

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering



Experimental Study and Finite Element Simulation for Determining the Forming Window of 6063-O Aluminum Tube in Warm Hydroforming Process

A. Taheri Ahangar, M. Bakhshi-Jooybari*, S. J. Hosseinipour, H. Gorji

Advanced Materials Forming Research Center, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT: In recent years, aluminum and magnesium alloys have attracted attention due to higher strength to weight ratio, compared with steels. The main limitation of these alloys is the low formability at room temperature. However, researchers have shown that the formability of aluminum alloys increases at high temperatures. In this study, the formability of 6063 annealed aluminum tube has been investigated in warm tube hydroforming process. The effects of pressure and axial feed on the thickness distribution, bursting pressure and the respecting bulge height at different temperatures have been studied experimentally and numerically. In order to numerically predict the onset of fracture, three criteria, namely equivalent plastic strain acceleration (second derivative), major strain acceleration, and thickness strain acceleration were used. Moreover, a geometrical method was adopted in the simulation to determine the wrinkling. By comparing the results, there was an acceptable accordance between experimental and simulation results. It has been shown that as the temperature rises, the bursting pressure decreases and the bulge height increases. In addition, increasing axial feed, enhanced the bulge height. Finally, by using experimental tests and finite element simulation, the process windows of the aluminum alloy tube were obtained at the temperature of 25 °C and 250 °C.

Review History:

Received: 7/17/2018 Revised: 9/26/2018 Accepted: 11/10/2018 Available Online: 11/20/2018

Keywords:

Tube hydroforming Warm hydroforming Formability Aluminum alloy Forming window

1. Introduction

In recent years, the warm tube hydroforming process has attracted attention due to the possibility of producing complex parts in one step, reducing costs and increasing the rigidity of the product due to removal of the assembly joints. The use of warm tube hydroforming, in addition to reducing the energy required for the formation of complex components, requires smaller and cheaper equipment because of the reduced strength of material at higher temperatures than the room temperature [1]. Hence, in recent years, extensive research has been carried out on the tube hydroforming process at elevated temperatures [2]. In order to produce a uniform thickness distribution in a tube, Liu et al [3] used a die with non-uniform temperature distribution in order to reduce the friction coefficient at the feeding site. They performed coupled thermomechanical simulation to investigate the effect of axial feed on thickness distribution. By numerical and experimental investigation of thickness distribution of 1050 aluminum alloy tubes in the warm hydroforming process, Hashemi et al. [2] showed that by increasing temperature, better thickness distribution is obtained in the free bulge process compared to constrained bulge.

In the present study, the effect of temperature and axial feed on the formability of the 6063-O aluminum alloy tubes in the warm hydroforming process has been investigated. At last, the process windows at different temperatures were determined.

*Corresponding author's email: bakhshi@nit.ac.ir

2. Methodology

2.1 Experiments

Bulge experiment was used for conducting the tube formability tests at warm conditions. The assembled die components is indicated in Fig. 1. The die set consists of two punches and dies. The warm tube forming procedure is somehow that after positioning of the tube inside the die, the tube is sealed with the punches from the two ends in order to prevent leakage after the flowing of oil inside the tube through the channel located in the upper punch and to increase the internal pressure. To warm the fluid, tube and die, a 560 W cartridge element is used.



Fig. 1. Die set components mounted on the testing machine

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

143



Fig. 2. Simultaneous effects of pressure and temperature on bulge height in free bulge, obtained from simulation

2.2. Finite element simulation

Abaqus 10-6 software has been used to develop the Finite Element (FE) simulations. Due to the symmetry of die set, one-half of the axial symmetry was modeled. The tube and die set were modeled as deformable shell to account for heat condition. Since the die set should not be deformed, rigid constraint were applied to them.

3. Results and Discussion

3.1. Free bulge

The effect of temperature and pressure on the bulge height is shown in Fig. 2. It can be seen that by elevating the forming temperature, the bulge height increases, although the less pressure is required. In addition, increasing the forming pressure leads to higher bulge height.

3.2. Process window

To indicate the effect of different loading paths on the forming of the tube, two process windows were acquired at the temperatures of 25 °C and 250 °C shown in Figs. 3 and 4, respectively. To verify the rupture areas of the two forming windows, experiments were carried out (room temperature, pressure of 8.71 MPa, axial feed of 8 mm and temperature of



Fig. 3. Process window for 6063-O aluminum alloy at room temperature



Fig. 4. Process window for 6063-O aluminum alloy at the temperature of 250 °C



Fig. 5. The hydrobulged tubes obtained at (a) room temperature, pressure of 8.17 MPa, axial feed of 8 mm and (b) temperature of 250 °C, pressure of 5.1 MPa, axial feed of 20 mm

250 °C, pressure of 5.1 MPa, axial feed of 20 mm) that have been shown in Fig. 5.

4. Conclusions

In order to conduct experiments, a warm tube hydrobulging die was designed and constructed. The forming windows were obtained at 25°C and 250 °C and the following results were achieved:

- ✓ The pressure range in the safe zone is almost twice at room temperature compared with 250 °C, but the axial feed is approximately half.
- ✓ The formability of the part was increased with increasing temperature, so that the height of the bulge in the free bulge experiment increased from 2.6 mm at room temperature to 5.2 mm at 250 °C.

Reference

- B. Kim, C. Van Tyne, M. Lee, Y. Moon, Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 187 (2007) 296-299.
- [2] S.J. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, R.A. Tafti, F. Rahmani, Numerical and experimental investigation of temperature effect on thickness distribution in warm hydroforming of aluminum tubes, Journal of Materials Engineering and Performance, 22(1) (2013) 57-63.
- [3] L. Gang, Z.-J. Tang, Z.-B. He, S.-J. Yuan, Warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(11) (2010) 2071-2075.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیبگ امیرکسیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحات ۵۷۱ تا ۵۸۶ DOI: 10.22060/mej.2018.14721.5922

مطالعه تجربي و شبیهسازی اجزای محدود برای تعیین پنجره شکلدهی لولههای آلومینیومی 0-۶۰۶۳ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم

على طاهري أهنگر ، محمد بخشي *، سيد جمال حسيني پور ، حميد گرجي

دانشکده مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکلدهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

خلاصه: در سالهای اخیر آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بهدلیل نسبت استحکام به وزن بیشتر در مقایسه با فولادها، مورد توجه قرار گرفته است. محدودیت اصلی آلیاژهای یادشده، شکل پذیری پایین در دمای محیط می باشد. با این حال، محققان نشان دادهاند که شکل پذیری آلیاژهای آلومینیوم در دماهای بالا افزایش می یابد. در این پژوهش، شکل پذیری لوله آلومینیومی آنیل شده تحدودیت اصلی آلیاژهای آلومینیوم در دماهای بالا افزایش می یابد. در این پژوهش، شکل پذیری لوله آلومینیومی آنیل نشان دادهاند که شکل پذیری آلیاژهای آلومینیوم در دماهای بالا افزایش می یابد. در این پژوهش، شکل پذیری لوله آلومینیومی آنیل شده تحدود فرآیند هیدروفرمینگ گرم بررسی شده است. تأثیر فشار و تغذیه محوری در دماهای مختلف بر روی توزیع ضخامت، فشار پارگی و ارتفاع بالج مربوطه به صورت تجربی و عددی مطالعه شده است. به منظور پیش بینی عددی لحظه شکست در فرآیند، از سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش اصلی پیش بینی عددی لحظه شکست در فرآیند، از سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش اصلی بزرگ و شتاب کرنش در راستای ضخامت استفاده شد. علاوه بر آن، از روش هندسی برای تعیین چروک در شبیه سازی بزرگ و شتاب کرنش در راستای ضخامت استفاده شد. علاوه بر آن، از روش هندسی برای تعیین چروک در شبیه سازی شدی استفاده گردید. با مقایسه نتایج بدست آمده، تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و شبیه سازی بدست آمد. با انجام شبیه سازی اجزای محدود و آزمایشهای تجربی، پنجرههای شکل دهی لوله آلومینیوم آلیاژ در دو دمای 2°۵۵ و 2°۲۵۰ به دست آمد. با توجه به پنجره شکل دهی در دمای 2°۵۰ می تعادی به دمای 2°۵۰، بازه اعمال فشار در محدوده ایمن شدی به دمای ع°۵۰، بازه اعمال فشار در محدوده ایمن نمی به درمای 2°۵۰ به تقریبا به دمای می بازه رام می از در محمال در میده در مای به دمای ۲۵۰۰، بازه اعمال فشار در محمال در محموده ایمن

تاریخچه داوری: دریافت: ۲۶–۴۰–۱۳۹۷ بازنگری: ۲۴–۷۰–۱۳۹۷ پذیرش: ۱۹–۸۰–۱۳۹۷ ارائه آنلاین: ۲۹–۸۰–۱۳۹۷

> کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله هیدروفرمینگ گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ پنجره شکلدهی

۱– مقدمه

یکی از روشهای شکلدهی فلزات که امروزه بهطور وسیعی برای شکلدهی اجزای لولهای شکل استفاده می شود، فرآیند هیدروفرمینگ است. در این فرآیند، لوله با اعمال همزمان فشار داخلی سیال و نیروی محوری، به شکلهای متنوع در داخل محفظه قالب درمی آید [۱].

استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بهجای فولادها، یکی از روشهای کاهش وزن و مصرف سوخت در صنایع اتومبیلسازی و هوافضا میباشد. امروزه، این آلیاژها بهخاطر نسبت استحکام به وزن بیشتر از فولادها، مورد توجه ویژه محققان و صنعتگران قرار گرفتهاند [۲]. از سوی دیگر، مشکل اصلی این آلیاژها، شکل پذیری پایین در دمای محیط میباشد. برای برطرف نمودن این نقص، پژوهشگران شکل دهی در دماهای بالاتر را پیشنهاد نمودهاند [۳]. فرآیندهای سوپرپلاستیک که در دماهای بالاتر از تبلور مجدد انجام میشود، دارای مشکلاتی مانند نرخ شکل دهی پایین (نرخ کرنش در محدوده ^۴-۱۰ تا ۲۰۰۲)،

سفتی پایین در قطعات بعد از شکلدهی، انرژی زیاد برای رساندن نمونه به دمای سوپرپلاستیک و کنترل دقیق دما برای ایجاد حالت یکنواخت میباشد. بهمنظور رفع این محدودیتها، محققان شکلدهی در دماهای پایین ر ا پیشنهاد نمودهاند (Tm<5w)/۵/۳/ که شکلدهی گرم نامیده میشود [۴]. در سالهای اخیر، فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله بهدلیل فراهم نمودن امکان تولید قطعات پیچیده در یک مرحله، کاهش هزینهها و افزایش صلبیت در محصول بهخاطر حذف اتصالات مونتاژی، با استقبال مواجه شده است [۵]. استفاده از هیدروفرمینگ گرم لوله، علاوه بر کاهش انرژی مورد نیاز دماهای بالاتر نسبت به دمای محیط، نیازمند تجهیزات شکلدهی کوچک تر و ارزان تر نیز میباشد [۶]. از این رو، در سالهای اخیر پالاتر انجام شده است [۷]. از نظر شرایط دمایی، هیدروفرمینگ گرم به

Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی کی کی مردمی (Creative Commons License) کی کی کی کی مردمی (Creative Commons License) کی

دو دسته هیدروفرمینگ گرم همدما و غیرهمدما دستهبندی می شود؛ یعنی می توان تمام تجهیزات را به یک اندازه گرم کرد یا دماهای غیر یکسانی برای اجزای فرآیند ایجاد نمود. در حالت همدما بر خلاف حالت دیگر، نیازی به سرد کردن اجزای قالب در طی عملیات نبوده و تمام اجزا تا دمای مورد نظر گرم می شوند [۳].

لی و همکاران [۸] تأثیر شرایط عملیات حرارتی اولیه را بر روی شکلپذیری لولههای آلومینیومی ۲۰۷۵ در دماهای بین دمای محیط تا $^{\circ}C$ بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش دما، شکل پذیری افزایش می یابد. یوان و همکاران [۹] با استفاده از آزمایشهای کشش تک محوری و هیدروبالج، شکل پذیری لولههای آلومینیوم 5A02 را از دمای اتاق تا دمای°۳۰۰ مورد بررسی قرار دادند و با هر دو آزمایش، به افزایش شکل پذیری در دماهای بالا دست یافتند. کیم و همکاران [۶] آزمایش بالج آزاد را بر روی لوله آلیاژ AA6061 بهصورت تجربی و شبیهسازی اجزای محدود با نرمافزار DEFORM-2D انجام دادند. آنان نشان دادند که با افزایش تغذیه محوري و فشار سيال، ارتفاع بالج در دماي $^{\circ}\mathrm{C}$ ۳۲۰ افزايش مييابد. آنها همچنین اثر دما (دمای اتاق تا دمای[°] ۳۰۰) را بر روی ضریب اصطکاک تماسی آلومینیوم با آزمایش پین بر روی دیسک^۱ اندازه گیری کردند و نشان دادند که با افزایش دما ضریب اصطکاک افزایش مییابد. یی و همکاران [۱۰] برای گرم کردن یکنواخت لوله، از یک سیستم گرمایشی ترکیبی استفاده کردند. این سیستم، موجب افزایش یکنواختی بالج لوله و همچنین افزایش شکل پذیری گردید. بهعلاوه، پارامترهای فرآیند شامل فشار داخلی، تغذیه محوری و شرایط گرمایی با موفقیت از سوی این پژوهشگران بهینه شد. برای ایجاد توزیع ضخامت یکنواخت در لوله، لیو و همکاران [۱۱] از قالبی با دماهای غیر یکنواخت استفاده کردند تا بتوانند ضریب اصطکاک را در محل تغذیه کاهش دهند. آنها شبیهسازی تلفیقی ترمومکانیکی را با هدف بررسی تأثیر تغذیه محوری بر روی توزیع ضخامت انجام دادند. سیدکاشی و همکاران [۱۳٫۱۲] با بررسی عددی و آزمایشگاهی و به کمک روش آنیلینگ شبیه سازی شده٬، به بهینهسازی فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله پرداختند و مسیر فشار بهینه را برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت و شعاع گوشه مختلف بدست آوردند. با بررسی عددی و تجربی توزیع ضخامت لولههای آلومینیومی ۱۰۵۰

جدول ۱: خواص مکانیکی و فیزیکی لوله AA۶۰۶۳-O در دمای محیط Table 1. Mechanical and physical properties of AA 6063-O tube

مقدار	خاصيت
۲۷۰۰	چگالی، <i>p</i> ,[7] kg/m ³
٧٠	مدول یانگ، GPa، E [7]
۰ /٣	ضريب پواسون، <i>v</i> [7]
۴۵	MPa، <i>مy</i> ، تنش تسليم
٩٩	استحکام کششی نهایی، MPa، <i>UTS</i>

در فرآیند هیدروفرمینگ گرم، هاشمی و همکاران [۱۵٫۱۴] نشان دادند که با افزایش دما توزیع ضخامت در بالج آزاد در مقایسه با بالج مقید، بهتر می شود. آن ها همچنین تأثیر دما را بر شکل پذیری لوله های آلومینیومی ۶۰۶۳ بررسی کردند و برای پیش بینی ترکیدگی لوله و ارتفاع بالج در فرآیند هیدروفرمینگ گرم از معیارهای شکست نرم اصلاح شده به همراه پارامتر زنر – هولومون^۳ در شبیهسازی فرآیند استفاده کردند. نتایج نشان داد که معیارهای شکست نرم بهخوبی یدیده ترکیدگی را در فرآیند هیدروفرمینگ گرم لولههای آلومینیومی پیشبینی میکند. یوان و همکاران [۱۷,۱۶] رفتار چروکیدگی و نحوه کنترل و استفاده از چروکها را در هیدروفرمینگ لولههای پلهای استوانهای با استفاده از شبیهسازی و آزمایشهای تجربی بررسی کردند. آنها خاطر نشان کردند که همه چروکها عیب محسوب نمی شود و در بعضی از موارد، قطعه پس از چروکیدگی همچنان میتواند تغییر شکل دهد و به شکل مورد نظر برسد. آنها این چروکها را چروک مفید نامیدند و توزیع ضخامت و شکل پذیری را با استفاده از این نوع چروک بهبود بخشیدند. آنان برای یک نمونه آلومینیومی، نسبت انبساط را از ٪۱۰ در حالت بالج آزاد به ٪ ۴/ ۳۵با استفاده از چروک رساندند. پژوهشگران یاد شده چروکها را به سه دسته چروک مفید، چروک مرده و چروک یارگی تقسیم بندی کردند. چروکهای مفید درحالی که شرایط بارگذاری مناسب باشد ایجاد می شود و در مرحله بعدی با افزایش فشار قابل رفع میباشد. در صورتی که شرایط تنش ارضا نشود، چروک پارگی حاصل خواهد شد. چروک مرده نیز بهعلت ارضا نشدن شرایط هندسی ایجاد می شود. آن ها همچنین بیان کردند که پنجره فرآیند هیدروفرمینگ لوله دارای دو قسمت ایمن می باشد؛ شکل دهی با چروکیدگی مفید و شکلدهی بدون چروکیدگی. لانگ و همکاران [۱۸] برای شکلدهی

 $3 \quad Zener-Hollomon$

¹ Pin-on-Disk

² Simulated Annealing

Al	Mg	Cr	Si	Mn	V	Cu	Zn	Fe	عنصر
پايە	•/479	•/•• ١	•/٣٣۵	•/••٢	•/••۶	•/•79	•/• 17	•/778	درصد وزنی

AA۶۰۶۳-O جدول ۲: ترکیب شیمیایی لوله آلومینیومی Table 2 Chemical components of AA6063-O



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله AA۶۰۶۳-O بر حسب دما، نرخ کرنش متوسط:^۲-۱ s^{-۱} Fig.2. True stress-strain curves of AA6063-O versus

temperature, average strain rate: 0.01 s⁻¹

حقیقی آنها در دماهای مختلف بهدست آمد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام آزمایشهای مربوط به بررسی شکل پذیری لوله مورد نظر در شرایط دمایی گرم، از آزمایش بالج آزاد^۲ لوله استفاده شد شکل ۳ شماتیک مجموعه قالب و در شکل ۴ اجزای آن را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش نشان میدهد. این مجموعه قالب از دو سنبه و قالب تشکیل شده است. روند شکل دهی گرم لوله در این مجموعه قالب این گونه است که پس از قرارگیری لوله در داخل قالبها، لوله توسط سنبهها از دو طرف آببندی میشود تا بعد از جریان یافتن سیال از طریق راه گاه ایجاد شده در سنبه بالایی به درون لوله، از هر گونه نشتی جلوگیری شود و فشار داخل آن افزایش یابد. جهت گرم کردن سیال، لوله و مجموعه قالب، از یک گرم کن کارتریجی (المنت) ۵۶۰ نشان داده شده در شکل ۵ (الف) استفاده شده است، به طوری که نشان داده شده در داخل سنبه پایینی و در راستای طولی قرار داده شد. با افزایش فشار، در لوله تغییر شکل پلاستیک به وجود میآید. به علاوه، با قرار دادن یک روکش مسی بر روی گرم کن، از تماس آن با

1 Free bulge

250°	с		1 7	-		· constitution
200°	с					
150	C.	-	- L			CHERRICAL CONTRACT
25°	c	(1 1 200 1	1	1	

شکل ۱: نمونههای بدست آمده از آزمایش کشش Fig.1 The samples obtained from the tensile test

یک لوله آلومینیومی از چروکها بهعنوان پیش فرم استفاده نموده و در قالبهای ثابت با هندسههای متفاوت از هندسه نهایی مورد نیاز، به بررسی پارامترهای قالب پیش فرم بهمنظور ایجاد چروک پرداختند تا در مرحله بعد و قالب نهایی بتوان آن را از بین برد و قابلیت شکل دهی را افزایش داد.

در این پژوهش، اثر دما و تغذیه محوری بر شکل پذیری لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ آنیل شده در فرآیند هیدروفرمینگ گرم مورد بررسی قرار گرفته است. بررسیها با آزمایشهای تجربی و شبیهسازی اجزای محدود انجام شد. بدین منظور، قالب هیدروبالج گرم طراحی و ساخته شد. با توجه به اهمیت منطقه ایمن برای شکل دهی قطعات و تأثیر زیاد پارامترهای دما، فشار و تغذیه محوری، یکی از مهم ترین کارهایی که در این پژوهش انجام شد تعیین پنجره شکل دهی جنس مذکور در دماهای مختلف، یعنی محدوده تولید قطعه سالم و نیز محدوده معیوب شدن قطعه، بوده است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، از لوله آلومینیومی ۶۰۶۳ آنیل شده با قطر خارجی ۲۵/۴ mm و ضخامت ۱/۱ mm استفاده شده است. جدول ۱ خواص مکانیکی و جدول ۲ خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی نمونهها را نشان میدهد. به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله، آزمون کشش لوله مطابق استاندارد ASTM-E8 انجام گردید. نمونهها در دماهای ۲۰۰، ۱۵۰، ۲۰ و ^C ۲۵۰ و نرخ کرنش متوسط ^{I-}s ۲۰/۰ و تا حد پارگی مطابق با شکل ۱ کشیده شدند و منحنیهای تنش-کرنش



شکل ۳: شماتیک مجموعه قالب آزمایش بالج Fig. 3 Schematic of the setup of the bulge test



شکل ۴ : اجزای مجموعه قالب بالج در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش Fig.4. Components of the bulge die set, assembled on the

testing machine

روغن جلوگیری شد. این روکش مسی، جهت جلوگیری از نشت روغن به بیرون، به سنبه جوش داده شد. برای کنترل دما از یک دماسنج دیجیتالی نشان داده شده در شکل ۵ (ب) استفاده شد. با رسیدن دما به مقدار مورد نظر، گرمکن کارتریجی قطع می شود و آن گاه جهت انجام آزمایش، فشار سیال اعمال می گردد.

از آنجایی که جنس مورد مطالعه، لوله آلومینیومی با ضخامت کم و در نتیجه، دارای انتقال حرارت بالا است، انتقال حرارت در آن سریع انجام میشود. بهعلاوه، زمان حرارتدهی در آزمایشهای تجربی به نسبت بالا بوده است. از این رو، از یکنواختی دما در سرتاسر لوله



شکل ۵: الف- سیستم گرمایش قالب، ب- دماسنج دیجیتالی Fig.5 (a) Die heating system (b) Digital thermometer

اطمینان حاصل گردیده است.

مطابق شکل ۶ از یک دستگاه آزمایش اونیورسال هیدرولیکی گروه دنیسون میس^۱ با ظرفیت ۶۰۰ kN برای انجام آزمایشها استفاده شد. این دستگاه متصل به یک واحد رایانهی برای کنترل حرکات آن میباشد. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرآیندهای گرم، نرخ کرنش است که دستگاه آزمایش، قابلیت تنظیم سرعت را تا مقدار نرخ رسب جابجایی را در هر لحظه توسط رایانه ثبت نمود.

برای اعمال فشار سیال از یک پمپ هیدرولیکی با قابلیت ایجاد و اعمال فشار بیشینهTor bar استفاده شد. سیال به کمک یک شیر یکطرفه وارد لوله میشود. به منظور جلوگیری از برگشت سیال پرفشار به مدار هیدرولیکی، یک شیر یکطرفه مورد استفاده قرار گرفت. برای کنترل فشار بیشینه سیال در محفظه قالب، از یک شیر کنترل فشار استفاده شده است. این شیر کنترل، در لحظه رسیدن فشار به مقدار تنظیم شده، با تخلیه سیال مانع از افزایش بیشتر فشار در آن محفظه میشود. برای اندازه گیری فشار، از یک فشارسنج قادر است تا با اتصال به واحد رایانه، مقدار فشار را در هر لحظه از زمان شکل دهی ثبت کند. شکل ۷ شیر کنترل فشار و فشارسنج زمان شکل دهی ثبت کند. شکل ۷ شیر کنترل فشار و فشارسنج

¹ Denison Mayes Group (DMG)



شکل ۷: اجزای سیستم هیدرولیک Fig.7. Elements of the hydraulic system

To Die



DMG شکل ۶: دستگاه آزمایش اونیورسال Fig.6 The DMG Universal testing machine

т	п	<i>K,</i> MPa	دما (⁰ C)
•	۰/۲۸	۱٩٠	۲۵
• / • 1	۰/۲۷۶	178/1	۱۵۰
۰/۰۱۶	۰/۲۵	14.12	۲۰۰
•/•٣	• /٢	180	۲۵۰

جدول ۳ ضرایب مدل کار سختی بر حسب دما Table 3. Work hardening model coefficients versus temperature

میباشد. این روغن بر اساس اعلام شرکت تولید کننده، SF 350 میباشد. این روغن بر اساس اعلام شرکت تولید کننده، مقاومت حرارتی تا دمای $^{\circ}\mathrm{C}$

۳- شبیهسازی اجزای محدود

برای انجام شبیهسازی، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۱۰-۶ استفاده شده است. با توجه به تقارن مجموعه قالب و لوله، از یک مدل متقارن محوری استفاده گردید و نصف مقطع مجموعه قالب مدل شد. در شبیهسازیهای فرآیند بالج، لوله به صورت شکلپذیر^۱ و پوستهای^۲ و اجزای قالب نیز برای اعمال شرایط دمایی بهصورت شکلپذیر مدل شد. از آنجایی که اجزای قالب نباید دچار تغییر شکل گردد، قید صلب به آن اعمال شد.

در قسمت خواص^۳، نمودار تنش- کرنش حقیقی بهدست آمده از آزمایش تجربی به صورتی جدولی تعریف گردید. ماده مدل شده، دارای خاصیت الاستیک - پلاستیک بوده و از قانون رامبورگ- اسگود

[۲۰]، مطابق رابطه (۱) تبعیت میکند. در این رابطه، σ تنش سیلان، K ضریب استحکام ماده، s کرنش، \dot{s} نرخ کرنش، n نمای کرنش سختی و m حساسیت به نرخ کرنش میباشد. مقادیر بهدست آمده در دماهای مختلف در جدول π نشان داده شده است.

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \tag{1}$$

درمدلسازی، به دلیل آنیل بودن لوله، از ناهمسانگردی آن چشمپوشی شد. بهعلاوه، فرض شده که لوله دارای خواص حرارتی همگن است و به دلیل ضخامت کم، دارای دمای ثابتی است. در این پژوهش، انجام شبیهسازی فرآیند در یک گام¹، به صورت کوپل جابجایی- حرارتی^۵ و در حالت دینامیکی مدل شد. نوع حل نیز صریح² بوده است. در مدول برهم کنش^۷، شرایط تماسی بین سطوح مختلف تعریف شد. با انجام شبیهسازیهای متعدد و مقایسه آن با

l Deformable

² Shell

³ Property

⁴ Step

⁵ Temp-disp

⁶ Explicit

⁷ Interaction



شکل ۸: الف – تأثیر اندازه المان بر روی توزیع تنش معادل ب – مجموعه قالب و لوله مدل شده Fig.8 (a) Effect of mesh size on equivalent stress distribution (b) The modeled die set and tube



شکل ۹: مسیرهای نمونه فشار و تغذیه محوری بر حسب زمان Fig.9. Pressure and axial feed path versus time

دمای محیط، ۰/۰۶ و با افزایش دما مقدار ضریب اصطکاک بالاتری قرار داده شده، به طوری که در دمایC^o ۲۵۰ مقدار ۰/۱ در نظر گرفته شد. در واحد بار^۱، یک باردهی به صورت فشار سیال به سطح داخلی لوله اعمال گردید. سپس قیدهای حرکتی و دمایی تعریف شدهاند. برای المانبندی لوله، از المانمتقارن محوری چهارگرهای^۲که دارای درجه آزادی جابجایی و دما است، استفاده شده است.

برای مدلسازی اثرات خمش لوله، در راستای ضخامت چهار المان در نظر گرفته شد. همچنین بر اساس همگرایی مش، اندازه المان ۵/۵ mm /۰ (تعداد ۲۰۰ المان) در راستای طول، مقداری مناسب بدست آمد. برای بررسی همگرایی مش، اثر اندازه مشهای ۱، ۰/۷۵ و

۰/۳۷۵ mm بر روی توزیع تنش معادل روی مسیری از نودهای وسط لوله بررسی شد (شکل ۸ (الف)). در شکل ۸ (ب) مدل شبیهسازی مجموعه قالب و لوله مشاهده می شود. مسیرهای نمونه فشار و تغذیه محوری بر حسب زمان، که در شبیهسازی و آزمایش های تجربی مورد استفاده قرار گرفت، در شکل ۹ نشان داده شده است.

سیتو [۲۰] با استفاده از معیار مشتق دوم کرنش بزرگ جهت پیش بینی لحظه شروع گلویی شدن، نمودارهای حد شکل دهی^۳ را استخراج کرد. ماموسی و همکاران [۲۱] از سه معیار مشتق دوم کرنش معادل پلاستیک، مشتق دوم کرنش بزرگ و مشتق دوم کرنش در راستای ضخامت جهت پیش بینی گلویی شدن در ورق های ترکیبی و استخراج نمودارهای حد شکل دهی استفاده کردند. افشار و همکاران

3 Forming Limit Diagram (FLD)

¹ Load

² CAX4RT



شکل ۱۰: الف– کرنش پلاستیک معادل و شتاب (مشتق دوم) آن ب– کرنش اصلی بزرگ و شتاب آن ج– کرنش در راستای ضخامت و شتاب آن د– نمونه T= ۱۵۰ °Cli دماC شبیهسازی و آزمایشگاهی، فشار P= ۷ MPa ، تغذیه محوری Feed=۱۰ mm، دماC

Fig.10 (a)- Equivalent plastic strain (PEEQ) and its acceleration (Second derivation), (b) Major strain and its acceleration, (c) Thickness strain and its acceleration, (d) Simulation & Experimental Sample P=7 MPa, feed= 10



شکل ۱۱: معیار چروکیدگی(بر پایه هندسی) Fig. 11 Wrinkling criterion (Geometry base)

مییابد. در صورتی که این فاصله در بعضی نقاط کمتر از نقاط قبلی باشد (حداقل ۳M ۵/۰۵)، چروک در نظر گرفته شد (شکل ۱۱). جهت تعیین تاخوردگی و برگشت، در صورتی که مختصات هر گره از گره قبلی در شبیه سازی عبور کند، تاخوردگی و برگشت تشخیص داده شده است. [۲۲] با استفاده از معیار شتاب کرنش معادل پلاستیک در فرآیند هیدروفرمینگ لوله 702-702 گلویی شدن موضعی را پیش بینی نمودند. در چیدمان تجربی پژوهش اخیر فشار داخلی و تغذیه محوری وجود دارد. در مقاله حاضر، به منظور پیش بینی عددی لحظه شکست در فرآیند از سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش اصلی بزرگ و شتاب کرنش در راستای ضخامت استفاده شده است. به عبارتی دیگر، همان گونه که در شکل ۱۰ آورده شده است، هنگامی که هر کدام از این مقادیر به حداکثر خود برسند، شکست رخ می دهد.

در این مطالعه برای تشخیص چروکیدگی در شبیهسازی از معیار هندسی استفاده شد [۲۴,۲۳]. بالج شدگی در لوله به این صورت میباشد که با نزدیک شدن به مرکز لوله با بیشترین بالج شدگی، مقدار فاصله عمودی محور مرکزی (محور تقارن) لوله با محیط لوله افزایش



شکل ۱۲: منحنیهای تجربی و شبیهسازی توزیع ضخامت لوله در دمای ۱۵۰۰C

Fig.12 Experimental and simulation thickness distribution curves of the tube at 150°C



شکل ۱۳: مسیر تعیین شده برای اندازهگیری ضخامت Fig.13 The specified path for thickness measurement

۴- نتایج و بحث

۴-۱- درست آزمایی نتایج شبیهسازی

جهت درست آزمایی نتایج شبیه سازی، منحنی های شبیه سازی توزیع ضخامت در یک قطعه بالج شده در دمای C^o۱۵۰، با نتایج تجربی متناظر مورد مقایسه قرار گرفتند. برای اندازه گیری ضخامت، به دلیل متقارن بودن فرآیند و قطعه مورد مطالعه، یک چهارم آن مورد ارزیابی قرار گرفته و منحنی شکل ۱۲ حاصل شد. در شکل، محور عمودی، بیانگر ضخامت لوله و محور افقی، فاصله از مرکز قطعه کار، مطابق با شکل ۱۳ می باشد. با توجه به شکل ۱۲، بیشترین اختلاف بین نتایج تقریباً ۳ درصد می باشد که تطابق بالایی را نشان می دهد. در جدول ۴ نتایج تجربی و شبیه سازی فشار پارگی و ارتفاع بالج مربوط به لحظه پارگی مورد مقایسه قرار گرفته اند. همان گونه که ملاحظه می شود، اختلاف ناچیزی بین

جدول ۴: مقایسه فشار و ارتفاع بالج در لحظه پارگی، بهدست آمده از w= ۱۰۰ mm و R= ۵ mm,۱۵۰ °C و Table 4. Comparison of experimental and simulation bursting pressure and bulge height at 150°C; R= 5 mm, and w= 100 mm

ار تفاع بالج، mm	فشار پارگی، MPa	
٣/٧	8/94	تجربى
٣/٩	٧/٢	شبيەسازى
۵/۱	٣/۶	خطا (./)

نتايج وجود دارد.

۴-۲- بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر فشار پارگی و ارتفاع بالج

یکی از بررسیهای انجام شده در این پژوهش، مطالعه تأثیر دمای شکلدهی بر روی فشار و ارتفاع بالج میباشد. بررسیها در دماهای ۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰ و C°۲۵۰ انجام شد. شکل ۱۴ تأثیر دما را بر روی فشار پارگی نشان میدهد. مشاهده میشود که با افزایش دما، فشار پارگی به دلیل نرم شدن ماده برای کشیدگی و راحت تر شکل گرفتن آن، کاهش مییابد. این نتایج را میتوان با توجه به نمودار تنش-کرنش شکل ۲ تحلیل کرد که با بالا رفتن دما تنش تسلیم فلز کاهش مییابد. بهعلاوه، نتایج با رابطه (۲) [۱۴] نیز مطابقت دارد، که در آن با افزایش دما، تنش تسلیم و در نتیجه فشار پارگی کم میشود.

$$P_{yield} = \sigma_y \frac{2t_0}{D_0 - t_0} \tag{(7)}$$

در رابطه بالا، $P_{_{yield}}$ فشار تسليم، $\sigma_{_y}$ تنش تسليم، t_o ضخامت اوليه و D_o قطر اوليه خارجي لوله ميباشد.

پارامتر دیگر مورد بررسی، ارتفاع بالج میباشد که با توجه به شکل (13, 10, 10, 10) با بالا رفتن دمای شکلدهی، به دلیل افزایش کشیدگی در ماده، افزایش یافته است. برای اندازه گیری ارتفاع بالج از رابطه (۳) استفاده شد که در آن D و D_0 به ترتیب قطر لوله بالج شده و قطر اولیه آن میباشد. در شکل (13, 10, 10) قطعات شکل داده در دماهای مختلف نشان داده شده است.

$$h = \frac{(D - D_0)}{2} \tag{(7)}$$

تأثیر همزمان دما و فشار بر روی ارتفاع بالج تا لحظه پارگی، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل میتوان دریافت



شکل ۱۴: تأثیر دما بر فشار پارگی الف- حالت بالج آزاد ب- تغذیه محوری ۱۰ mm Fig.14. Effect of temperature on bursting pressure, (a) Free bulge, (b) Axial feed=10 mm



mm۱۰ شکل ۱۵: تأثیر دما بر مقدار بالج الف- حالت بالج آزاد ب- تغذیه محوری Fig.15 Effect of temperature on bulge height, (a) Free bulge, (b) Axial feed=10mm

۴-۳- بررسی اثر دما و تغذیه محوری بر توزیع ضخامت

برای بررسی توزیع ضخامت در شرایط دمایی و حالتهای بارگذاری مختلف، شکلدهی در دماهای ۲۵، ۱۵۰ و^{Co} ۲۵۰ و در حالتهای بالج آزاد و با تغذیه محوریmm ۱۰ انجام شد و شکلهای ۱۸ و ۱۹ بهدست آمدند. در این شکلها ناحیه انتهای لوله با شماره ۱، ناحیه گذر از قالب به منطقه بالج با شماره ۲ و ناحیه میانی لوله با شماره ۳ نشان داده شدهاست. با توجه به شکل ۱۸، با افزایش دما کاهش ضخامت در ناحیه میانی لوله که با افزایش دمای شکل دهی، ارتفاع شکل دهی افزایش می یابد، اگر چه قطعه کار فشار کمتری را تحمل می کند. نمودارها هم چنین نشان می دهد که قطعه مورد نظر برای رسیدن به یک ارتفاع خاص به چه فشار و دمایی نیاز دارد. به علاوه، این نتیجه حاصل شد که در هر دما با افزایش فشار شکل دهی می توان به ارتفاع بالج بیشتری رسید. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود، هر چه دما افزایش می یابد شیب منحنی افزایش یافته و با تغییر فشار کمتر می توان به ارتفاع بالج بیشتری دست یافت.



شکل ۱۸: تغییرات ضخامت لوله بر حسب دما در حالت بالج آزاد Fig.18 Variation of tube thickness with respect to temperature in free bulge





که با قالب در تماس میباشد، با افزایش دما به دلیل بالا رفتن اصطکاک و چسبندگی، کشیدگی کمتر بوده و در پی آن کاهش ضخامت کمتری مشاهده میشود. از آنجایی که حجم لوله ثابت است، با افزایش دما، از یک سو نازکشدگی افزایش یافته و از سوی دیگر ارتفاع بالج بیشتر میشود.

با مقایسه شکلهای ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می شود که با اعمال تغذیه محوری، به خاطر جریان مواد به منطقه بالج (w) در شکل ۳، توزیع



شکل ۱۶: قطعات بالج شده در دماهای مختلف در حالت بالج آزاد Fig.16 Bulged parts at different temperatures in free bulge



شکل ۱۷: تأثیره_مزمان فشار و دما بر ارتفاع بالج در بالج آزاد، بهدست آمده از شبیهسازی

Fig.17 Simultaneous effects of pressure and temperature on bulge height in free bulge, obtained from simulation

افزایش مییابد، بهطوری که در دمای C^o ۲۵۰ بیشترین کاهش ضخامت مشاهده می شود. به دلیل این که بیشترین بالج شدگی در ناحیه میانی لوله می باشد، به دلیل کشیدگی حاصل از بالج شدن، بیشترین ناز ک شدگی مربوط به این ناحیه می باشد. در ناحیه ۱



شکل ۲۲: نتیجه حاصل از شبیه سازی برای فشار ۴/۴ MPa ، تغذیه محوری ۲۵ ۳۳ و دمای۲۵۰

Fig.22 Simulation result corresponding to pressure of 4.4 MPa, axial feed of 20 mm, and at temperature of 250°C

۲۱ قطعات تجربی و شبیهسازی مربوط به این بررسی نشان داده شده است، همان طور که مشاهده می شود قطعات دچار چروکیدگی شدهاند. حداقل فشار لازم برای شروع تغییر شکل با توجه به رابطه (۲)، ۲/۸ MPa می باشد که در شکل ۲۰ مشخص شد. با اعمال فشار MPa و در حالت بدون اعمال تغذیه محوری، تغییر شکل لوله با ارتفاع بالج mm •/۵ اتفاق می افتد و با افزایش فشار، مقدار بالج افزایش می یابد اما با اعمال تغذیه محوری قطعه دچار چروک می گردد. شکل ۲۲ قطعه چروک شده در فشار ۴/۴ MPa و تغذیه محوری mm ۲۰ mm را در دمای ۲۵۰[°]۲۵ نشان میدهد. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش فشار در حالی که تغذیه محوری ثابت است، میزان چروکیدگی کاهش یافتهاست. افزایش فشار از ۴/۶ تا ۵/۱۵ MPa و اعمال همان تغذیه محوری، باعث افزایش شکل پذیری در یک فشار معین می گردد. در این ناحیه نیز اعمال تغذیه محوری بیشتر از mm ۲۰ ساعث چروک می گردد. در فشار MPa و با اعمال تغذیه محوری ۲۰ mm، بیشترین مقدار بالجشدگی با ارتفاع ۶/۵ mm بدست آمد. شکل ۲۳، قطعات بالج شده در دو فشار مختلف را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش فشار، قطعه با تغذیه محوری مناسب، به صورت یکنواخت بالج می شود.

در شکل ۲۳ پنجره شکلدهی مربوط به دمای ۲۵°۲۵ نشان داده شده است. برای درست آزمایی پنجره شکلدهی، آزمایش تجربی و شبیهسازی اجزای محدود در دمای ۲۵ ۲۵، تغذیه۳۳۳ ۱۰ و فشار شکلدهی ۸۲۶ MPa انجام شد. با توجه به نمودار شکل ۲۴ قطعه تولیدی با شرایط ذکر شده در ناحیه چروک قرار می گیرد. در شکل ۲۵ قطعههای تجربی و شبیهسازی مربوط به این بررسی نشان داده شده است که صحت نمودار را می رساند. حداقل فشار لازم برای شروع



شکل ۲۰: پنجره شکلدهی لوله آلومینیومی AA۶۰۶۳-O در دمای ۲۵۰ ۲۵۰ در دمای ۲۵۰ ۲۵۰

Fig. 20 Process forming window for AA6063-O at 250°C



شکل ۲۱: قطعات بالج شده در دمای ۲۵ ۲۵۰، تغذیه محوری ۲۵ mm فشار ۶MPa Fig. 21 Bulged part at 250°C, axial feed of 25 mm and 4.6 MPa pressure

ضخامت در منطقه تغییر شکل، بهبود یافته و منحنیهای توزیع ضخامت یکنواخت ر شده است.

۴-۴- پنجره شکلدهی

برای نشان دادن تأثیر مسیرهای بارگذاری مختلف بر روی شکلدهی قطعه، با انجام بیش از یکصد شبیهسازی، پنجره شکلدهی برای لوله آلومینیومیO-6063 در دماهای ۲۵ و ۲۵۰۵ بهدست آمد. در شکل ۲۰ پنجره شکلدهی مربوط به دمای ۲۵۰۵ نشان داده شده است. برای درست آزمایی پنجره شکلدهی، آزمایش نشان داده شده است. برای درست آزمایی پنجره شکلدهی، آزمایش تجربی در دمای ۲۵۰۲، تغذیه محوری mm ۲۵ و فشار شکلدهی استفاده از معیار هندسی برای تشخیص چروکیدگی [۲۵٫۲۴] قطعه تولیدی با شرایط ذکر شده، در ناحیه چروک قرار می گیرد. در شکل



شکل ۲۳: نتایج حاصل از شبیهسازی در تغذیه محوری ۲۰ mm و دمای ۲۵[°] ۲۵۰ ، الف– فشار ۶/۴ MPa (نامناسب) ب– فشار ۱۵/۵ MPa (مناسب) Fig. 23 Simulation result corresponding to axial feed of 20 mm and at 250°C a) pressure of 4.6 MPa, b) pressure of 5.15 MPa



شکل ۲۶: نتیجه شبیهسازی با فشار ۶/۷ Mpa و تغذیه محوری ۵ mm در دما℃ ۲۵

Fig. 26 Simulation result with pressure of 6.7 MPa and axial feed of 5 mm at 25°C





Fig. 27. Forming part obtain at (a) temperature of 250 °C, pressure 5.1 MPa and axial feed of 20 mm (b) temperature of 25 °C, pressure 8.17 MPa and axial feed of 8 mm

۶/۷ و تغذیه محوری mm ۵ را در دمای ۲۵°C نشان میدهد. با بررسیهای انجام شده در محدوده فشار ۶/۸ تا MPa ۸، با بالا رفتن مقدار تغذیه محوری تا۱۰ mm در یک فشار معین، شکلپذیری افزایش مییابد. در این ناحیه نیز اعمال تغذیه محوری بیشتر از ۱۰ mm

برای درست آزمایی نواحی پارگی دو پنجره شکل دهی بدست آمده، آزمایشهای تجربی در شرایط مربوط به این نواحی (آزمایش مربوط به دمای² ۲۵۰ در فشار ۵/۱ MPa و تغذیه محوری آزمایش مربوط به دمای² ۲۵ در فشار ۸/۱۷ MPa و تغذیه محوری ۸ mm) انجام شد که قطعات بالج شده در شکل ۲۷ نشان داده شدهاند.



شکل ۲۴: پنجره شکل
دهی آلومینیوم -O شکل ۲۹: پنجره شکل
c در دمای Fig. 24 Process forming window for al 6063-O alloy at 25°C



شکل ۲۵: قطعات بالج شده در دما°۵ ۲۵، تغذیه محوری ۱۰ mm و فشار ۶/۶ MPa Fig. 25 Bulged part at 25°C, axial feed of 10 mm and pressure of 6.6 Mpa

تغییر شکل لوله با توجه به رابطه (۲) حدود۴/۱ MP می باشد که این نتیجه در پنجره شکلدهی بدست آمده برای دمای² ۲۵ نشان داده شده است. با اعمال فشار MPa ۶ تغییر شکل لوله با ارتفاع بالج ۸/۵ mm /۵ شروع می شود و با افزایش فشار و در حالت بدون تغذیه محوری ارتفاع بالج افزایش می یابد، اما با اعمال تغذیه محوری قطعه دچار چروک می گردد. شکل ۲۶قطعه چروک شده در فشار MPa

بسته به فشار و تغذیه محوری، محل پارگی لوله آلومینیومی در پنجره شکلدهی متفاوت خواهد بود. به همین خاطر، در پنجرههای شکلدهی بهدست آمده این نواحی بهصورت خطچین مشخص شده است. با توجه به شکل ۲۷ مشاهده می شود که در آزمایش های تجربی نیز قطعه دچار پارگی شد و درستی مناطق تعریف شده مربوط به پارگی در پنجرههای شکلدهی بهدست آمده را نشان می دهد.

با توجه به پنجره شکلدهی، در دمای^{C°} ۲۵ نسبت به دمای ^{C°} ۲۵ نسبت به دمای ^{C°} ۲۵ میاند اما میزان تغذیه محوری در حدود نصف میباشد. بدین ترتیب حساسیت در دمای بالا در اعمال فشار مشخص برای تغییر شکل معین در لوله بیشتر میباشد.

با مقایسه پنجرههای شکل دهی به دست آمده در دماهای مختلف، مشاهده می شود که با بالا رفتن دمای شکل دهی، قطعه قابلیت پذیرش تغذیه محوری بیشتری را دارد، بطوری که در دمای C^o ۵۲، حداکثر می توان ۱۰ mm تغذیه محوری اعمال کرد، در صورتی که طبق پنجره شکل دهی بدست آمده برای دمای C^o ۲۵۰، قطعه قابلیت تحمل حدود mm تغذیه را دارد. دلیل عدم چروک با تغذیه محوری بیشتر در دماهای بالا، افزایش قابلیت کشش با بالا رفتن دما و در پی آن افزایش بالج شدگی و در نتیجه پذیرا بودن تغذیه بیشتر می باشد.

با توجه پنجرههای شکل دهی به دست آمده، مشخص شد که در دمای محیط، شروع بالج شدن در حالت بدون تغذیه محوری، سر فشار MPa ،۲۵۰ محمد در حالی که در دمای C° ۲۵۰، MPa ۲/۸ بوده است. با افزایش فشار، ارتفاع بالج افزایش یافت. به علاوه، فشار پارگی در حالت بدون تغذیه محوری، در دماهای محیط و فشار پارگی در حالت بدون تغذیه محوری، در دماهای محیط و ۲۵۰۵۲ به ترتیب، MPa ۸/۷ و ۲۸۳ ۲/۵ میباشد. با افزایش تغذیه محوری در هر دو دما، در فشارهای شکل دهی کم، چروک ۲۵۰۵۲ به ترتیب مصوری در هر دو دما، در فشارهای محیط و ۲۵۰۲۵ ۲۵۰ چروک میشود، به طوری که در دماهای محیط و ۹ با تغذیه محوری ایجاد می شود. هم چنین، در تغذیه محوری و با تغذیه محوری مشاهده به ترتیب در فشارهای ۲۸۳۵ و ۲/۶ MPa چروک ایجاد می شود. هم چنین، در تغذیه محوری ۱۰ mm محوری به بیش از ۲۰۰۳، در هر فشاری، چروک مشاهده می شود، محوری به بیش از ۲۰۰۳، قابلیت اعمال تغذیه محوری تا

۲۰ وجود دارد. در صورتی با این تغذیه محوری چروک مشاهده نمی شود که مقدار فشار کمتر از ۴/۶ MPa نباشد. عیب دیگری که مشاهده شد، تا خوردگی بود. در صورتی که مقدار تغذیه محوری در دمای ۲۵۰°C بیشتر از ۱۳ سال و فشار شکل دهی کمتر از ۲/۵ MPa و در دمای محیط تغذیه محوری بیشتر از mm ۵ و فشار شکل دهی کمتر از ۳/۵ MPa باشد، این عیب روی می دهد، به طوری که در تغذیه محوری می دهی به ترتیب کمتر از ۵/۲ MPa و MPa باشد، این عیب روی می دهد.

۵- نتیجهگیری

جهت بررسی شکلپذیری لوله آلیاژی آلومینیوم O-6063 ابتدا آزمایش کشش در دماهای مختلف انجام شد و نتایج آن در شبیهسازی استفاده شد. جهت انجام آزمایشهای تجربی، یک قالب هیدروبالج گرم لوله طراحی و ساخته شد. با استفاده از شبیهسازی اجزای محدود و همچنین به کمک سه معیار شتاب (مشتق دوم) کرنش پلاستیک معادل، شتاب کرنش بزرگ و همچنین شتاب کرنش در راستای ضخامت، جهت پیشبینی شکست، پنجره شکلدهی در دماهای C۵۵۲ و C۵۰۲۵ بدست آمد و آزمایشهای تجربی در شرایط دمایی و تغذیه محوری مختلف جهت درست آزمایی انجام شد و نتایج بدست آمده از آزمایشها، درستی پنجرههای شکلدهی بدست آمده را نشان داد.

با بررسیهای انجام شده در این پژوهش نتایج زیر به دست آمد:

در مقاله حاضر، برای لوله آلیاژ آلومینیوم O-6063 و در
 حالت گرم، مطالعه بالج آزاد انجام شد و پارامترهای شکلدهی، مورد بررسی قرار گرفت. بهعلاوه، پنجره شکلدهی برای ماده مورد نظر و
 محدوده ایمن برای بارگذاری در هیدروفرمینگ گرم لوله بهدست آمد.

با توجه به پنجره شکلدهی در دمای C^oC نسبت به دمای C^oC نسبت به دمای C^oC نسبت به دمای C^oC می ایمن تقریبا دو برابر می باشد اما میزان تغذیه محوری تقریباً نصف می باشد. بدین ترتیب حساسیت در دمای بالا در اعمال فشار مشخص برای تغییر شکل معین در لوله بیشتر می باشد.

با افزایش دما از ۲۵ به ۲۵۰°۲۵ فشار لازم برای شکلدهی
 ۳۷ درصد کاهش یافت.

Materials Processing Technology, 155 (2004) 1337-1343.

- [9] 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, 177(1-3) (2006) 680-683.
- [10] H. Yi, E. Pavlina, C. Van Tyne, Y. Moon, Application of a combined heating system for the warm hydroforming of lightweight alloy tubes, Journal of materials processing technology, 203(1-3) (2008) 532-536.
- [11] L. Gang, Z.-J. Tang, Z.-B. He, S.-J. Yuan, Warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(11) (2010) 2071-2075.
- [12] S.H. Seyedkashi, H. Moslemi Naeini, G. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, K. Shojaee G, M. Mirzaali, Y.H. Moon, Experimental and numerical investigation of an adaptive simulated annealing technique in optimization of warm tube hydroforming, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 226(11) (2012) 1869-1879.
- [13] S. Seyedkashi, 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, 12(5) (2013) 122-131. (in persian).
- [14] S.J. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, J.S. Karami, A.H. Roohi, Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria, Modares Mechanical Engineering, 14(16) (2015).
- [15] S. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, R.A. Tafti, Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(1) (2015) 19-29.
- [16] S. Yuan, X. Wang, G. Liu, Z. Wang, Control and use of wrinkles in tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 6-11.

شکل پذیری قطعه با بالا رفتن دما افزایش یافت، به طوریکه
 ارتفاع بالج در آزمایش بالج در شرایط بار گذاری آزاد، از mm در
 دمای محیط به mm در دمای ۲۵۰°C رسید.

مراجع

- L. Lang, Z. Wang, D. Kang, S. Yuan, S.-H. Zhang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, 151(1-3) (2004) 165-177.
- [2] Z. He, S. Yuan, G. Liu, J. Wu, W. Cha, Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature, Journal of Materials Processing Technology, 210(6-7) (2010) 877-884.
- [3] M. Hosseinpour, A. Gorji, M. Bakhshi, On the experimental and numerical study of formability of Aluminum sheet in warm hydroforming process, Modares Mechanical Engineering, 15(2) (2015) 159-168. (in Persian)
- [4] W.F. Hosford, R.M. Caddell, Metal forming: mechanics and metallurgy, Cambridge University Press, 2011.
- [5] Y. Aue-u-lan, Hydroforming of tubular materials at various temperatures, The Ohio State University, 2007.
- [6] B. Kim, C. Van Tyne, M. Lee, Y. Moon, Finite element analysis and experimental confirmation of warm hydroforming process for aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 187 (2007) 296-299.
- [7] S.J. Hashemi, H.M. Naeini, G. Liaghat, R.A. Tafti, F. Rahmani, Numerical and experimental investigation of temperature effect on thickness distribution in warm hydroforming of aluminum tubes, Journal of Materials Engineering and Performance, 22(1) (2013) 57-63.
- [8] M.-Y. Lee, S.-M. Sohn, C.-Y. Kang, D.-W. Suh, S.-Y. Lee, Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes, Journal of

22(11) (2013) 3210-3221.

- [22] A. Afshar, R. Hashemi, R. Madoliat, D. Rahmatabadi,
 B. Hadiyan, Numerical and experimental study of bursting prediction in tube hydroforming of Al 7020-T6, Mechanics & Industry, 18(4) (2017) 411.
- [23] M. Khademi, M. Bakhshi Jooybari, M. Sadegh Yazdi, Investigation of Wrinkling in Hydrodynamic Deep Drawing assisted by Radial Pressure with Inward Flowing Liquid Based on a Geometric Method, Modares Mechanical Engineering, 17(5) (2017) 276-286. (In Persian)
- [24] T. Intarakumthornchai, Y. Aue-U-Lan, R. Kesvarakul, S. Jirathearanat, Feasible pressure and axial feed path determination for fuel filler tube hydroforming by genetic algorithm, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229(4) (2015) 623-630.

- [17] S. Yuan, W. Yuan, X. Wang, Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, 177(1-3) (2006) 668-671.
- [18] L. Lang, H. Li, S. Yuan, J. Danckert, K.B. Nielsen, Investigation into the pre-forming's effect during multi-stages of tube hydroforming of aluminum alloy tube by using useful wrinkles, Journal of Materials Processing Technology, 209(5) (2009) 2553-2563.
- [19]] B.J. Mac Donald, Practical stress analysis with finite elements, Glasnevin publishing, 2007.
- [20] Q. Situ, A new approach to obtain forming limits of sheet materials, McMaster university, 2008..
- [21] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, Journal of Materials Engineering and Performance,

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحه ۵۷۱ تا ۵۸۶