزایش مییابد. بیشترین برآمدگی لولهها در دماهای بین C°200 تا 300°C به دست آمد [7]. چویی و همکارانش یک مدل تحلیلی برای تعیین تأثیر شرایط فرایند مانند دما، فشار هیدرولیکی، سرعت سنبه و نیروی ورق گیر در فرایند کشش عميق هيدرومكانيكي ارايه دادند. مدل اجزاى محدود نيز براى تاييد نتايج تحلیل توسعه داده شد. بر اساس نتایج به دست آمده بحرانی ترین نقطه برای پارگی گوشه سنبه در نظر گرفته شد [8]. ضوئی و همکاران فرایند شکلدهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند با افزایش دما شکل پذیری افزایش می یابد و فشار مورد نیاز شکل دهی کاهش می یابد [9]. سید کاشی و همکاران اثر ابعاد لوله، شعاع گوشه و نرخ کرنش بر میزان فشار داخلی بهینه و جابجایی محوری مورد نیاز برای شکلدهی لولههای آلومینیومی در دمای 300°C مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم بازپخت منحنیهای بارگذاری فشار و نیروی محوری را بهینه ساختند [10]. هی ژئو و همکارانش شکل پذیری و میکروساختار آلیاژ AA6061 م انواع با، گہ ھا در دمای بالا را 

| الومينيوم AA0001 و أنواع پار کېها در دماي بالا را مورد بررسي قرار دادند. |
|--|
| در این مطالعه برآمدگی آزاد لولههای آلومینیومی در دماهای $^{ m oc}$ 350 - |
| 500°C درجه سانتیگراد به روش دمش گاز انجام شده است. نتایج نشان            |
| میدهد که با افزایش دما فشار ترکیدگی به شدت کاهش مییابد و سختی            |
| ویکرز نیز در مکان پارگی افزایش مییابد[11,3]. لیو گنگ و همکاران بر روی    |
| شکلدهی گرم لولهها با استفاده از دمش گاز با توزیع دمای غیر یکنواخت        |
| لولههای نازک با نسبت انبساط کم کار کردند. سیستم کار آنها به این صورت     |
| بوده که از سیستم خنکاری در دو انتهای لوله (محل اعمال تغذیه محوری)        |
| استفاده کردند و در منطقه تغییر شکل نیز از سیستم گرمایشی استفاده          |
|  |

| این محدودیت را دارد که به علت مقاومت گرمایی پایین روغن، نمی توان           |
|--|
| دمای فرایند را به بیش از 300°C سانتی گراد رساند [3]. به دلیل عدم وجود      |
| سیال مناسب با قابلیت تحمل دمای بالا، فرایند نوینی برای شکلدهی داغ          |
| آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و تیتانیم توسط گاز ارائه شده است. در استفاده از |
| گاز محدودیت دمایی وجود ندارد و دمای فرایند تا هر مقدار دلخواه میتواند      |
| افزایش یابد. این گاز ممکن است هوا یا گازهای خنثی از جمله نیتروژن و         |
| آرگون باشد. با افزایش دمای فرایند، نیروی شکل دهی و فشار نیز کاهش           |
| مییابد. در سال های اخیر بسیاری از پژوهشگران تحقیقاتی را بر روی انجام       |
|  |

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

بررسی تجربی فرایند شکلدهی لولههای آلومینیومی با روش دمش گاز در دماهای بالا و تولید قطعات با سطح مقطع مربعی

مهرداد نصرالله زاده و همکا*ر*ان

کردند و بدین ترتیب بین نواحی مختلف لوله گرادیان دمایی به وجود آوردند [12]. تومويوشي و همكاران با استفاده از روش مقاومتي دماي لوله آلومينيومي را تا حدود C<sup>o</sup>C بالا برده و با استفاده از دمش هوا لوله آلومینیومی را برآمدگی کردند. در این مطالعه اثر فشار داخلی و شدت جریان بر روی نسبت انبساط بررسی شده است. مشاهده شده است که با افزایش جریان، نسبت انبساط ابتدا افزایش یافته سپس کاهش یافته و طول برآمدگی افزایش یافته است. با افزایش فشار داخلی نیز نسبت انبساط ابتدا افزایش یافته بعد ثابت مانده است. همچنین تغییر شکل، توزیع دما و تأثیر جنس قالب را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هرچه رسانندگی حرارتي قالب كمتر باشد، پرشدگي گوشهها بهبود مييابد [13]. هاشمي و همکاران به کمک معیارهای شکست نرم اصلاح شده و با در نظر گرفتن تأثیر دما و نرخ کرنش در شکست، ترکیدگی لوله و شعاع گوشه قطعه مربعی را در هيدروفرمينگ گرم تا دمای 300°C پيشبينی کردند [1]. بررسی پژوهشهای پیشین نشان میدهد تاکنون پژوهشی در زمینهی فرایند دمش گاز در دماهای بالا برای تغییر شکلهای پیچیده، مانند تبدیل مقطع دایره به مربع، انجام نشده است، همچنین تا به حال تأثیر زمان فرایند و توزیع ضخامت محصول در دمای بالا مورد توجه قرار نگرفته است.

در این پژوهش ابتدا برای اطمینان از افزایش شکل پذیری ماده در دمای 400°C و مشخص شدن امکان انجام شکل دهی داغ لوله آلومینیومی 6063 در این دما، آزمایش کشش تک محوری برای نمونههایی از این جنس انجام گرفت. سپس با ساخت تجهیزات شکل دهی با دمش گاز در دماهای بالا، تغییر مقطع لولههای آلومینیوم 6063 از دایره به مربع به صورت تجربی انجام شد. هدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین حال، دارای توزیع ضخامت مناسب می باشد. به همین منظور شکل دهی در ماهای کشو شکل دهی در این دمش گاز انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیزتر و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشههای تیز و در عین ماه مدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشه مای تیز و در عین مرفور شکل دهی در می محوری می محوری با استفاده از فرایند دمش گاز انجام شده و اثر پارامترهای مختلف از قبیل دما، فشار و زمان اعمال فشار بر روی شعاع گوشهی شکل گرفته و توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت در مورد محل پارگی نمونهها و علت این پدیده نیز بحث شده است.

#### 2- مراحل تجربي

در این پژوهش از لولههای آلومینیومی دارای قطر خارجی 40 mm و ضخامت اولیه 1.5 mm استفاده شده است. لولهها بدون درز بوده و با فرایند اکستروژن تولید شدهاند. ترکیب شیمیایی لولهها با استفاده از آزمایش کوانتومتری تعیین شده که در جدول 1 نشان داده شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ لوله AA6063 می باشد.

برای مقایسه رفتار مکانیکی ماده در دمای بالا و دمای محیط، آزمایش کشش تک محوری در دمای  $^\circ\mathrm{C}$  400 انجام شد و با نتایج آزمایش کشش تک محوری در دمای محیط مقایسه شد. شکل 2 نتایج حاصل از آزمایش کشش

| لوله | ىميايى | رکيب ش | ل 1 ت | جدوا |
|------|--------|--------|-------|------|
|------|--------|--------|-------|------|

| Table 1 Chei | mical compo | osition of tu | be    |      |      |
|--------------|-------------|---------------|-------|------|------|
| Al           | Mg          | Si            | Fe    | Zn   | Cu   |
| Base         | 0.47        | 0.44          | 0.3   | 0.08 | 0.06 |
| Mn           | Pb          | Ti            | Sn    | Ni   | Ga   |
| 0.03         | 0.03        | 0.03          | 0.017 | 0.02 | 0.01 |





**Fig. 2** (a) True stress-strain curve in 400 °C (b) Stress-strain curve in 25 °C (c) Tensile test specimen

**شکل 2** (a) منحنی تنش-کرنش حقیقی در دمای C° 400 (b) منحنی تنش-کرنش در دمای C° 25 (c) نمونه آزمایش کشش

| قالب مربعی مورد استفاده در این پژوهش و ابعاد آن به صورت شماتیک در                 |
|---|
| شکل 3 نشان داده شده است. این قالب از جنس فولاد spk میباشد که با                   |
| استفاده از دستگاه تراش و دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی <sup>1</sup> با دقت بالا |
| ماشینکاری شده است. این قالب دارای حفرهای مربعی با گوشههای تیز                     |
| میباشد که لوله در داخل این حفره تغییر شکل مییابد و به شکل مربع در                 |
| میآید. قالب دارای چهار سوراخ سرتاسری نیز میباشد که محل قرارگیری                   |
| المنتهای الکتریکی میباشد. در شکل 3 نمایی از قالب ساخته شده نشان                   |
| داده شده است.   |

تک محوری در دمای  $^{\circ}C$  400 و دمای محیط را نشان میدهد. مشاهده می شود این آلیاژ در دمای محیط دارای درصد افزایش طولی در حدود 17% می باشد، در حالی که در دمای  $^{\circ}C$  400 دارای درصد افزایش طولی در حدود 50% می باشد. همچنین تنش تسلیم از MPa 112 در دمای  $^{\circ}C$  25 به  $^{\circ}C$ 400 می باشد. همچنین تنش تسلیم از MPa دارای در دمای  $^{\circ}C$  25 به  $^{\circ}C$ 400 نوایش چشم گیری در کرنش شکست و کاهش قابل توجهی در تنش تسلیم و افزایش چشم گیری در فشار مورد نیاز شکل دهی مشاهده می شود، بنابراین انجام فرایند شکل دهی دمشی در دماهای بالا برای آلیاژ آلومینیوم 6063 توجیه پذیر خواهد بود.

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

1- spark

برای رساندن دمای مجموعه به محدوده  $^{\circ}$  00-500 از چهار عدد گرمکن فشنگی با توان 800 وات و یک عدد گرمکن کمربندی به توان 2000 وات استفاده شده است.

برای اندازه گیری دمای لوله، در قالب سوراخی ایجاد شده است و یک ترموکوپل نوع K از طریق این سوراخ با سطح خارجی لوله تماس پیدا می کند و دمای سطح لوله را با دقت C°1 اندازه گیری می کند. ترموکوپل به یک سیستم کنترل کننده متصل می باشد. این سیستم کنترل کننده با توجه به دمایی که از ترموکوپل دریافت می کند و دمایی که بر روی سیستم تنظیم شده است ولتاژ ورودی به گرمکنهای الکتریکی را کنترل می کند. بعد از اینکه دمای لوله به دمای مورد نظر برسد، سیستم کنترل کننده جریان ورودی به گرمکنها را قطع می کند تا دمای مجموعه بیشتر نشود. اگر دمای لوله کمتر از دمای مورد نظر شود، سیستم کنترل کننده جریان الکتریسیته را به گرمکنها وارد می کند تا از کاهش دما جلوگیری شود.

بعد از اینکه دمای لوله به دمای هدف رسید، مدتی لوله در همان دما نگه داشته میشود تا به توزیع دمای یکنواختی برسد. سپس با استفاده از یک کپسول نیتروژن، فشار داخلی اعمال میشود. فشار به صورت خطی و آرام اعمال میشود تا به فشار نهایی برسد. برای آببندی لوله در دو انتهای آن، از دو مخروط فلزی استفاده شده است. این مخروطهای فلزی از دو سمت توسط پرس هیدرولیک با فشار، درون لوله قرار می گیرد و مانع از نشت گاز نیتروژن از لوله میشود. میزان جابجایی و نیرویی که این پرس هیدرولیک وارد می کند توسط یک سیستم کامپیوتری کنترل میشود. مجموعه تجهیزات مورد استفاده در فرایند شکلدهی داغ با دمش گاز در شکل 4 نشان داده شده است.



Hydraulic Press



Fig. 4 Hot metal gas forming set up شکل 4 مجموعه شکل دهی داغ با دمش گاز

#### 3- نتايج و بحث

با استفاده از فرایند شکل دهی با دمش گاز در دماهای بالا و بدون اعمال تغذیه محوری، قطعاتی با سطح مقطع مربع که به صورت یکپارچه با مقطع دایروی می باشد تولید شده است. تعدادی از این قطعات در شکل 5 نشان داده شده است. این قطعات در دماهای  $2^{\circ}$  400 و  $2^{\circ}$  500 تولید شده و با قطعه تولید شده در دمای محیط مورد مقایسه قرار گرفته است.

### 1-3 - مقایسه قطعه مربعی شکل داده شده توسط فرایند شکلدهی دمشی و روشهای مرسوم شکلدهی

در شکل 6 قطعه مربعی تولید شده توسط روش دمش گاز در دماهای بالا با قطعه تولید شده توسط روش سنتی (جوش کاری) مقایسه شده است. در روش دمش گاز، نمونهای مربعی شکل با سطح مقطع پیوسته با قسمت دایروی با شعاع گوشههای تیز در حدود 6mm-5 در دمای 2°400 شکل داده شده است. این نمونه بر خلاف قطعه جوش کاری شده فاقد خط جوش است بنابراین دارای خواص یکنواخت دری می باشد و عیوب متأثر از جوش کاری در این قطعه وجود ندارد. از آنجا که در روش شکل دهی دمشی نمونه منبسط می شود، دارای نسبت استحکام به وزن بالاتری نسبت به نمونه جوش کاری شده است. تولید نمونه توسط روش جوش کاری بسیار زمان برتر و پرهزینه تر بوده است.

با تولید نمونههای مربعی با گوشههای تیز در دماهای بالا توسط فرایند شکلدهی دمشی، محدودیت دمایی فرایند هیدروفرمینگ گرم از میان

برداشته شد و امکان تولید نمونههایی با گوشههای تیز و اشکال پیچیده فراهم شد. 2-3- تأثير دما بر شعاع گوشه یکی از خروجیهای مهم فرایند، شعاع گوشهی قطعات مربعی میباشد.

یکی از خروجیهای مهم فرایند، شعاع کوشهی فطعات مربعی میباشد. هرچقدر شعاع گوشه کوچکتر باشد، یعنی قطعه بیشتر شکل گرفته و نتیجه مطلوبتری حاصل شده است. برای اندازه گیری شعاعهای شکل گرفته شده در دماهای مختلف، از شابلون اندازه گیری شعاع استفاده و تغییرات شعاع

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



**Fig. 5** Square specimens shaped in different temperature **شکل 5** قطعات مربعی شکل داده شده در دماهای مختلف



**Fig. 6** Specimens formed with Traditional and Hot gas forming method **شکل 6** قطعات شکل داده شده توسط روش سنتی و شکلدهی با دمش گاز در دمای 400°C

استفاده از این خاصیت آلومینیوم 6063 میتوان گوشههایی تیز یا اشکالی پیچیده را برای این آلیاژ در دماهای بالا به وجود آورد.

#### 3-3- تأثير دما بر توزيع ضخامت

خروجی دیگری که باید مورد بررسی قرار گیرد توزیع ضخامت در راستای محیطی قطعه مربعی میباشد. برای اندازه گیری ضخامت در نقاط مختلف، ابتدا مطابق شکل 8، قطعهی مربعی شکل گرفته شده، توسط دستگاه برش سیمی<sup>1</sup> در راستای محیطی برش زده شده و سپس با استفاده از میکرومتر ضخامت در نقاط مختلف اندازه گرفته شده است. شکل 8 تغییرات ضخامت را در سطح مقطع لوله با ضخامت اولیه 1.5mm، بعد از شکل دهی در سه دمای 25، 400 و $^\circ {
m C}$  نشان میدهد. نتایج نشان میدهد در دمای محیط به 400  $_{
m c}$ دلیل اینکه تغییر شکل بسیار کمی به وجود آمده، نازکشدگی کم میباشد و ضخامت به طور همگن در اکثر نقاط توزیع شده است. کمینهی ضخامت در دمای محیط 1.27mm میباشد. در دماهایC° 400 و C° 500 میزان تغییر شکل بسیار بیشتر از دمای محیط بوده و گوشهها بیشتر پر می شود، لذا جریان مواد بیشتری رخ داده و در نتیجه کاهش ضخامت محسوسی نسبت به دمای محیط خواهیم داشت. با افزایش دما از C° 400 به C° 500، شعاع گوشه از 6.5mm به 5.8mm خواهد رسید. با شکل گیری شعاعهای کوچکتر در دمای C° 500، نیاز به آن میباشد که لوله بیشتر منبسط شود و در نتیجه ضخامت قطعه کمتر شود تا گوشههای قطعه بیشتر شکل بگیرد، به طوری که كمينه ضخامت از 1.11mm در دمای C° 400 به 1.07mm در دمای 500 °C مىرىىد.





[ Downloaded from mme.mod

Fig. 7 (a) Radius measurement (b) Effect of temperature on corner radius

**شکل 7** (a) اندازه گیری شعاع (b) تأثیر دما بر شعاع گوشه

1- Wire cut

439

گوشه در دماهای مختلف مقایسه گردید (شکل 7). مشاهده می شود حداکثر شعاع گوشهای که می توان در دمای محیط شکل داد mm 19.5 می باشد. در حالی که با انجام فرایند در دماهایی نزدیک به نقطه ذوب، که ماده در آن خمیری می باشد، شعاع در دمای 2°400 به میزان 66.6% و در دمای ک<sup>0</sup>002، 70.2% نسبت به دمای محیط کاهش می یابد، به طوریکه شعاع گوشه به mm 6.5 در دمای <sup>0</sup> 400 و mm 5.8 در <sup>0</sup> 500 خواهد رسید. نتایج حاکی از آن است که آلومینیوم 6063 در دماهای بالا و نزدیک به نقطه ذوب، تغییر شکل بسیار بیشتری را بدون پارگی از خود نشان می دهد. با

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



**Fig. 8** (a) Thickness measurement (b) Effect of temperature on thickness distribution

شکل  $\mathbf{8}$  (a) اندازه گیری ضخامت (b) تأثیر دما بر توزیع ضخامت

شکل 8 تغییرات ضخامت را برای قطعات شکل داده شده در دماهای 25، 400 و C° 500 نشان میدهد که دارای شعاع گوشههای متفاوت میباشند. برای اینکه بتوان تأثیر واقعی دما را بر توزیع ضخامت بررسی کرد، یک قطعهی دیگر در دمای C° 500 و با فشار کنترل شده تولید گردید تا دارای شعاعی در حدود 6.5mm باشد. سپس توزیع ضخامت این قطعه با استفاده از میکرومتر به دست آمد و با قطعهی تولید شده در دمای 400°C مورد مقایسه قرار گرفت. شکل 9 نتایج حاصل از این اندازه گیری را نشان میدهد. مشاهده می شود اکثر نقاط شکل گرفته شده در دمای 500°C دارای ضخامت بیشتری نسبت به قطعه شکل گرفته شده در دمای 400°C می باشد، در نتیجه احتمال پارگی قطعه طی فرایند شکل دهی کمتر می شود. با افزایش دما، ضریب اصطکاک افزایش پیدا می کند. در نتیجه قسمتهایی از قطعه که با قالب در تماس میباشد سخت در جریان می یابد و ضخامت آن قسمت ها کمتر كاهش مىيابد. از طرفى با افزايش دما كرنش شكست افزايش مىيابد و قطعه توانایی آن را دارد که به مقدار بیشتری تغییر شکل یابد. همانطور که در شکل 9 نيز نشان داده شده است ضخامت ناحيه در تماس با قالب و اختلاف ضخامت کمینه و بیشینه در دمای C°500 بیشتر از دمای C°400 می باشد.

به طور قابل توجهی کاهش یابد. فشارهای مورد نیاز برای شکلدهی در دماهای 25، 400 و 2° 500 در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده می-شود با افزایش دما از 2°25 به 2°400 و 2°500 کاهش چشم گیری در فشار شکلدهی به وجود میآید. فشار مورد نیاز برای رسیدن به شعاع گوشه 19.5 mm در دمای محیط برابر 157 می باشد در حالی که این فشار در دماهای mm در دمای محیط برابر 157 می باشد در حالی که این فشار در دماهای C 2° 400 و 2° 500 و برای شعاعهای mm 6.5 و mm 5.8 به 2001 و Thar در دماهای بالا سبب کاربرد پرس با ظرفیت کم، کنترل راحت در درجه حرارت، کاهش نیروی نگهدارنده، نیاز به فضای کارگاهی کوچک در و کاهش هزینه ساخت قالب و اتصالات می گردد. همچنین با روشهای ساده در و کمهزینه در می توان فشار داخلی را تامین کرد. برای مثال بجای پمپهای هیدرولیک برای تامین فشار داخلی می توان از کپسول گاز خنثی یا هوا استفاده کرد.

**5-3 - تأثیر زمان اعمال فشار بر شعاع گوشه** در دماهای بالا رابطهی تنش سیلان به صورت معادلهی (1) میباشد. (1)  $\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^m$  (1) در این معادله  $\sigma$  تنش سیلان،  $\dot{3}$ نرخ کرنش، K ضریب استحکام و m توان حساسیت به نرخ کرنش میباشد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند، زمان اعمال فشار میباشد. با افزایش زمان اعمال فشار، نرخ کرنش کاهش مییابد. با توجه به رابطه (1) انتظار میرود با کاهش نرخ کرنش، تنش تسلیم کاهش یابد و میزان تغییر شکل و پرشدگی گوشهها در فشاری ثابت بیشتر شود. در شکل 11 دو نمونه از قطعات شکل گرفته شده در دمای  $\Omega^\circ$  00 و فشار bar و نشار نهایی



**Fig. 9** Thickness distribution at different temperature and 6.5mm radius 6.5mm شکل 9 توزیع ضخامت در دماهای متفاوت و شعاع ثابت



**Fig. 10** Effect of temperature on forming pressure شکل 10 تأثیر دما بر فشار شکلدهی

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

**4-3- تأثیر دما بر فشار شکلدهی** همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، با افزایش دما از C° 25 به 2° 400 تنش تسلیم به طور چشم *گ*یری کاهش مییابد و از MPa 112 به 16 MPa میرسد، بنابراین انتظار میرود که با افزایش دما، فشار شکلدهی

30 ثانیه و در قطعه (b) این زمان 90 ثانیه میباشد. نتایج اندازه گیری شعاعهای قطعات مربعی حاکی از آن است که با افزایش زمان اعمال فشار، گوشههای تیزتری شکل می گیرد. همانطور که در شکل 11 نشان داده شده است، شعاع گوشهی شکل گرفته شده در مدت زمان 30 ثانیه (قطعه (a)) برابر mm 7 میباشد.

#### 6-3- بررسی علت و محل پارگی

بررسی نقاط پارگی در قطعات نشان میدهد اکثر نمونهها در یک ناحیهی مشخص دچار پارگی میشوند. این ناحیه در شکل 12 نشان داده شده است.



**Fig. 11** Work pieces obtained at different pressure applying time (a) Time 30s (b) Time 90s

شكل 11 قطعات توليد شده در زمانهاى اعمال فشار مختلف (a) 30 ثانيه (b) 90 ثانيه (b) ثانيه



پارگیها در ابتدای قسمت مربعی که در آن سطح مقطع دایره به مربع تبدیل میشود،اتفاق میافتد. در این ناحیه به علت تغییر مقطع زیادی که در قطعه به وجود میآید، نسبت به سایر نقاط، تغییر شکل بیشتری روی میدهد. به همین دلیل این ناحیه زودتر از سایر نقاط دچار پارگی میشود. برای جلوگیری از پارگی در این ناحیه، میبایست در دو انتهای لوله تغذیه محوری اعمال شود تا از نازکشدگی بیش از حد در ناحیهی تبدیل مقطع دایره به مربع جلوگیری شود. با افزایش تغذیهی محوری، گوشههای قالب بیشتر شکل می گیرد (گوشهها تیزتر میشود) و نازکشدگی در راستای ناحیهی انتقال به سمت وسط قطعه (در راستای طولی) انتقال مییابد. در صورت وجود تغذیه محوری به ناحیه وسط قطعه کار ماده کمتری نسبت به سایر نقاط قطعه

مهرداد نصرالله زاده و همکاران

#### 4- نتيجه گيري

در این پژوهش با ساخت تجهیزات شکلدهی با دمش گاز در دماهای بالا، به شکلدهی داغ لولههای آلومینیومی و تبدیل این لولهها به مقطع مربع پرداخته شده است. اثر دما بر شعاع گوشه، توزیع ضخامت، فشار شکلدهی و تأثیر زمان اعمال فشار بر شکلگیری شعاع گوشه و همچنین علت پارگی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت است از:

- نتایج نشان می دهد فرایند شکل دهی دمشی در دماهای بالا، روشی مناسب جهت شکل دادن آلیاژهایی می باشد که شکل پذیری کمی در دمای اتاق دارند اما در دماهای بالا شکل پذیری آنها افزایش چشم گیری پیدا می کند، از قبیل: آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم. همچنین این روش برای فلزاتی از قبیل فولاد که در دمای اتاق استحکام بالایی دارند مناسب است، زیرا با انجام فرایند در دماهای بالا کاهش قابل توجهی در تنش سیلان به وجود می آید و می توان با فشاری کمتر و تجهیزات ساده تر و ارزان تر قطعه را شکل داد.

- شعاع در دمای C° 400، 66.6% و در دمای C° 500، 70.2% نسبت به دمای محیط کاهش مییابد. شعاع از 19.5mm در 25 C° می سد. این C° به mm در C° 500 می سد. این نتایج نشان می دهد که برای رسیدن به گوشههایی تیز در قطعات مربعی با آلیاژ آلومینیوم 6063، فرایند بایستی در دماهای بالا و نزدیک به نقطه ذوب (حدود C° 500 م00-400) انجام گیرد. در این دماها ماده تغییر شکل بسیار بیشتری را بدون پارگی از خود نشان می دهد.

با افزایش دما و کاهش شعاع گوشه به دلیل تغییر شکل پلاستیک
 بیشتر، کمینهی ضخامت کاهش مییابد و توزیع غیر

| یکنواختتری از ضخامت خواهیم داشت، اما در صورتی که شعاع    |
|--|
| در دماهای متفاوت یکسان باشد، در دمای بالاتر، ضخامت بیشتر |
| خواهد شد.  |
| - با افزایش دما، کاهش چشمگیری در فشار شکلدهی به وجود     |
| میآید. فشار شکلدهی از 157 bar در دمای محیط به 20 bar     |
| در دمای C° 400 و 11 bar در دمای C° 500 میرسد. این        |
| کاهش محسوس در فشار مورد نیاز برای شکلدهی، سبب کاهش       |
| هزینههای ساخت قالب و اتصالات و همچنین استفاده از منبع    |
| تامین فشار سادهتر و ارزانتر خواهد شد.                    |
|  |

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

Yong Lee, Effects of pre-treatment conditions on warm hydroform ability of 7075 aluminum tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156, pp. 1337-1343, 2004

- [6] Michael Keigler, Herbert Bauer, David Harrison, Anjali K.M. De Silva, Enhancing the formability of aluminum components via temperature controlled hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 363-370, 2005
- [7] Shijian Yuan, Jun Qi, Zhubin He, An experimental investigation into the formability of hydroforming 5A02 Al-tubes at elevated temperature, *Journal* of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 680-683, 2006
- [8] Ho Choi, Muammer Koc, Jun Ni, A study on the analytical modeling for warm hydro-mechanical deep drawing of lightweight materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1752-1766, 2007
- [9] M.S. Zoei, M. Farzin, A.H. Mohammadi, Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 49-56, 2011. (in Persian فارسي)
- [10] S.M.H. Seyedkashi, H.Moslemi Naeini, G.H. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, Y.H. Moon, Numerical and experimental study on the effects od expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, 2012. (in Persian فارسي)
- [11] HE Zhu-bin1, FAN Xiao-bo, SHAO Fei, ZHENG Kai-lun, WANG Zhi-biao, YUAN Shi-jian, Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal gas forming at elevated temperature, *Transaction of nonferrous metals*, Vol. 22, pp. 364-369, 2012
- [12] LIU Gang, ZHANG Wen-da, HE Zhu-bin, YUAN Shi-jian,LINZhe, warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio within non-uniform temperature field, *Transaction of nonferrous metals*, Vol. 22, pp. 408-415, 2012
- [13] T. Maeno, K. I. Mori, C. Unou, Improvement of die filling by prevention of temperature drop in gas forming of aluminum alloy tube using air filled into sealed tube and resistance heating, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 2237-2242, 2014.

- با افزایش زمان اعمال فشار، پرشدگی گوشهها بیشتر خواهد شد،
   به طوری که با افزایش زمان اعمال فشار از 30 ثانیه به 90 ثانیه
   به طوری که با افزایش زمان اعمال فشار از 30 ثانیه به 7.6mm
   در دمای C° 500 و فشار bar 9، شعاع گوشه از 7.6mm
- برای جلوگیری از پارگی در ناحیه انتقال سطح مقطع دایره به مربع، بایستی به دو انتهای لوله تغذیه محوری اعمال گردد تا با افزایش پرشدگی گوشهها، ناحیه پارگی به وسط قطعه کار منتقل شود و پارگی دیرتر رخ دهد.

5- مراجع

- S.J. hashemi, H. Moslemi Naeini, G.H. Liaghat, J. Shahbazi Karami, A.H. Roohi, Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 211-201, 2015. (in Persian فارسى)
- [2] S. Novotny, M. Geiger, Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 594-599, 2003.
- [3] HE Zhu-bin, TENG Bu-gang, CHE Chang-yong, WANG Zhi-biao, ZHENG Kai-lun, YUAN Shi-jian, Mechanical properties and formability of TA2 extruded tube for hot metal gas forming at elevated temperature, Transaction of nonferrous metals, Vol. 22, pp. 479-484, 2012
- [4] H. Moslemi Naeini, S.J. Hashemi, G.H. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 133-140, 2014. (in Persian فارسى)
- [5] Mun-Yong Lee, Sung-Man Sohn, Chang-Yong Kang, Dong-Woo Suh, Sang-

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12