



بررسی تجربی فرایند شکل دهی لوله های آلومینیومی با روش دمش گاز در دماهای بالا و تولید قطعات با سطح مقطع مربعی

مهرداد نصرالله زاده¹، حسن مسلمی نائینی^{2*}، سیدجلال هاشمی³، بهنام عباسزاده⁴، جواد شهبازی کرمی⁵

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 14115-143، moslemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 شهریور 1394

پذیرش: 29 مهر 1394

ارائه در سایت: 14 آذر 1394

کلید واژگان:

آلومینیوم

شکل دهی با دمش گاز در دمای بالا

قطعه مربعی

چکیده

در سال های اخیر استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن و مقاومت بالا در برابر خوردگی در صنایع هوا فضا و خودروسازی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مشکل اصلی در کاربرد این آلیاژها شکل پذیری کم در دمای اتاق می باشد. برای رفع این مشکل از شکل دهی در دماهای بالا استفاده می شود. از آنجا که دمای مقاومت حرارتی روغن بیشتر از 300°C نمی باشد، برای شکل دهی در 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 تغییر مقطع لوله های آلومینیومی AA6063 از دایره به مربع به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصله در دمای محیط مقایسه شده است. پس از تولید قطعات مربعی توزیع ضخامت، شعاع گوشه، فشار شکل دهی و اثر زمان اعمال فشار بر شکل گیری گوشه های نمونه های تولید شده در دماهای مختلف باهم مقایسه شد و محل وقوع پارگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد با افزایش دما، کاهش محسوسی در شعاع شکل گرفته شده و فشار شکل دهی به وجود آمده، به طوری که شعاع از 19.5 mm در دمای محیط با فشار شکل دهی 154 bar به 5.8 mm در دمای 500°C با فشار شکل دهی 11 bar می رسد. همچنین با افزایش زمان اعمال فشار و در واقع کاهش سرعت فرایند، گوشه های شکل گرفته شده تیزتر شده است. با بررسی پارگی مشاهده شده است که اکثر پارگی ها 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 Nasrollahzade¹, Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Seyed Jalal Hashemi², Behnam Abbaszadeh¹, Javad Shahbazi Karami³

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

Keywords:
Aluminum
Gas Forming At High Temperatures
Square Parts

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 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:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در روش‌های سنتی برای تولید قطعات مربعی که به صورت یکپارچه با سطح مقطع دایروی هستند، ابتدا با روش خم‌کاری، 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 می‌کنند. این روش معایب فراوانی دارد، از جمله زمان‌بر بودن فرایند، بالا بودن هزینه تولید، دقت ابعادی پایین محصول نهایی، وزن بالای قطعه، وجود عیوب متعدد در خط جوش و غیر یکنواختی 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 کنند. هیدروفرمینگ لوله دارای پیشینه تقریباً صد ساله می‌باشد ولی کاربرد آن در صنعت از حدود دو دهه پیش آغاز شده است. کاربردهای این روش شکل‌دهی شامل ساخت قطعات لوله‌ای شکل بکار رفته در موتور و سیستم‌های خروج گاز می‌باشد. علاوه بر این، تعداد زیادی از قطعات شاسی و بدنه مانند قطعات در و کاپوت نیز با فرایند هیدروفرمینگ تولید می‌شوند. مزیت اصلی این فرایند بالا بردن نسبت استحکام به وزن قطعات می‌باشد. از مزیت‌های دیگر این فرایند می‌توان به هزینه کمتر تجهیزات، عملیات اضافی کمتر پس از تولید، دقت ابعادی بالاتر و برگشت فنی کمتر و همچنین کاهش دور ریز اشاره کرد [1]. این فرایند برخلاف فرایند اکستروژن، قادر به تولید قطعاتی توخالی با سطح مقطع متغیر می‌باشد. موفقیت این فرایند در گرو پارامترهای دخیل در فرایند می‌باشد. این پارامترها عبارتند از فشار داخلی، تغذیه محوری، ضریب اصطکاک و شکل‌پذیری 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 مهم‌ترین روش‌های صرفه‌جویی در انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای است. در سال‌های اخیر استفاده از آلیاژهای 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، شکل‌پذیری 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 می‌باشند [2]. از این‌رو، تولید قطعاتی با هندسه پیچیده از این آلیاژها، به سختی توسط روش‌های شکل‌دهی سرد سنتی انجام می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش شکل‌پذیری این آلیاژها، بالا بردن دمای فرایند و در نتیجه افزایش سیستم‌های لغزشی می‌باشد. بدین منظور محققان از روش هیدروفرمینگ گرم با استفاده از سیال روغن استفاده کرده‌اند، اما این روش این محدودیت را دارد که به علت مقاومت گرمایی پایین روغن، نمی‌توان دمای فرایند را به بیش از 300°C سانتی‌گراد 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 شکل‌دهی و فشار نیز کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران تحقیقاتی را بر روی انجام

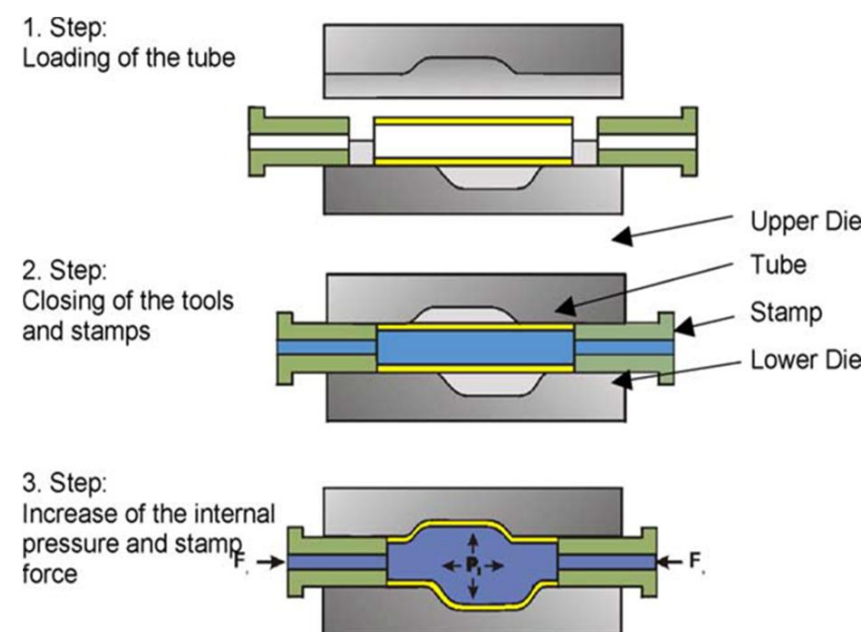


Fig. 1 Tube hydroforming process [4]

شکل 1 فرایند هیدروفرمینگ لوله [4]

فرایند شکل‌دهی 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 شکل‌پذیری، 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 200°C 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 ورق‌گیر در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی ارائه دادند. مدل اجزای محدود نیز برای تایید نتایج تحلیل توسعه داده شد. بر اساس نتایج به دست آمده بحرانی‌ترین 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 شکل‌پذیری افزایش می‌یابد و فشار مورد نیاز شکل‌دهی کاهش می‌یابد [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 شکل‌پذیری و میکروساختار آلیاژ آلومینیوم AA6061 و انواع پارگی‌ها در دمای بالا را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه برآمدگی آزاد لوله‌های آلومینیومی در دماهای 350°C - 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 خنک‌کاری در دو انتهای لوله (محل اعمال تغذیه محوری) استفاده کردند و در منطقه تغییر شکل نیز از سیستم گرمایشی استفاده

جدول 1 ترکیب شیمیایی لوله

Table 1 Chemical composition of tube

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

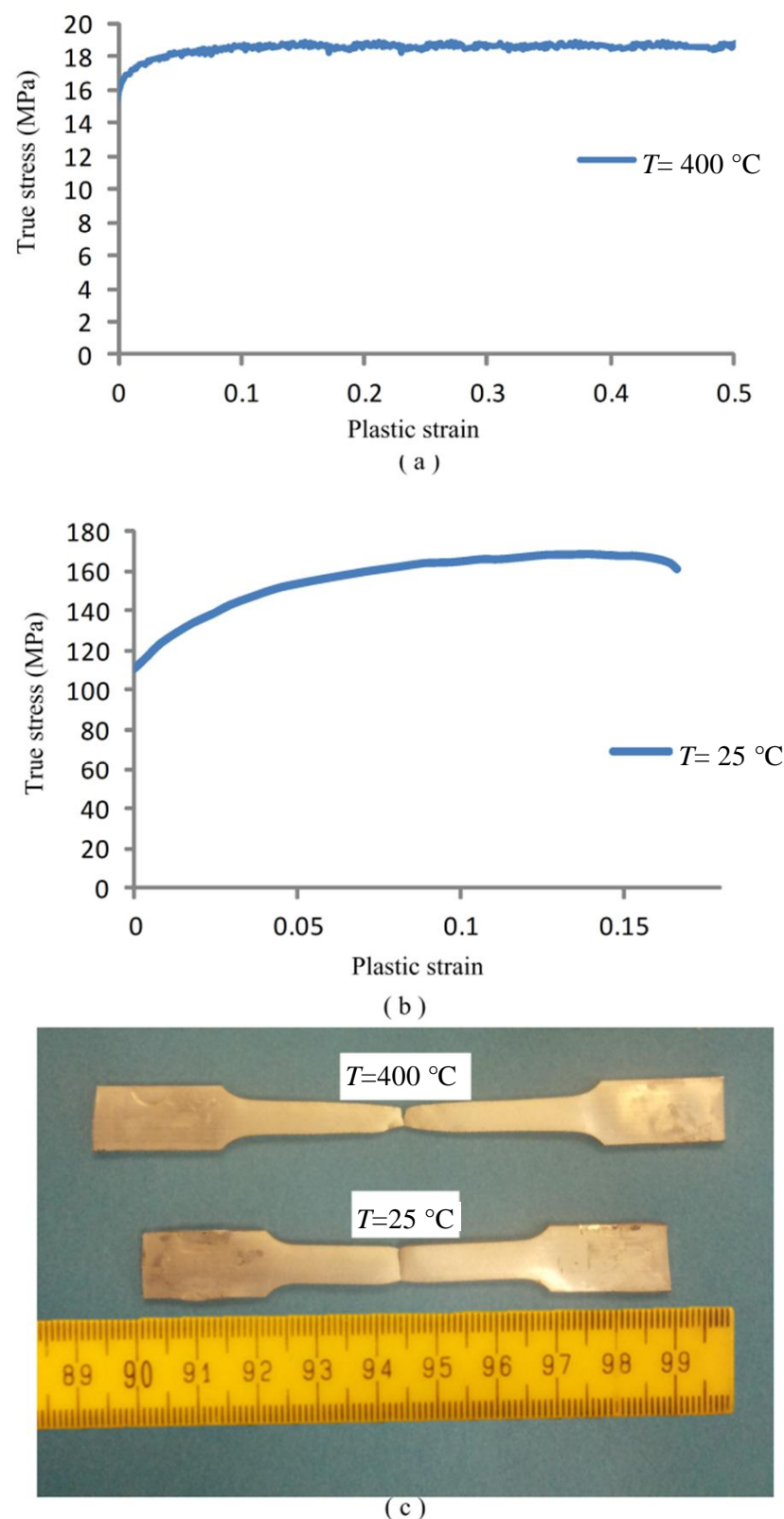


Fig. 2 (a) True stress-strain curve in 400 °C (b) Stress-strain curve in 25 °C (c) Tensile test specimen

شکل 2 (a) منحنی تنش-کرنش حقیقی در دمای 400 °C (b) منحنی تنش-کرنش در دمای 25 °C (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 می باشد که با استفاده از دستگاه تراش و دستگاه ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ با دقت بالا ماشینکاری شده است. این قالب دارای حفره ای مربعی با گوشه های تیز می باشد که لوله در داخل این حفره تغییر شکل می یابد و به شکل مربع در می آید. قالب دارای چهار سوراخ سرتاسری نیز می باشد که محل قرارگیری المنت های الکتریکی می باشد. در شکل 3 نمایی از قالب ساخته شده نشان داده شده است.

کردند و بدین ترتیب بین نواحی مختلف لوله گرادیان دمایی به وجود آوردند [12]. تومپوشی و همکاران با استفاده از روش مقاومتی دمای لوله آلومینیومی را تا حدود 500°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 حرارتی قالب کمتر باشد، پرشدگی گوشه ها بهبود می یابد [13]. هاشمی 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 هیدروفرمینگ گرم تا دمای 300°C پیش بینی کردند [1]. بررسی پژوهش های پیشین نشان می دهد تاکنون پژوهشی در زمینه ی فرایند دمش گاز در دماهای بالا برای تغییر شکل های 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 نمونه هایی از این جنس انجام گرفت. سپس با ساخت تجهیزات شکل دهی با دمش گاز در دماهای بالا، تغییر مقطع لوله های آلومینیوم 6063 از دایره به مربع به صورت تجربی انجام شد. هدف از انجام فرایند، تولید یک قطعه مربعی با گوشه های تیزتر و در عین حال، دارای توزیع ضخامت مناسب می باشد. به همین منظور شکل دهی در دماهای 400°C و 500°C درجه با استفاده از فرایند دمش گاز انجام شده و اثر پارامترهای مختلف از قبیل دما، فشار و زمان اعمال فشار بر روی شعاع گوشه ی شکل گرفته و توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت در مورد محل پارگی نمونه ها و علت این پدیده نیز بحث شده است.

2- مراحل تجربی

در این پژوهش از لوله های آلومینیومی دارای قطر خارجی 40 mm و ضخامت اولیه 1.5 mm استفاده شده است. لوله ها بدون درز بوده و با فرایند اکستروژن تولید شده اند. ترکیب شیمیایی لوله ها 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 400 °C انجام شد و با نتایج آزمایش کشش تک محوری در دمای محیط مقایسه شد. شکل 2 نتایج حاصل از آزمایش کشش تک محوری در دمای 400 °C و دمای محیط را نشان می دهد. مشاهده می شود این آلیاژ در دمای محیط دارای درصد افزایش طولی در حدود 17% می باشد، در حالی که در دمای 400 °C دارای درصد افزایش طولی در حدود 50% می باشد. همچنین تنش تسلیم از 112 MPa در دمای 25 °C به 16 MPa کاهش می یابد. با توجه به اینکه، با افزایش دما از 25 °C به 400 °C، افزایش چشم گیری در کرنش شکست و کاهش قابل توجهی در تنش تسلیم و به تبع آن کاهش 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.

1- spark

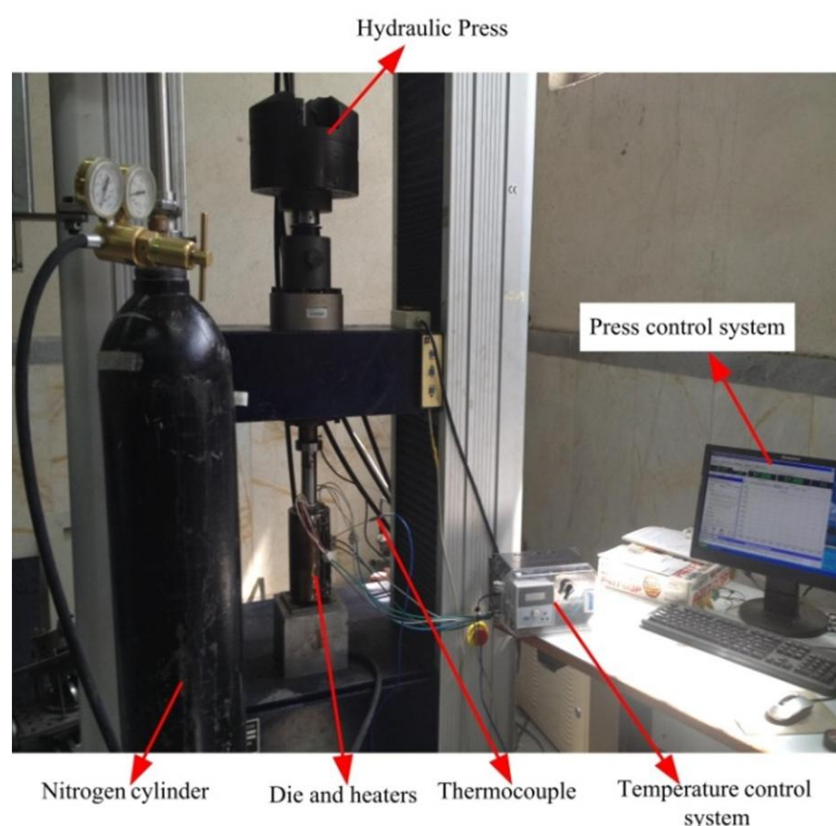


Fig. 4 Hot metal gas forming set up

شکل 4 مجموعه شکل‌دهی داغ با دمش گاز

3- نتایج و بحث

با استفاده از فرایند شکل‌دهی با دمش گاز در دماهای بالا و بدون اعمال تغذیه محوری، قطعاتی با سطح مقطع مربع که به صورت یکپارچه با مقطع دایروی می‌باشد تولید شده است. تعدادی از این قطعات در شکل 5 نشان داده شده است. این قطعات در دماهای 400°C و 500°C تولید شده و با قطعه تولید شده در دمای محیط مورد مقایسه قرار گرفته است.

3-1- 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 5-6mm در دمای 400°C شکل داده شده است. این نمونه بر خلاف قطعه جوش کاری شده فاقد خط جوش است بنابراین دارای خواص یکنواخت‌تری می‌باشد و عیوب متأثر از جوش کاری در این قطعه وجود ندارد. از آنجا که در روش شکل‌دهی دمشی نمونه منبسط می‌شود، دارای نسبت استحکام به وزن بالاتری نسبت به نمونه جوش کاری شده است. تولید نمونه توسط روش جوش کاری بسیار زمان‌برتر و پرهزینه‌تر 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.

3-2- تأثیر دما بر شعاع گوشه

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

برای رساندن دمای مجموعه به محدوده $400-500^{\circ}\text{C}$ از چهار عدد گرمکن فشنگی با توان 800 وات و یک عدد گرمکن کمربندی به توان 2000 وات استفاده شده است. مجموعه گرمکن‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری دمای لوله، در قالب سوراخی ایجاد شده است و یک ترموکوپل نوع K از طریق این سوراخ با سطح خارجی لوله تماس پیدا می‌کند و دمای سطح لوله را با دقت 1°C اندازه‌گیری می‌کند. ترموکوپل به یک سیستم کنترل کننده متصل می‌باشد. این سیستم کنترل کننده با توجه به دمایی که از ترموکوپل دریافت می‌کند و دمایی که بر روی سیستم تنظیم شده است ولتاژ ورودی به گرمکن‌های الکتریکی را کنترل می‌کند. بعد از اینکه دمای لوله به دمای مورد نظر برسد، سیستم کنترل کننده جریان ورودی به گرمکن‌ها را قطع می‌کند تا دمای مجموعه بیشتر نشود. اگر دمای لوله کمتر از دمای مورد نظر شود، سیستم کنترل کننده جریان الکتریسیته را به گرمکن‌ها وارد می‌کند 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 می‌گیرد و مانع از نشت گاز نیتروژن از لوله می‌شود. میزان جابجایی و نیرویی که این پرس هیدرولیک وارد می‌کند توسط یک سیستم کامپیوتری کنترل می‌شود. مجموعه تجهیزات مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی داغ با دمش گاز در شکل 4 نشان داده شده است.

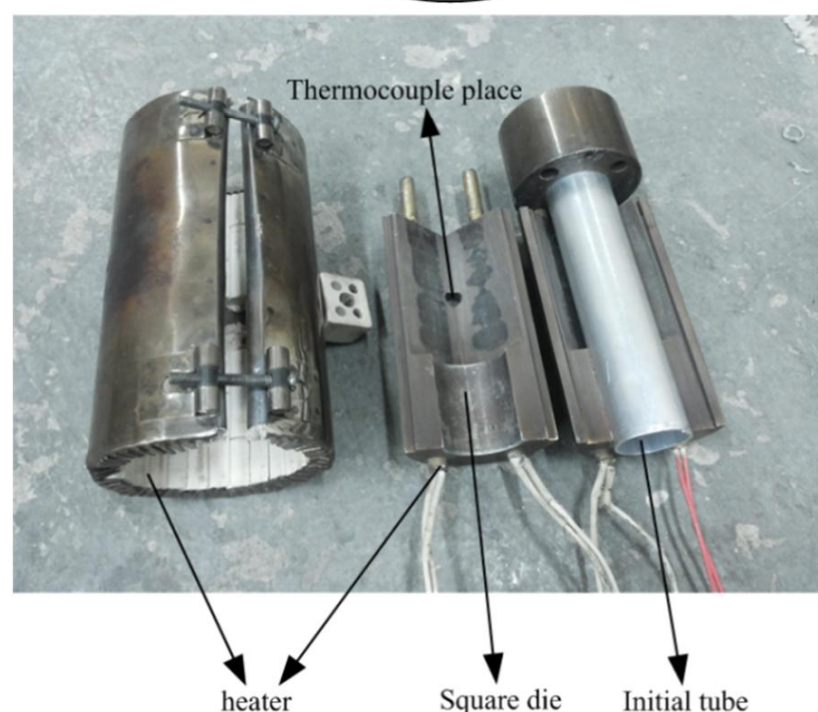
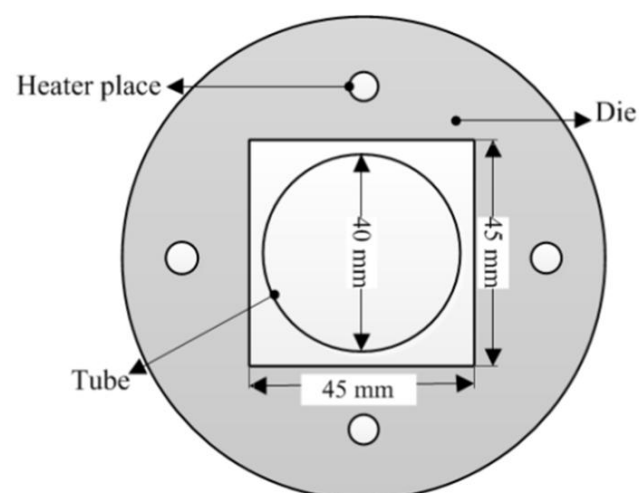


Fig. 3 Hot metal gas forming die

شکل 3 قالب شکل‌دهی داغ با دمش گاز

استفاده از این خاصیت آلومینیوم 6063 می توان گوشه هایی تیز یا اشکالی پیچیده را برای این آلیاژ در دماهای بالا به وجود آورد.

3-3- تأثیر دما بر توزیع ضخامت

خروجی دیگری که باید مورد بررسی قرار گیرد توزیع ضخامت در راستای محیطی قطعه مربعی می باشد. برای اندازه گیری ضخامت در نقاط مختلف، ابتدا مطابق شکل 8، قطعه ای مربعی شکل گرفته شده، توسط دستگاه برش سیمی¹ 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 500 °C نشان می دهد. نتایج نشان می دهد در دمای محیط به دلیل اینکه تغییر شکل بسیار کمی به وجود آمده، نازک شدگی کم می باشد و ضخامت به طور همگن در اکثر نقاط توزیع شده است. کمینه ی ضخامت در دمای محیط 1.27mm می باشد. در دماهای 400 °C و 500 °C میزان تغییر شکل بسیار بیشتر از دمای محیط بوده و گوشه ها 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 400 °C به 500 °C، شعاع گوشه از 6.5mm به 5.8mm خواهد رسید. با شکل گیری شعاع های کوچکتر در دمای 500 °C، نیاز به آن می باشد که لوله بیشتر منبسط شود و در نتیجه ضخامت قطعه کمتر شود تا گوشه های قطعه بیشتر شکل بگیرد، به طوری که کمینه ضخامت از 1.11mm در دمای 400 °C به 1.07mm در دمای 500 °C می رسد.

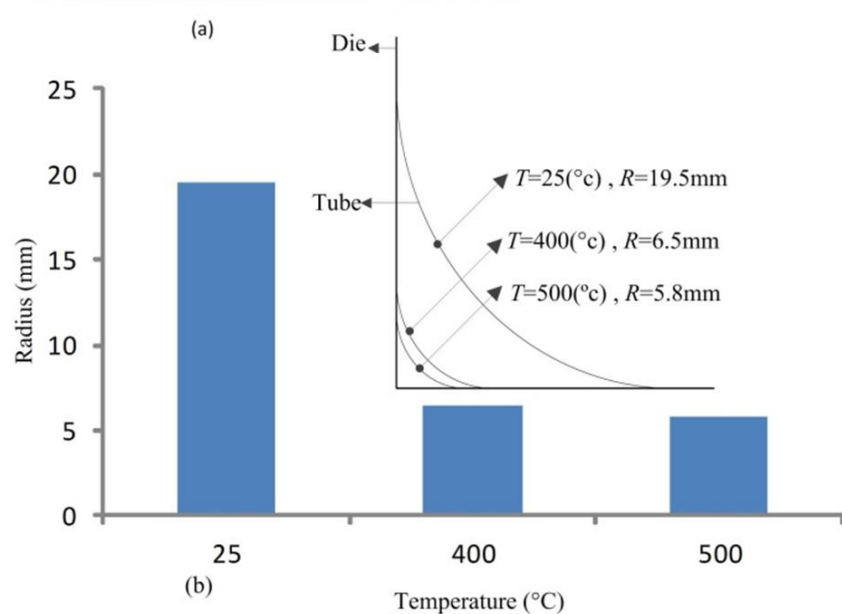


Fig. 7 (a) Radius measurement (b) Effect of temperature on corner radius

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

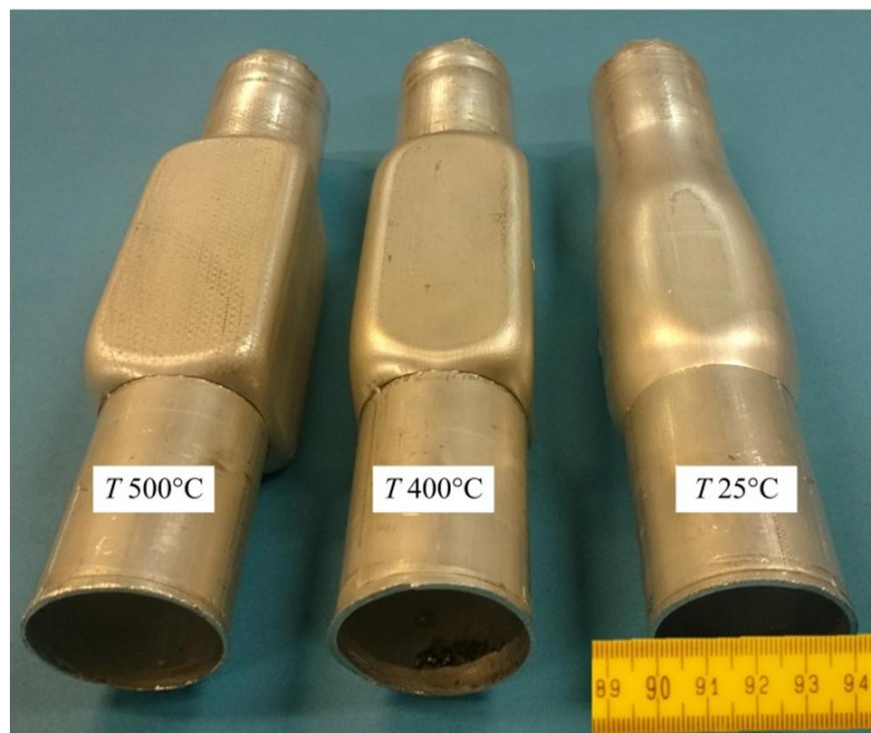


Fig. 5 Square specimens shaped in different temperature

شکل 5 قطعات مربعی شکل داده شده در دماهای مختلف

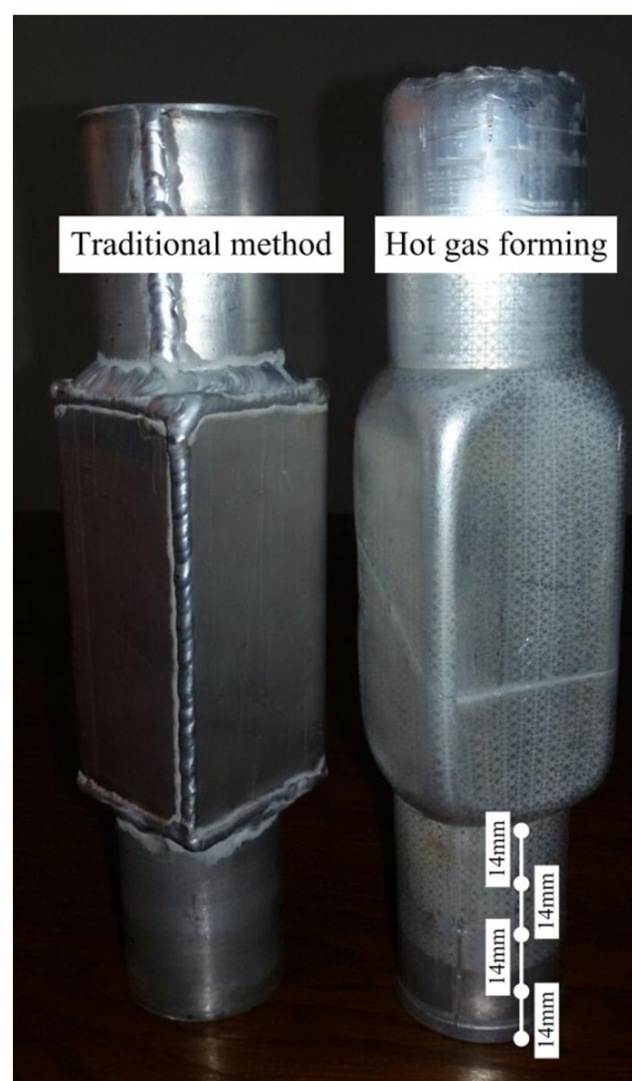


Fig. 6 Specimens formed with Traditional and Hot gas forming method
شکل 6 قطعات شکل داده شده توسط روش سنتی و شکل دهی با دمش گاز در دمای 400°C

گوشه در دماهای مختلف مقایسه گردید (شکل 7). مشاهده می شود حداکثر شعاع گوشه ای که می توان در دمای محیط شکل داد 19.5 mm می باشد. در حالی که با انجام فرایند در دماهایی نزدیک به نقطه ذوب، که ماده در آن خمیری می باشد، شعاع در دمای 400°C به میزان 66.6% و در دمای 500°C، 70.2% نسبت به دمای محیط کاهش می یابد، به طوریکه شعاع گوشه به 6.5 mm در دمای 400 °C و 5.8 mm در 500 °C 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

1- Wire cut

به طور قابل توجهی کاهش یابد. فشارهای مورد نیاز برای شکل دهی در دماهای 25، 400 و 500 °C در شکل 10 نشان داده شده است. مشاهده می شود با افزایش دما از 25 °C به 400 °C و 500 °C کاهش چشم گیری در فشار شکل دهی به وجود می آید. فشار مورد نیاز برای رسیدن به شعاع گوشه 19.5 mm در دمای محیط برابر 157 bar می باشد در حالی که این فشار در دماهای 400 °C و 500 °C و برای شعاع های 6.5 mm و 5.8 mm به 20bar و 11bar کاهش پیدا می کند. کاهش فشار شکل دهی در دماهای بالا سبب کاربرد پرس با ظرفیت کم، کنترل راحت تر درجه حرارت، کاهش نیروی نگه دارنده، نیاز به فضای کارگاهی کوچک تر و کاهش هزینه ساخت قالب و اتصالات می گردد. همچنین با روش های ساده تر و کم هزینه تر می توان فشار داخلی را تامین کرد. برای مثال بجای پمپ های هیدرولیک برای تامین فشار داخلی، می توان از کپسول گاز خنثی یا هوا استفاده کرد.

3-5- تأثیر زمان اعمال فشار بر شعاع گوشه

در دماهای بالا رابطه ی تنش سیلان به صورت معادله ی (1) می باشد.

$$\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

در این معادله σ تنش سیلان، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، K ضریب استحکام و m توان حساسیت به نرخ کرنش می باشد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند، زمان اعمال فشار می باشد. با افزایش زمان اعمال فشار، نرخ کرنش کاهش می یابد. با توجه به رابطه (1) انتظار می رود با کاهش نرخ کرنش، تنش تسلیم کاهش یابد و میزان تغییر شکل و پرشدگی گوشه ها در فشاری ثابت بیشتر شود. در شکل 11 دو نمونه از قطعات شکل گرفته شده در دمای 500 °C و فشار 9 bar نشان داده شده است. در قطعه (a) زمان رسیدن به فشار نهایی

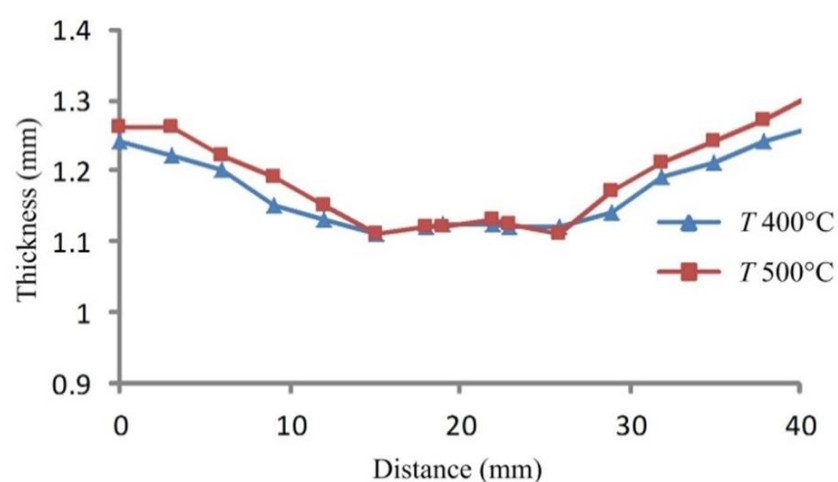


Fig. 9 Thickness distribution at different temperature and 6.5mm radius
شکل 9 توزیع ضخامت در دماهای متفاوت و شعاع ثابت 6.5mm

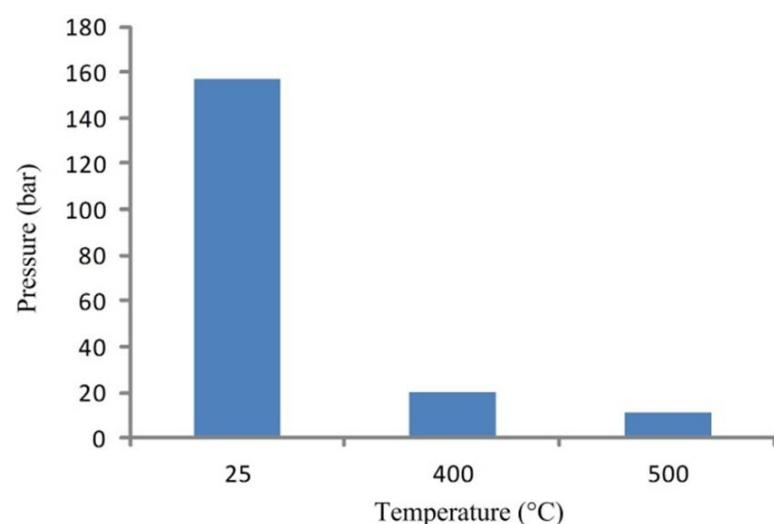


Fig. 10 Effect of temperature on forming pressure

شکل 10 تأثیر دما بر فشار شکل دهی

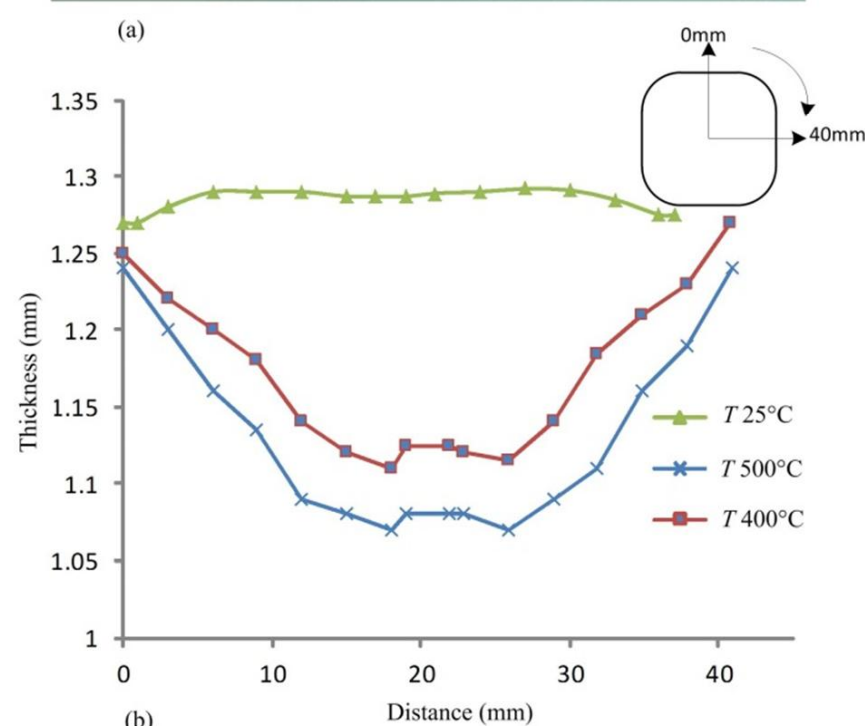
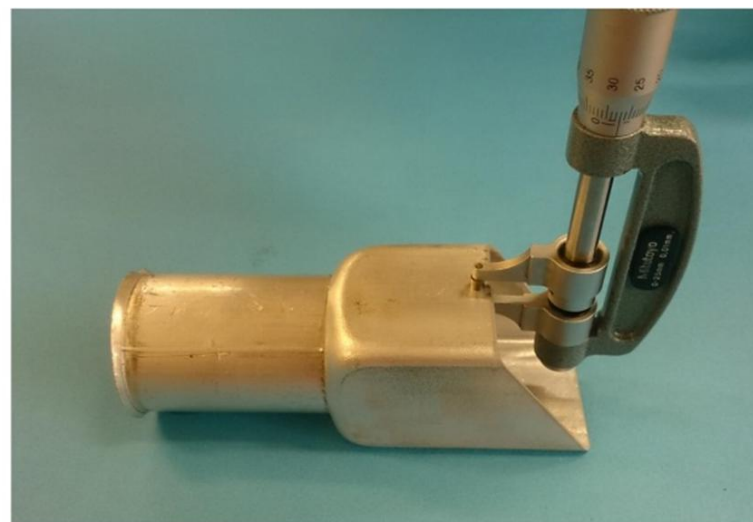


Fig. 8 (a) Thickness measurement (b) Effect of temperature on thickness distribution

شکل 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 500 °C نشان می دهد که دارای شعاع گوشه های متفاوت می باشند. برای اینکه بتوان تأثیر واقعی دما را بر توزیع ضخامت بررسی کرد، یک قطعه ی دیگر در دمای 500 °C 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 قطعه ی تولید شده در دمای 400 °C مورد مقایسه قرار گرفت. شکل 9 نتایج حاصل از این اندازه گیری را نشان می دهد. 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 قسمت هایی از قطعه که با قالب در تماس می باشد سخت تر جریان می یابد و ضخامت آن قسمت ها کمتر کاهش می یابد. از طرفی با افزایش دما کرنش شکست افزایش می یابد و قطعه توانایی آن را دارد که به مقدار بیشتری تغییر شکل یابد. همانطور که در شکل 9 نیز نشان داده شده است ضخامت ناحیه در تماس با قالب و اختلاف ضخامت کمینه و بیشینه در دمای 500 °C بیشتر از دمای 400 °C می باشد.

3-4- تأثیر دما بر فشار شکل دهی

همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، با افزایش دما از 25 °C به 400 °C تنش تسلیم به طور چشم گیری کاهش می یابد و از 112 MPa به 16 MPa می رسد، بنابراین انتظار می رود که با افزایش دما، فشار شکل دهی

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 می‌گیرد (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 تغذیه می‌شود، و زودتر از سایر نقاط دچار پارگی می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

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 می‌دهد فرایند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا، روشی مناسب جهت شکل‌دادن آلیاژهایی می‌باشد که شکل‌پذیری کمی در دمای اتاق دارند اما در دماهای بالا شکل‌پذیری آنها افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند، 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 می‌آید و می‌توان با فشاری کمتر و تجهیزات ساده‌تر و ارزان‌تر قطعه را شکل داد.

- شعاع در دمای 400°C ، 66.6% و در دمای 500°C ، 70.2% نسبت به دمای محیط کاهش می‌یابد. شعاع از 19.5mm در 25°C به 6.5mm در 400°C و 5.8mm در 500°C می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که برای رسیدن به گوشه‌هایی تیز در قطعات مربعی با آلیاژ آلومینیوم 6063، فرایند بایستی در دماهای بالا و نزدیک به نقطه ذوب (حدود $400-500^{\circ}\text{C}$) انجام گیرد. در این دماها ماده تغییر شکل بسیار بیشتری را بدون پارگی از خود نشان می‌دهد.

- با افزایش دما و کاهش شعاع گوشه به دلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتر، کمینگی ضخامت کاهش می‌یابد و توزیع غیر یکنواختی 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 400°C و 11 bar در دمای 500°C 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.

30 ثانیه و در قطعه (b) این زمان 90 ثانیه می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری شعاع‌های قطعات مربعی حاکی از آن است که با افزایش زمان اعمال فشار، گوشه‌های تیزتری شکل می‌گیرد. همانطور که در شکل 11 نشان داده شده است، شعاع گوشه‌ی شکل گرفته شده در مدت زمان 30 ثانیه (قطعه (a)) برابر 7.6 mm و شعاع شکل گرفته شده در مدت زمان 90 ثانیه (قطعه (b)) برابر 7 mm می‌باشد.

3-6- 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

شکل 11 قطعات تولید شده در زمان‌های اعمال فشار مختلف (a) 30 ثانیه (b) 90 ثانیه

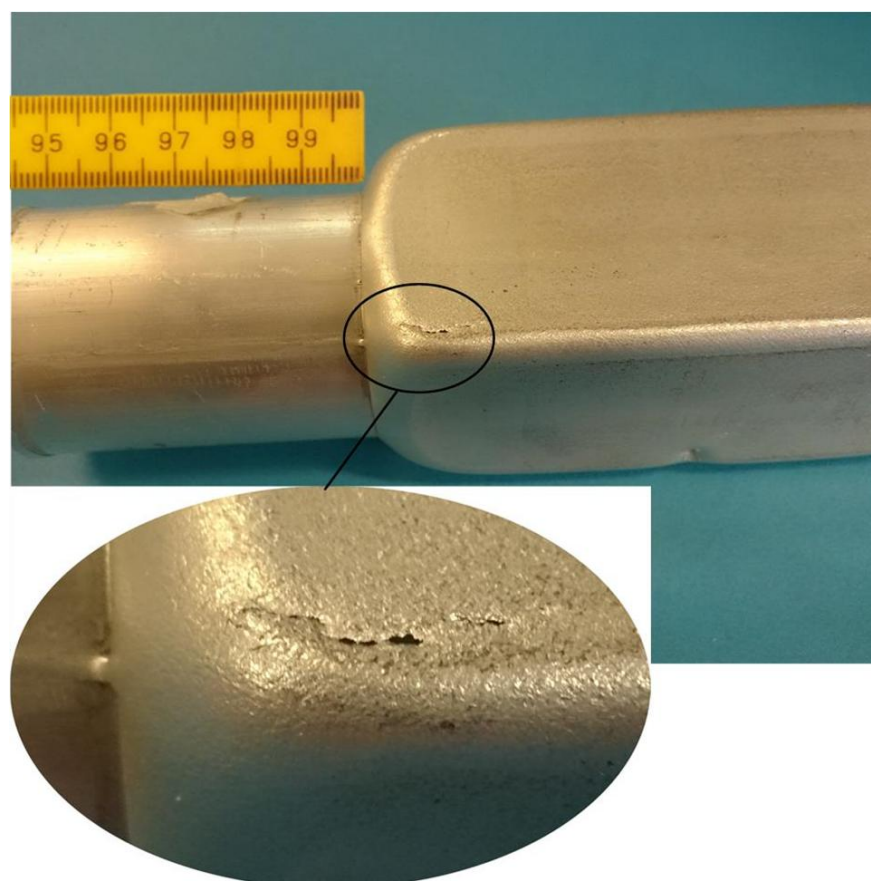


Fig. 12 Bursting area in final specimen

شکل 12 ناحیه پارگی در قطعه نهایی

- 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 فارسی)
- [10] S.M.H. Seyedkashi, H. Moslemi Naeini, G.H. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, Y.H. Moon, Numerical and experimental study on the effects of 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 فارسی)
- [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, LIN Zhe, 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 در دمای 500 °C و فشار 9 bar، شعاع گوشه از 7.6mm به 7mm کاهش می‌یابد.

– 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

- [1] 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 فارسی)
- [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 فارسی)
- [5] Mun-Yong Lee, Sung-Man Sohn, Chang-Yong Kang, Dong-Woo Suh, Sang-