



## مقایسه تجربی شکل پذیری لوله‌های تک لایه آلومینیوم و دو لایه مس-آلومینیوم در فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز

سید جمال حسینی پور<sup>1\*</sup>، حسن کارگر پیشبجاری<sup>2</sup>، جواد شهبازی کریمی<sup>3</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* بابل، صندوق پستی 484، j.hosseini@nit.ac.ir

### کلیدواژگان

شکل دهی داغ با دمش گاز  
لوله دو لایه کامپوزیتی  
برآمدگی لوله  
آلیاژ آلومینیوم AA6061  
آلیاژ مس C1220

### چکیده

شکل دهی فلز داغ با دمش گاز (HMGF) فرایندی است که در آن ماده اولیه بصورت ورق یا لوله تا دمای بالای نصف نقطه ذوب مطلق آن گرم شده و سپس بوسیله اعمال فشار گاز تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت دمایی در فرایند هیدروفرمینگ، امروزه فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز به عنوان فرایندی جذاب مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش شکل پذیری لوله‌های تک لایه آلومینیومی و دو لایه فلزی مس-آلومینیوم در فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا اثر فشار در میزان برآمدگی لوله در لوله‌های تک لایه آلومینیومی مطالعه شد. سپس لوله‌های دو لایه مس (در داخل)-آلومینیوم (در خارج) مورد آزمایش قرار گرفت. لوله آلومینیومی از جنس آلیاژ AA6061 و لوله مسی از جنس آلیاژ C1220 انتخاب گردید. آزمایش‌ها برای مقایسه در دو شرایط گرمایی هم‌دما و گرادیانی انجام شده و میزان انبساط و نحوه پارگی بررسی گردید. نتایج حاصل نشان داد که ماکزیمم برآمدگی لوله‌ها تا ترکیب در شرایط هم‌دما بهتر از شرایط گرادیانی می‌باشد. بیشترین میزان برآمدگی لوله برای نمونه‌های تک لایه آلومینیومی در حدود 32/21 درصد و برای نمونه‌های دو لایه مس-آلومینیوم در حدود 34/68 درصد برای شرایط گرمایی هم‌دما بدست آمد.

## Experimental comparison of the formability of single-layer aluminum tubes and two-layer copper-aluminum tubes in the hot gas blow forming process

Seyed Jamal Hosseini-pour<sup>\*1</sup>, Hassan Kargar Pishbijari<sup>1</sup>, Javad Shahbazi-Karami<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 484 Babol, Iran, j.hosseini@nit.ac.ir

### Keywords

Hot metal gas forming  
Two layers composite tube  
Tube bulging  
Aluminum alloy AA6061  
Copper alloy C1220

### Abstract

Hot metal gas forming (HMGF) is a process in which the sheet or tube metal is heated to temperatures above half the absolute melting point and then, plastic deformation is placed by applying gas pressure. Due to temperature limitations in hydroforming process, nowadays HMGF process has been of interest to researchers. For this purpose, at first the effect of pressure on the tube bulging of single-layer aluminum tubes was studied. Then two-layer tubes of copper (inside) - Aluminum (outside) were tested. Aluminum tubes from AA6061 and copper tubes from C1220 was selected for study. For comparison the tests were done at two thermal conditions of isothermal and with a temperature gradient, and the rate of expansion and rupture were investigated. The results showed that the maximum bulge to tube bursting in under isothermal condition is better than gradient condition. The highest bulge of about 32.21 percent for single-layer aluminum tubes and about 34.68 percent for two-layer copper-aluminum tubes was obtained under isothermal condition.

### 1- مقدمه

قطعات فلزی چندلایه با توجه به خواص مواد متفاوت از پیچیدگی خاصی برخوردار است. در سال‌های اخیر محققان مقالاتی را در خصوص دو لایه و چندلایه نمودن لوله‌ها با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ ارائه دادند [2,3]. برخی از کاربردهای لوله‌های چندلایه عبارتند از اتصالات رادیاتور، لوله‌های دو فلزی

امروزه نیاز روز افزون صنایع مختلف همچون صنایع هوافضا و خودروسازی به تولید قطعات چندلایه منجر به گسترش تحقیقات در این رابطه شده است. تولید قطعات لوله‌ای توسط فرایندهای شکل دهی بیش از دو دهه قدمت دارد [1]. شکل دهی

### Please cite this article using:

S. J. Hosseini-pour, H. Kargar Pishbijari, J. Shahbazi-Karami, Experimental comparison of the formability of single-layer aluminum tubes and two-layer copper-aluminum tubes in the hot gas blow forming process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 36-46, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نتایج نشان داد که بارگذاری چند زمانه با نیروی محوری، بهترین حالت پروفیل پرشدگی نمونه‌ها در قالب T شکل و برآمدگی قالب بسته منجر شده است.

فاطمی و همکاران [11] به مطالعه تأثیر فشار سیال شکل-دهی در ضخامت‌های مختلف از لوله مسی (C11000) بدون اعمال نیروی محوری پرداختند. قطر ناحیه برآمدگی در قالب به حدود 20/87 میلی‌متر رسید. اسلام و همکاران [12] امکان‌سنجی شکل‌دهی لوله‌های چندلایه به صورت تجربی و شبیه‌سازی در قالب X شکل توسط روش هیدروفرمینگ مورد مطالعه قرار دادند. لوله داخلی از جنس مس و لوله خارجی از جنس برنج انتخاب شده و ماکزیمم فشار داخلی به منظور شکل-دهی تا 37/5 مگاپاسکال اعمال گردید. اسلام و همکاران [13] در پژوهشی دیگر با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس<sup>2</sup> به بررسی تنش‌ها در شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله چندلایه در قالب T شکل پرداختند. آن‌ها دریافتند که با کنترل نحوه اعمال بارگذاری می‌توان به مقدار حداکثری برآمدگی در قالب T شکل دست یافت. همچنین با افزایش فشار داخلی میزان ارتفاع برآمدگی افزایش خواهد یافت و بیشترین تمرکز تنش در ناحیه مرکزی برآمدگی تحت تأثیر فشار داخلی می‌باشد. الاسواد و همکاران [14] با مطالعه شکل-دهی هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه و دولایه در قالب T شکل با استفاده از روش المان محدود و تجربی به تعیین مسیر بارگذاری همراه با تغذیه محوری پرداختند. آن‌ها با بکارگیری مسیر فشارهای مختلف دریافتند که مقدار چروکیدگی در حالت چندلایه نسبت به حالت تک‌لایه از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد. الاسواد و همکاران [15] در پژوهشی دیگر با به‌کارگیری تجزیه و تحلیل المان محدود و طراحی آزمایش به مطالعه پارامتر هندسی در هیدروفرمینگ لوله دولایه پرداختند. آن‌ها ارتفاع بالچ، کاهش ضخامت و مقدار ارتفاع چروکیدگی را به عنوان تابعی از عوامل هندسی با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM) در شکل‌دهی لوله‌های دولایه X شکل در نظر گرفتند. آن‌ها دریافتند که استفاده از یک قالب با شعاع بزرگ‌تر نوع X شکل، سبب افزایش مقدار برآمدگی و کاهش چروکیدگی در منطقه تغییر شکل با کمترین میزان نازک‌شدگی در منطقه بحرانی لوله‌های چندلایه می‌شود. الاسواد و همکاران [16] در پژوهشی دیگر به مقایسه المان محدود شکل‌دهی لوله‌های تک‌لایه و دولایه T شکل توسط فرایند هیدروفرمینگ پرداختند. آن‌ها معیار اصلی شکل‌دهی را میزان کاهش ضخامت و

با استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی شیمیایی و اکسید شدن (CRA<sup>1</sup>)، برای نگهداری از مواد شیمیایی در محیط ویژه، که در صنایع هسته‌ای و مجموعه پالایش نفت بکار گرفته می‌شود. علاوه بر آن استفاده از لوله‌های چندلایه کامپوزیتی، خاصیت ارتعاشی را در مصارف خاص به طور قابل توجه تعدیل می‌نماید [5,4]. در شکل 1 نمونه‌هایی از قطعات لوله‌ای دولایه نشان داده شده است. استفاده از فرایندهای مرسوم شکل‌دهی سرد مانند هیدروفرمینگ، با میزان شکل‌پذیری پایین، و مقدار فشار شکل‌دهی خیلی بالا (بیش از 2000 bar) در دمای محیط به عنوان اصلی‌ترین مانع برای تولید گسترده لوله‌های چندلایه می‌باشد [7].

هوانگ و همکاران [8] به تجزیه و تحلیل هیدروفرمینگ لوله از آلیاژ آلومینیوم 6063-T4، در قالبی با مقطع مربعی شکل پرداختند. آن‌ها با آنیل نمودن نمونه‌های آزمایش، قابلیت شکل-پذیری را افزایش دادند.

یانگ و همکاران [9] پروفیل پرشدگی شعاع گوشه قالب و توزیع ضخامت لوله‌های مس (C122) و فولاد زنگ‌نزن (SS304) در قالب‌های مثلثی نامنظم، چهارضلعی نامنظم، و پنج ضلعی را بررسی نمودند. ایمانی‌نژاد و همکاران [10] به مطالعه‌ای تجربی و شبیه‌سازی اعمال مسیر بهینه بارگذاری در شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله 6063-T4، برای برآمدگی در قالب بسته و T شکل پرداختند. آن‌ها بر روی سه نوع مسیر بارگذاری متفاوت (تک زمانه، دو زمانه، و چهار زمانه) و در هرکدام از مسیرهای بارگذاری، از دو نوع اعمال فشار داخلی (فشار پایین و بالا) استفاده نمودند.

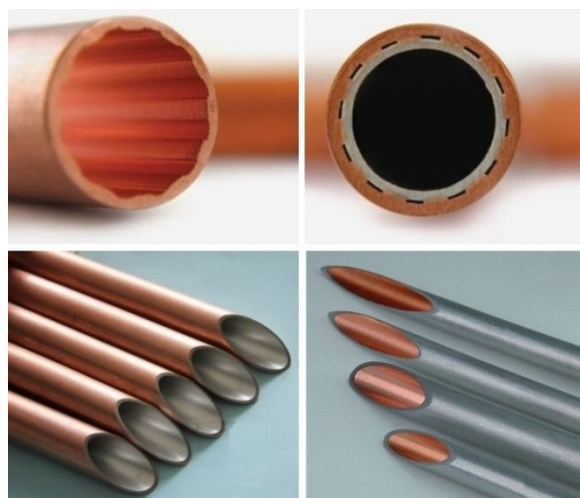


Fig. 1 Some two layers tubular parts [6]

شکل 1 چند نمونه از قطعات لوله‌ای دولایه [6]

<sup>2</sup> Ansys

<sup>1</sup> Corrosion resistive alloy

33 درصد افزایش می یابد. یانگ و همکاران [23] با بررسی میزان شکل پذیری لوله از جنس آلومینیوم 5A02 در دمای کاری گرم به مطالعه تجربی شکل دهی هیدروفرمینگ لوله پرداختند. آن ها خواص مکانیکی لوله را با آزمون کشش تک محوره در هر یک از دماهای مورد آزمایش مورد بررسی قرار دادند. آزمون برآمدگی لوله در دماهای مختلف به منظور بررسی شکل پذیری لوله انجام شد.

کیم و همکاران [24] به تجزیه و تحلیل المان محدود و تایید تجربی برآمدگی آزاد لوله های آلومینیوم اکستروژده 6061 توسط فرایند هیدروفرمینگ گرم پرداختند. آن ها با اعمال تغذیه محوری میزان شکل پذیری لوله در فشارهای کاری 15/2، 16/8 و 18/7 مگاپاسکال با جابجای محوری به ترتیب 0، 10، 15 میلی متر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد جابجایی محوری سبب افزایش میزان شکل پذیری می شود. لیو و همکاران [27] به بررسی تأثیر تغذیه محوری در رفتار تغییر شکل انبساطی لوله تیتانیوم 3Al-2.5V در شکل دهی داغ لوله به روش دمش گاز پرداختند. آن ها دریافتند که در حالت بدون تغذیه محوری، چند گلوبی در امتداد مقطع رخ می دهد که سبب توزیع ضخامت غیر یکنواخت در مقطع شکل داده شده رخ می دهد. افزایش بیشتر تغذیه محوری اندازه متوسط دانه بزرگتر و دانه ها عموماً در امتداد جهت محیطی کشیده می شوند.

شکل دهی مواد در دمای کاری داغ به صورت سوپرپلاستیک با دمش گاز و نرخ کرنش زیاد<sup>1</sup> نظر خیلی از محققان را به خود جلب نموده است. در این راستا شرکت جنرال موتور یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک سریع<sup>2</sup> به کمک دمش گاز را توسعه داده است. به طوری که این تکنولوژی امکان ساخت و تولید اشکال پیچیده صنعتی در کمترین زمان را امکان پذیر می سازد [26، 25]. تاکنون تحقیقاتی در خصوص شکل دهی برآمدگی لوله های کامپوزیتی دولایه در دمای بالا به وسیله فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز گزارش نشده است. در این پژوهش شکل-پذیری لوله های دولایه کامپوزیتی مس-آلومینیوم در فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز مورد بررسی تجربی قرار گرفت و با نمونه های تک لایه آلومینیومی مقایسه شده است. لوله آلومینیومی از جنس آلیاژ AA6061 و لوله مسی از جنس آلیاژ C1220 انتخاب گردید. آزمایش ها جهت مقایسه در دو شرایط گرمایی هم دما و گرادیانی انجام شده و میزان انبساط و نحوه پارگی بررسی گردید.

چروکیدگی و ماکزیمم مقدار برآمدگی در لوله مد نظر قرار دادند. نتایج حاصله منجر به تعیین مسیر بارگذاری در نوع شکل دهی لوله دولایه T شکل مس-برنج گردید.

سید کاشی و همکاران [17] با مطالعه شکل دهی لوله های دولایه در قالب برآمدگی شکل (لایه خارجی مسی C11000 و لایه داخلی آلومینیوم 1050) با تغذیه محوری به روش هیدروفرمینگ پرداختند. نتیجه مطلوب در شکل دهی لوله دولایه مس-آلومینیوم در فشار 61 مگاپاسکال شکل داده شد. سید کاشی و همکاران [18] در پژوهشی دیگر به تجزیه و تحلیل معادلات حاکم بالچ آزاد لوله های دولایه توسط فرایند هیدروفرمینگ پرداختند. بررسی بالچ آزاد با تغذیه محوری و بدون تغذیه محوری بر روی لوله های مس-آلومینیوم (C11000-AL150) و نمونه های فولاد ساده کربنی- فولاد زنگ نزن انجام شد. همچنین مدل نظری در تعیین فشار ایده آل به منظور جلوگیری از چروکیدگی ارائه شد.

لوح موسوی و همکاران [19] با استفاده از اعمال فشار نوسانی، در شکل دهی هیدروفرمینگ دولایه مدل اصلاح شده ای ارائه دادند. آن ها با بکارگیری مسیر فشار داخلی به صورت نوسانی، میزان شکل پذیری لوله های دولایه مس-برنج را در قالب X شکل مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که فشار نوع نوسانی حالت بهتری از توزیع ضخامت در نمونه های مس-آلومینیوم در مقایسه با ماکزیمم فشار یکنواخت ایجاد می کند. علاوه بر این آن ها دریافتند که عامل نوسانی فشار سبب کیفیت سطح در قطعه شکل گرفته می شود و ایجاد چروکیدگی در سطح تغییر شکل به طور قابل ملاحظه ای نسبت به مسیر فشار خطی کاهش می یابد. اچ بی خو و همکاران [20] یک مدل تحلیلی برای پیش بینی محدوده فشار شکل دهی لوله سه لایه ارائه دادند. شهبازی کرمی و همکاران [21] به مطالعه پارامترهای هندسی در ایجاد یک لوله ساندویچی سه لایه جدید با استفاده از شبیه سازی المان محدود پرداختند. از فوم آلومینیوم به عنوان لایه میانی، لایه داخلی از مس و لایه خارجی از برنج انیل شده استفاده نمودند. آن ها دریافتند که در محدوده شکل گیری لوله در قالب X شکل، حداقل ضخامت و حداکثر تنش در منطقه وسط لوله می باشد.

مسلمی نایینی و همکاران [22] با شبیه سازی و بررسی تجربی شکل دهی هیدروفرمینگ گرم لوله، شکل پذیری آلیاژ آلومینیوم 1050 را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها دریافتند که با افزایش مقدار درجه حرارت از دمای محیط تا 190 درجه سانتی گراد، میزان حداکثر برآمدگی برای این آلیاژ از 12/5 تا

<sup>1</sup> High strain rate superplasticity

<sup>2</sup> Quick plastic forming

## 2- مواد و روش آزمایش تجربی

لوله آلومینیومی از جنس آلیاژ AA6061 با ضخامت 1/45 میلی‌متر و قطر خارجی 25/08 میلی‌متر و لوله مسی از جنس آلیاژ C1220 با ضخامت 1/23 میلی‌متر و قطر 22/22 میلی‌متر انتخاب گردید. مشخصات هندسی لوله‌ها در جدول 1 و شکل 2 آورده شده است. کلیه آزمایشها در قالب بسته با قطر داخلی ناحیه برآمدگی قالب (D<sub>in</sub>, Die) به مقدار 35 میلی‌متر انجام شده است. جنس قالب از فولاد گرم کار (H13) انتخاب گردید.

در شکل 3 نمای شماتیکی از قالب مورد استفاده و فرایند شکل‌دهی داغ لوله با دمش گاز نشان داده شده است. برای آماده‌سازی لوله‌های دولایه، ابتدا لوله آلومینیومی و مسی به ابعاد مورد نظر رسیده و سطوح تماس آن‌ها کاملاً پولیش گردید. سپس با اعمال نیرو به صورت انطباق پرسی لوله مسی در داخل لوله آلومینیومی قرار داده شد. برای انجام آزمایش نمونه‌ها پس از آماده‌سازی مطابق شکل 3 در داخل قالب قرار گرفت. سپس با اعمال نیرو توسط پرس مکانیکی کلمپینگ مجموعه قالب به منظور آب‌بندی و جلوگیری از نشتی گاز انجام شد. کل مجموعه قالب توسط کوره حرارتی تا دمای مورد نظر آزمایش حرارت داده شد. از ترموکوپل سری K، به منظور کنترل مقدار حرارت مشخصه به قالب و تثبیت مقدار دمای آزمایش استفاده شده است. مقدار حرارت سطح لوله، هر لحظه به طور مستقیم از ترموکوپل توسط کنتاکتور کنترل و از اختلاف حرارتی در سطح محیطی قالب و نمونه قطعات جلوگیری می‌نماید.

در شکل‌های 4 و 5 نمایی از مجموعه قالب و تجهیزات استفاده شده در آزمایش نشان داده شده است. با توجه به اینکه شرایط آزمایش به دو صورت هم دما و گرادیانی می‌باشد، لذا نحوه اعمال دمش گاز آرگون مطابق با شرایط آزمایش تعریف شده است. در شرایط آزمایش هم دما، به منظور تثبیت دمایی در کل منطقه لوله، بعد از به دما رسیدن مجموعه قالب و نمونه‌ها، تا مدت زمان 20 دقیقه در دمای ثابت نگه داشته می‌شود. سپس اعمال دمش گاز آرگون جهت شکل‌دهی انجام می‌شود. در انجام آزمایش نوع گرادیانی، اعمال دمش گاز آرگون در بازه‌ی زمانی شروع فرایند شکل‌دهی داغ متناسب با نوع لایه آلومینیوم مد نظر قرار گرفته است. شکل‌دهی نوع گرادیانی با اعمال دمش گاز به همراه اختلاف دمایی در مناطق مختلف لوله و قالب انجام می‌شود. در جدول 2 شرایط انجام آزمایش آورده شده است. بعد از به دما رسیدن مجموعه قالب و لوله، دمش گاز آرگون تا فشار حداکثر 40 بار اعمال می‌شود. مدت زمان شکل‌دهی تا ترکیب‌دهی در حالت تک‌لایه و دولایه با مقدار فشار گاز

مختلف اعمالی تعیین می‌شود. به منظور اندازه‌گیری و بررسی ماکزیمم برآمدگی، از مقطع قطری در حالت شکل گرفته شده توسط دستگاه وایرکات برش داده شد. در شکل 6 دستگاه وایرکات به منظور برش قطعات شکل گرفته نشان داده شده است. میزان انبساط لوله‌ها در حالت تک‌لایه و دولایه کامپوزیتی با تعیین ماکزیمم برآمدگی در حالت‌های مختلف شکل‌دهی گرادیانی و هم‌دما، از رابطه (1) مطابق با شکل 7 محاسبه گردید.

$$\text{Bulge ratio} = \frac{D_{\max} - D_0}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

جدول 1 مقدار ضخامت و قطر لوله‌های مورد استفاده در شکل‌دهی

Table 1 The thickness and diameter of the tubes used in forming

Tubes	Do, Cu/Al	t <sub>1,2</sub> Cu/Al
Al6061	25/08	1/45
C1220	22/22	1/23

جدول 2 پارامترهای فرایندی شکل‌دهی لوله‌های تک‌لایه و دولایه

Table 2 The parameters of the process of forming a single layer and two layers tubes

فرایند شکل‌دهی	نحوه دمش گاز آرگون	فشار شکل‌دهی (bar)	دمای شکل‌دهی (°C)
هم دما	20 دقیقه بعد از رسیدن مجموعه قالب به دما	1-40	550-570
گرادیانی	دمش گاز از 350 درجه سانتی‌گراد	1-40	550-570

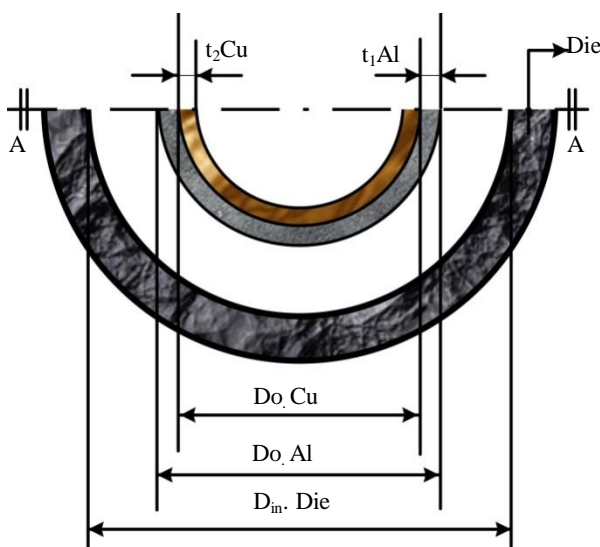


Fig. 2 Schematic of the geometric parameters of tubes and bulge region of gas blow die

شکل 2 شماتیک پارامتر هندسی لوله و منطقه بالج قالب دمش گاز

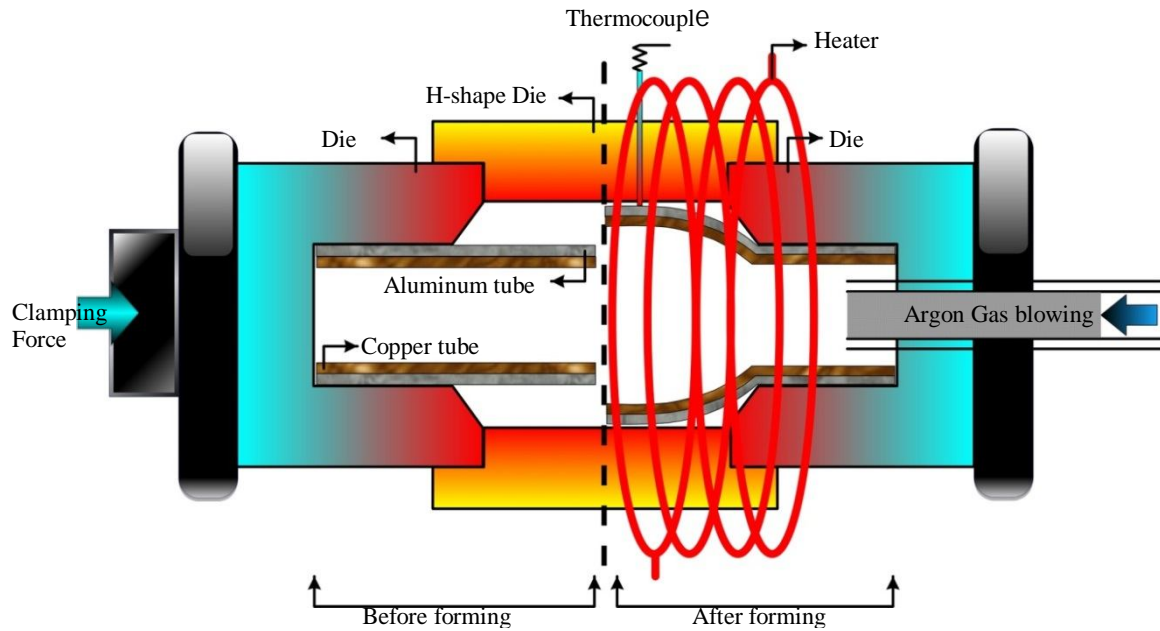


Fig. 3 Schematic hot forming performance of the composite layers by HMGF process

شکل 3 شماتیک عملکرد فرایند شکل‌دهی داغ لوله‌های دولایه کامپوزیتی توسط فرایند HMGF

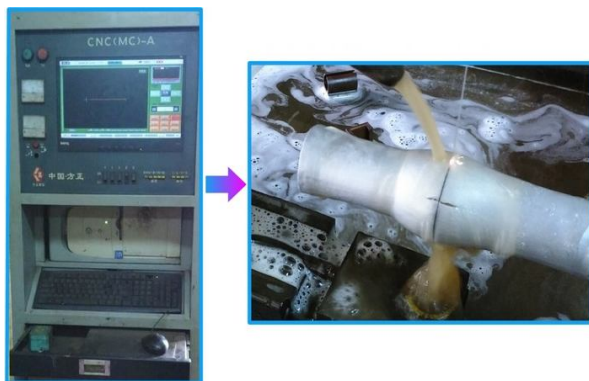


Fig. 6 A view of the cutting of samples formed by wire cut device.

شکل 6 نمایی از برش نمونه‌های شکل داده شده توسط دستگاه وایرکات

### 3- نتایج و بحث

بررسی شکل‌پذیری و نحوه پارگی تحت تأثیر شرایط فرایندی شکل‌دهی داغ از مهم‌ترین پارامترهای شکل‌دهی لوله‌های کامپوزیتی در دماهای بالا می‌باشد. نسبت انبساط لوله تحت تأثیر سه عامل اصلی دما، فشار و زمان شکل‌دهی می‌باشد. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، ابتدا آزمون‌های اولیه در لوله آلومینیوم تک‌لایه تحت تأثیر شرایط فرایندی داغ جهت تعیین بیشترین برآمدگی لوله صورت گرفت. سپس مطابق شکل 9 نحوه پارگی در نواحی ترکیدگی لوله‌ها با بررسی زمان-فشار و میزان درصد انبساط در نوع دولایه مس-آلومینیوم، در حالت‌های گرادپانی و هم دما بررسی شد.

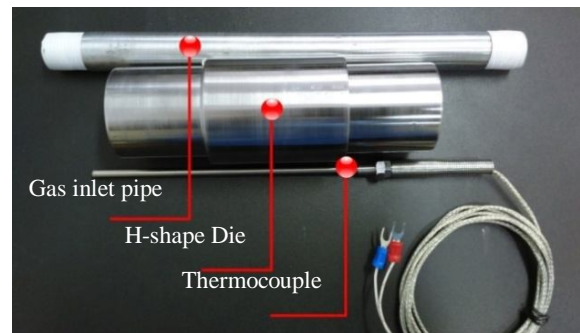


Fig. 4 Die setup for HMGF process

شکل 4 نمایی از مجموعه قالب شکل‌دهی داغ لوله با گاز (HMGF)

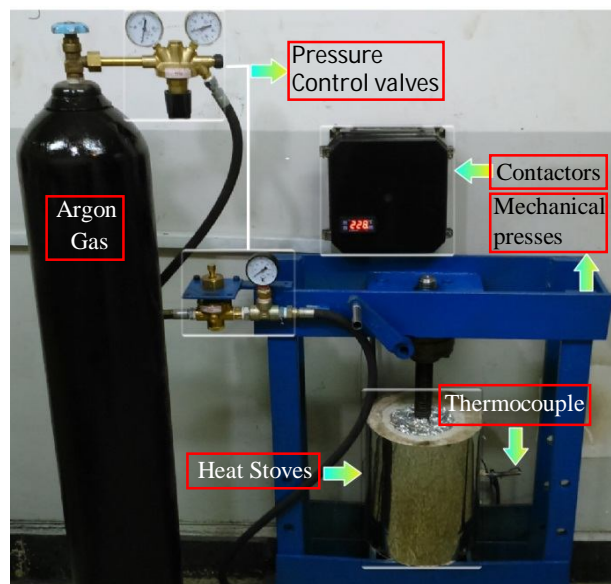


Fig. 5 The equipment of HMGF process

شکل 5 نمایی از تجهیزات فرایند شکل‌دهی داغ لوله (HMGF)

از طرفی میزان انبساط و برآمدگی بیشتری نسبت به حالت گرادیانی در ناحیه تحت تأثیر قالب ایجاد می نماید. در شکل 11 نمایی از قطعات شکل داده شده در حالت تک لایه آلومینیومی نشان داده شده است.

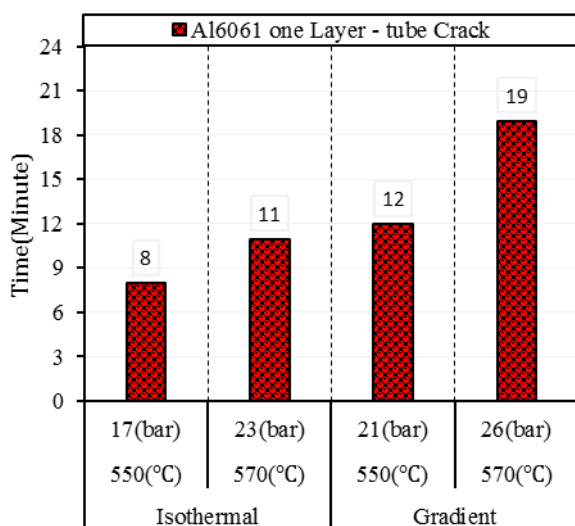


Fig. 10 Comparison of gradient and isothermal conditions in forming of AA6061 single layer by HMGF process

شکل 10 مقایسه حالت های گرادیانی و هم دما در شکل دهی تک لایه AA6061 در فرایند HMGF

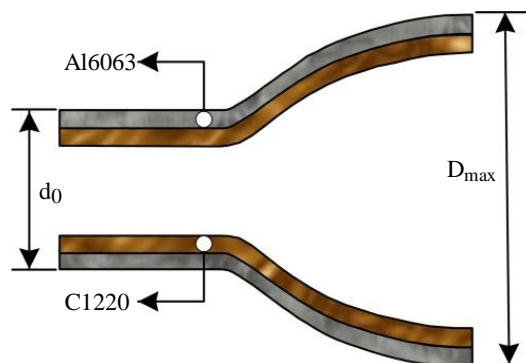


Fig. 7 Determination of expansion ratio in hot tubes forming.

شکل 7 نحوه تعیین نسبت انبساط در شکل دهی داغ لوله

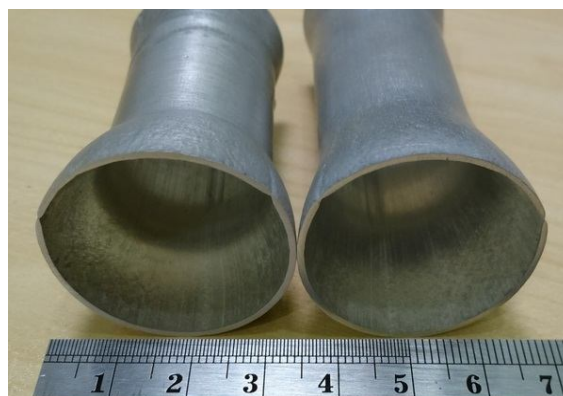


Fig. 8 single layer tube formed of AA6061 in the HMGF process

شکل 8 لوله تک لایه آلومینیوم 6061 شکل داده شده در فرایند شکل دهی HMGF

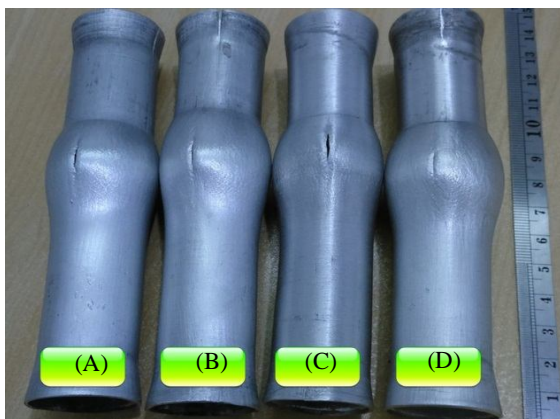


Fig. 11 Single layer samples formed by HMGF process at various conditions, A) Gradient 570 °C, B) Isothermal 570 °C, C) Gradient 550 °C, D) Isothermal 550 °C

شکل 11 نمونه های تک لایه شکل داده شده در فرایند HMGF (A) گرادیانی 570 درجه سانتی گراد، (B) هم دما 570 درجه سانتی گراد (C) گرادیانی 550 درجه سانتی گراد، (D) هم دما 550 درجه سانتی گراد

### 3-2- تأثیر شرایط آزمایش هم دما و گرادیانی در زمان پارگی لوله دولایه

در شکل 12 منحنی حالت های انجام آزمایش دولایه کامپوزیتی مس-آلومینیوم نشان داده شده است. در شکل 13 نمونه قطعات شکل داده شده دولایه مس-آلومینیوم نشان داده شده است.



Fig. 9 two layers composite tubes of copper - aluminum after forming by HMGF process

شکل 9 لوله دولایه مس-آلومینیوم شکل داده شده در فرایند شکل دهی HMGF

### 3-1- تأثیر شرایط آزمایش هم دما و گرادیانی در زمان پارگی لوله تک لایه

در شکل 10 مقایسه حالت های شکل دهی هم دما و گرادیانی در شرایط مختلف آزمایش نشان داده شده است. با بررسی میزان پارگی، نتایج آزمایش نشان داد که در شرایط هم دما در دماهای 550 و 570 درجه سانتی گراد در زمان کمتر، میزان شکل گیری بیشتر تا مقدار پارگی نسبت به حالت آزمایش گرادیانی می باشد.

### 3-3- مقایسه شکل دهی هم دما و گرادیانی در ماکزیمم برآمدگی لوله تک لایه

در شکل 14 مقطع ماکزیمم برآمدگی نمونه شکل داده شده نشان داده شده است. با بررسی ماکزیمم برآمدگی در لوله های تک لایه مشخص شد که در حالت آزمایش هم دما بیشترین انبساط حرارتی در دمای 550 درجه سانتی گراد به میزان 33/16 میلی متر ایجاد می شود.

از طرفی بیشترین انبساط در دمای مذکور در حالت گرادیانی به مقدار 0/67 میلی متر کمتر از حالت هم دما می باشد. افزایش دما به 570 درجه سانتی گراد سبب میزان انبساط کمتری نسبت به دمای 550 درجه می شود. در شکل 15 نمودار ماکزیمم برآمدگی آزمایش های مختلف نشان داده شده است.



Fig. 14 A view of the maximum bulge of single layer aluminum tubes

شکل 14 نمایی از ماکزیمم برآمدگی لوله تک لایه آلومینیوم

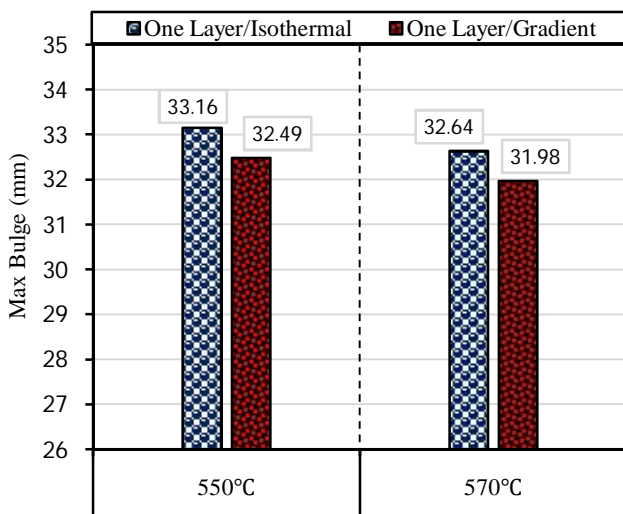


Fig. 15 The maximum bulge of single layer aluminum tubes

شکل 15 مقادیر ماکزیمم برآمدگی لوله آلومینیوم تک لایه

همان طور که مشاهده می شود افزایش دما از 550 به 570 درجه سانتی گراد در نمونه های گرادیانی سبب ایجاد پارگی در زمان کمتری نسبت به حالت شکل دهی هم دما می شود. در حالت مقایسه ای گرادیانی با یکدیگر، در دمای 550 درجه سانتی گراد در زمان و فشار بیشتری نسبت به دمای 570 درجه سانتی گراد پارگی در مقطع بحرانی رخ می دهد. در دمای 550 درجه سانتی گراد و در فشار 40 بار، میزان انبساط لوله در فشار ماکزیمم شکل دهی، بیشترین حد تحمل شکل پذیری را در نشان می دهد.

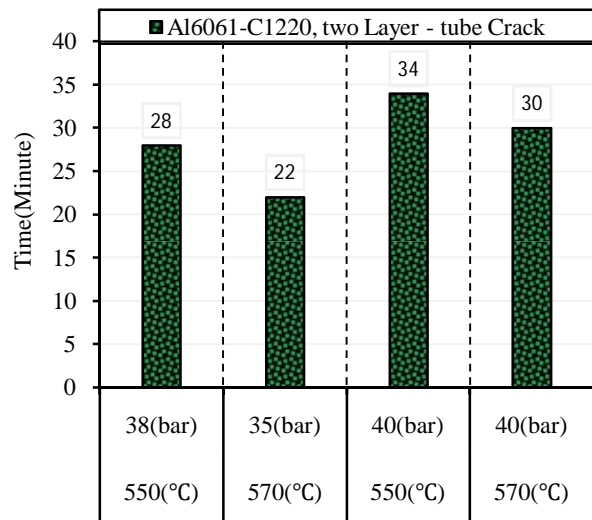


Fig. 12 Comparison of the gradient and isothermal conditions in forming of two layers Cu- Al in HMGF process

شکل 12 مقایسه ای حالت گرادیانی و هم دما در شکل دهی دولایه آل-کوپر در فرایند HMGF



Fig. 13 Two layers samples formed by HMGF process at various conditions, A) Isothermal-570 ° C, B) gradient -570 ° C, C) Gradient -550 ° C, D) Isothermal -550 ° C

شکل 13 نمونه های دولایه شکل داده شده در فرایند HMGF، (A) هم دما 570 درجه سانتی گراد، (B) گرادیانی 550 درجه سانتی گراد، (C) گرادیانی 570 درجه سانتی گراد، (D) هم دما 570 درجه سانتی گراد

از دو مقطع بحرانی  $C_1$  و  $C_2$  مطابق شکل 20 می باشد. با تعیین مقدار درصد انبساط در نمونه های دولایه و تک لایه، میزان حساسیت به دمای شکل دهی قابل مشاهده می باشد. به طوری که این موضوع در نمونه های تک لایه نسبت به حالت دولایه مس-آلومینیوم بیشتر می شود. با افزایش دما از 550 درجه به 570 درجه سانتی گراد، در حالت هم دما تک لایه آلومینیوم به مقدار 2/07 درصد میزان شکل پذیری کاهش یافته است. همچنین در نوع گرادیانی به میزان 2/03 درصد ماکزیمم برآمدگی تا لحظه پارگی کاهش یافته است. در حالت دولایه مس-آلومینیوم میزان نرخ حساسیت به دما نسبت به حالت تک لایه کمتر می باشد. به طوری که در حالت هم دما با افزایش دما از 550 درجه سانتی گراد به 570، به مقدار 0/55 درصد مقدار برآمدگی تا لحظه پارگی کاهش یافته است. این میزان در حالت دولایه گرادیانی به میزان 0/64 درصد کاهش می یابد.

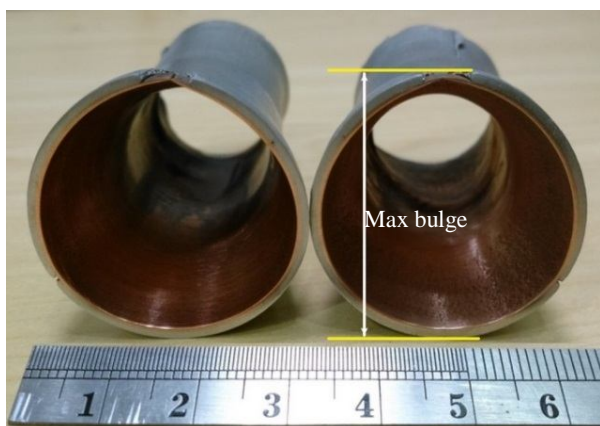


Fig. 15 A view of the maximum bulge of copper-aluminum two layer tubes

شکل 16 نمایی از ماکزیمم برآمدگی لوله دولایه مس-آلومینیوم

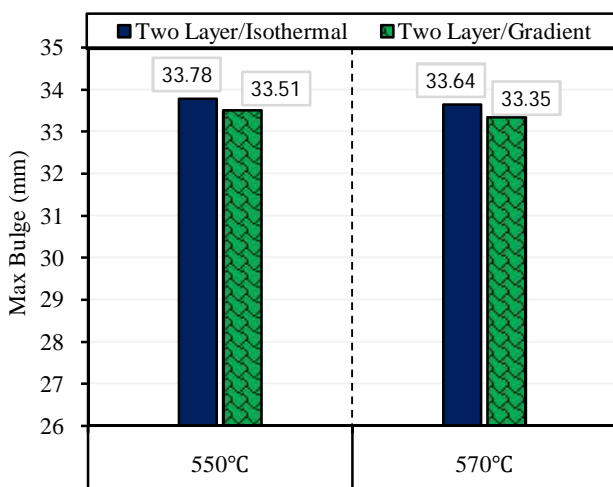


Fig. 17 The maximum bulge of two layer tubes

شکل 17 مقادیر ماکزیمم برآمدگی لوله دولایه مس-آلومینیوم

مهم ترین عامل کاهش شکل پذیری، تشکیل گلوبی زود هنگام و ترکیدگی در اثر حرارت بیشینه و عدم تحمل فشار شکل دهی در ناحیه ماکزیمم نازک شدگی می باشد. در نمونه لوله های آلومینیومی شکل داده شده، شروع نازک شدگی بیشینه از دو ناحیه در مقطع ماکزیمم برآمدگی در تمامی قطعات مشاهده شده است. به طوری که در یکی از این دو مقطع ماکزیمم نازک شدگی، گلوبی ایجاد می شود و آن ناحیه تحت تمرکز تنش بیشتری می باشد. با افزایش زمان در حالت هم دما ناحیه ی بحرانی تحت تمرکز تنش بیشتری نسبت به حالت گرادیانی دارد. اما به دلیل توزیع یکنواخت فشار و حرارت در ناحیه تغییر شکل، ماکزیمم بالچ در حالت هم دما بیشتر از حالت گرادیانی می باشد. در حالت گرادیانی نوع تک لایه آلومینیوم با صرف زمان و فشار بیشتر کمترین میزان شکل پذیری را نسبت به حالت هم دما ایجاد می کند.

### 3-4- مقایسه شکل دهی هم دما و گرادیانی در ماکزیمم بالچ

#### لوله دولایه

در شکل 16 ماکزیمم برآمدگی لوله های دولایه شکل گرفته نشان داده شده است. نتایج حاصل از میزان انبساط لوله های دولایه در انجام آزمایش های مختلف در شکل 17 نشان داده شده است.

ماکزیمم برآمدگی لوله در حالت دولایه به مقدار 33/78 میلی متر در حالت شکل دهی هم دما در دمای 550 درجه سانتی گراد شکل گرفته است. حالت شکل پذیری لوله دولایه، رفتار شکل دهی متفاوتی با نوع تک لایه آلومینیوم ایجاد شده است. علاوه بر شکل گیری برآمدگی بیشتر، مقدار حد تحمل لوله تا ترکیدگی خیلی بالاتر از حالت تک لایه می باشد.

### 3-5- مقایسه نسبت انبساط حالت های شکل دهی نوع تک لایه

#### و دولایه

در شکل 18 مقایسه حالت های شکل دهی لوله های تک لایه و دولایه نشان داده شده است. نتایج نشان داد که ماکزیمم برآمدگی در حالت دولایه به مراتب بیشتر از حالت تک لایه می باشد. دلیل اصلی این موضوع تحمل فشار شکل دهی توسط لوله مسی در دماهای انجام آزمایش می باشد.

بررسی مقایسه ای مقدار درصد انبساط در لوله های تک لایه و دولایه شکل گرفته در شکل 19 نشان داده شده است. بیشترین مقدار درصد انبساط با ماکزیمم تحمل فشار و افزایش زمان در نوع دولایه مس-آلومینیوم به مقدار 34/68 درصد با ناحیه پارگی



لوله در قالب به دلیل سیلان مناسب فلز می باشد.



Fig. 20 Critical rupture zones C1 and C2 on the wall of single layer and two layer tubes by the process (HMGF)

شکل 20 ناحیه بحرانی پارگی C1 و C2 در دیواره لوله تک لایه و دو لایه

بررسی ها نشان داد که ماکزیمم برآمدگی در لوله های تک لایه، در حالت آزمایش همدمای 550 درجه سانتی گراد با نسبت انبساط 32/21 درصد شروع به پارگی می کند.

بیشترین مقدار برآمدگی در حالت دو لایه مس-آلومینیوم، در آزمایش همدمای به مقدار 34/68 درصد در دمای 550 درجه سانتی گراد اتفاق می افتد.

پارگی در مقاطع نمونه ها در حالت تک لایه و دو لایه، در دو ناحیه C1 و C2 ایجاد می شود. اما میزان پارگی در حالت دو لایه به مراتب بیشتر از نوع تک لایه می باشد. به طوری که در آن لوله آلومینیوم با میزان پارگی بیشتر و تحمل فشار توسط لوله مسی به ماکزیمم انبساط خود تا مرز پارگی تحمل می نماید.

تحمل فشار و زمان شکل دهی در حالت گرادیانی به مراتب بیشتر از حالت همدمای مشاهده شد. میزان ماکزیمم بالاج در حالت تک لایه و دو لایه در نمونه های همدمای حالت برآمدگی بهتری نسبت به حالت گرادیانی ایجاد نموده است.

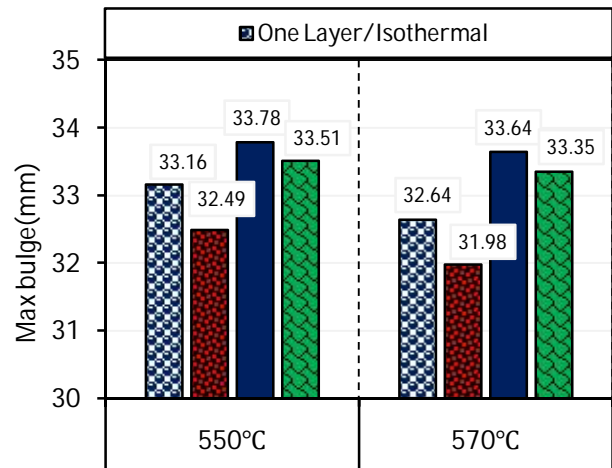


Fig. 18 Comparison of the maximum bulge of single layer and two layers tubes.

شکل 18 مقایسه ماکزیمم برآمدگی لوله حالت تک لایه و دو لایه

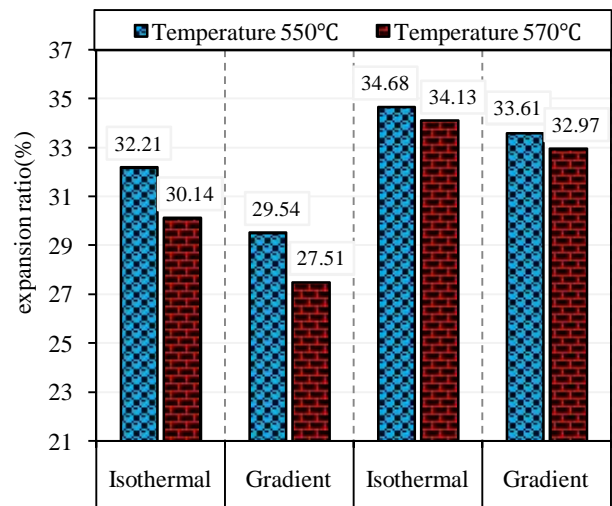


Fig. 19 Comparison of the expansion ratio of single layer and two layer tubes

شکل 19 مقایسه درصد نسبت انبساط لوله های تک لایه و دو لایه

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش مقدار برآمدگی لوله های تک لایه آلومینیوم و دو لایه مس-آلومینیوم توسط فرایند شکل دهی داغ لوله با دمش گاز (HMGF) به صورت گرادیانی و همدمای مورد بررسی قرار گرفت. اثر شرایط تک لایه و دو لایه بر میزان خرابی (ناحیه بحرانی منجر به پارگی) و ماکزیمم برآمدگی در شرایط فرایندی مختلف به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این پژوهش عبارت است از:

در هر یک از روش های آزمایش همدمای و گرادیانی رفتار تغییر شکل متفاوتی با یکدیگر مشاهده گردید. میزان انبساط در حالت همدمای مناسب تر از حالت گرادیانی در منطقه برآمدگی

- path optimization of tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, Issues 12–13, 2005.
- [11] A. Fatemi, F Biglari and M R Morovvati, Influences of inner pressure and tube thickness on process responses of hydroforming copper tubes without axial force, *Journal of Engineering Manufacture*, July 11, 2014.
- [12] M.D. Islam, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, Issues 1–3, 2006.
- [13] M.D. Islam, A.G. Olabi and M.S.J. Hashmi, Mechanical stresses in the multilayered T-branch hydroforming: numerical simulation, *International Journal Manufacturing Technology and Management*, Vol. 15, No. 2, 2008.
- [14] A. Alaswad, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Employment of finite element analysis and Response Surface Methodology to investigate the geometrical factors in T-type bi-layered tube hydroforming, *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, Issue 11, 2011.
- [15] A. Alaswad, A.G. Olabi, K.Y. Benyounis, Integration of finite element analysis and design of experiments to analyse the geometrical factors in bi-layered tube hydroforming, *Materials & Design*, Vol. 32, Issue 2, February 2011.
- [16] A. Alaswad, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes, *Materials & Design*, Vol. 32, Issue 2, 2011.
- [17] S.M.H. Seyedkashi, Gh. Liaghat, H. Moslemi Naeini, Numerical and Experimental Study of Two-Layered Tube Forming by Hydroforming Process, *Advanced Materials Research*, Vol. 264–265, 2011.
- [18] S. M. H. Seyedkashi, R. Valiollah Panahizadeh, X. Haibin, S. Kim and Moon, Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27. 2013.
- [19] M. Loh-Mousavi, A. M. Mirhosseini, G. Amirian, Investigation of Modified Bi-Layered Tube Hydroforming by Pulsating Pressure, *Key Engineering Materials*, Vol. 486, pp. 5-8, 2011.
- [20] HB Xu, SMH Seyedkashi, BD Joo and YH Moon, Analytical prediction of forming pressure for three-layered tube hydroforming, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 11. 2014.
- [21] J. Shahbazi Karami, K. Malekzadeh P, G. Payganeh, Study of geometrical parameters on hydroforming of a new three-layered sandwich tube and finite element simulation, International Conference on
- میزان نرخ حساسیت به فشار در دمای شکل‌دهی حالت دولایه به مراتب کمتر از حالت تک‌لایه می‌باشد. به طوری که ماکزیمم حالت نسبت انبساط در نمونه‌ای دولایه تا شروع لحظه‌ی ترکیدگی به مقدار 34/68 درصد می‌باشد.
- 5- تشکر و قدردانی**
- کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی شکل‌دهی داغ با دمش گاز در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شده است. به این وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه در راستای حمایت‌های مالی و همچنین از پژوهشکده هواپیمایی بابت حمایت‌های معنوی در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.
- 6- مراجع**
- [1] F. Dohmann, C. Hartl, Hydroforming-a method to manufacture lightweight parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 60, 669–676. 1996.
- [2] S.M.H. Seyedkashi, Gh. Liaghat, H. Moslemi Naeini, S.M. Mahdavian, M.H. Gollo, Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process, *Advanced Materials Research*, 264–265, 2011
- [3] M.D. Islam, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi, Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 174, 394–398, 2006.
- [4] A. Alaswad, A.G. Olabi, A numerical study of the effect of the geometrical factors on bi-layered tube hydroforming, *Proceedings of the 7th European LSDYNA Conference*, Salzburg, Austria, May 14–15, 2009.
- [5] S. Richard, M.E.E. Norek, *Forming Gas Turbine Transition Duct Bodies without Longitudinal Welds*, US Patent 7047615, May 23, 2006.
- [6] [http://www.shanghaimetal.com/Aluminum\\_Tube--pds280.html](http://www.shanghaimetal.com/Aluminum_Tube--pds280.html)
- [7] M. Koc, and T. Altan, An overall review of the Tube Hydroforming Technology, *J.M.P.T.*, 108, p. 384. 2001
- [8] Y. Hwang, W. Chen, Analysis of tube hydroforming in a square cross sectional die, *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, Issue 9, 2005.
- [9] C. Yang, G. Ngaile, Analytical model for planar tube hydroforming: Prediction of formed shape, corner fill, wall thinning, and forming pressure, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, Issue 8, 2008.
- [10] M. Imaninejad, G. Subhash, A. Loukus, Loading

- confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187–188, 12 June 2007.
- [25] G. Liu, Y. Wu, D. Wang, S. Yuan, Effect of feeding length on deforming behavior of Ti-3Al-2.5 V tubular components prepared by tube gas forming at elevated temperature, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, Issue 9, 2015.
- [26] B. Dykstra, Hot Metal Gas Forming for Manufacturing Vehicle Structural Components, *Metal forming*, , pp. 50. Sept. 2001.
- [27] M. S. Rashid, Kam C., Ryntz E. F., *Quick plastic forming of aluminum alloy sheet metal*, [R]. US 6253588 B1. Detroit, 2001.
- Mechanical, *Automotive and Materials Engineering* (ICMAME'2012), Jan. 7-8, 2012.
- [22] H. Moslemi Naeini, G.h. Liaghat, S.J. Hashemi Ghiri, S.M.H. Seyedkashi, FE Simulation and Experimental Study of Tube Hydroforming Process for AA1050 Alloy at various temperatures, *Advanced Materials Research*, Vol. 264-265 .2011.
- [23] S. Yuan, J. Qi, Z. He, An experimental investigation into the formability of hydroforming 5A02 Al-tubes at elevated temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, Issues 1–3, 3 July 2006.
- [24] B.J. Kim, C.J. Van Tyne, M.Y. Lee, Y.H. Moon, Finite element analysis and experimental