



Investigating the Effect of Geometric Parameters on Forming AA6063 Cylindrical Step Tubes by Hot Metal Gas Forming Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rajaei M.¹ MSc,
Hosseinipour S.J.^{*1} PhD,
Jamshidi Aval H.¹ PhD

How to cite this article

Rajaei M, Hosseinipour S.J, Jamshidi Aval H. Investigating the Effect of Geometric Parameters on Forming AA6063 Cylindrical Step Tubes by Hot Metal Gas Forming Process. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1865-1873.

ABSTRACT

In this paper, the effect of geometric parameters of tube and die on the forming behavior of AA6061 step tube in hot metal gas forming process (HMGF) is investigated. For this purpose, empirical experiments and finite element simulations with ABAQUS software have been used. Investigations have been made at the different ratios of die to tube diameter (D/d) and the different ratios of tube thickness to diameter (t/d). A simple theoretical model for the relationship between these geometric parameters and the process parameters such as internal pressure and axial feeding is presented. The results show that under constant internal pressure and axial feeding conditions, the die filling percentage decreases with increasing the ratios of D/d and t/d . Also, in the constant D/d ratio, by increasing the t/d ratio to about 0.05, the die filling percentage reduces gradually, but with increasing t/d to 0.06, a sharp decrease occurs in the die filling percentage. Using different simulations, the internal pressure, and axial feeding are changed proportional to the t/d and D/d ratios. The results show that in accordance with the prediction of the theoretical model, the relative internal pressure and relative axial feeding should be increased linearly with increasing the t/d and expansion ratio ($D/d-1$), respectively, to give specimens with approximately the same die filling percentage.

Keywords Hot Metal Gas Forming; Axial Feeding; Step Tubes; AA6063; Geometric Parameters

¹Advanced Materials Forming Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Advanced Materials Forming Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Avenue, Babol, Iran
Phone: +98 (11) 32367846
Fax: +98 (11) 32367846
j.hosseini@nit.ac.ir

Article History

Received: October 17, 2018
Accepted: January 20, 2019
ePublished: August 12, 2019

CITATION LINKS

[1] Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 ... [2] Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and ... [3] Prediction of bursting in warm tube hydroforming ... [4] Forming limit diagram of aluminum AA6063 tubes at high ... [5] Enhancing the formability of aluminum components via ... [6] Warm hydroforming of magnesium alloy tube with ... [7] Scalability of conventional tube hydroforming processes ... [8] Mechanical property and formability of AZ31B extruded ... [9] Finite element modeling of superplastic forming ... [10] Formability determination of AZ31B tube for IHPF process at ... [11] Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal ... [12] Mechanical properties and formability of TA2 extruded tube for hot ... [13] Finite element analysis and experimental investigation ... [14] Experimental investigation of aluminum tubes hot ... [15] Multiobjective optimization of hot metal gas forming process ... [16] Formability of 6063 aluminum alloy tube at high temperature ... [17] Hot gas bulging of sealed aluminum alloy tube using ... [18] The influence of process variables on the gas forming and press ... [19] Novel process chain for hot metal gas forming of ferritic ... [20] The deformation and microstructure of Ti-3Al-2.5V tubular component ... [21] Strength of materials, advanced theory and ... [22] The effect of geometric parameters of conical cups on the preform shape ... [23] As-cast residual stresses in an aluminum alloy AA6063 billet: Neutron ...

بررسی اثر پارامترهای هندسی در شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ به‌وسیله فرآیند شکل‌دهی‌داغ با دمش گاز

مصطفی رجائی MSc

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

سیدجمال حسینی‌پور PhD

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

حامد جمشیدی‌اول PhD

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

چکیده

در این مقاله تاثیر پارامترهای هندسی لوله و قالب بر رفتار تغییرشکل لوله پله‌ای در فرآیند شکل‌دهی‌داغ با گاز (HMGF) لوله از جنس آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. بررسی‌ها در نسبت قطر قالب به قطر لوله ($\frac{D}{d}$) و نسبت ضخامت به قطر لوله ($\frac{t}{d}$) متفاوت صورت گرفته است. همچنین یک مدل تئوری ساده برای ارتباط بین پارامترهای هندسی مذکور با پارامترهای فرآیندی فشار داخلی و تغذیه محوری ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در شرایط فشار داخلی و تغذیه محوری ثابت با افزایش نسبت $\frac{D}{d}$ و $\frac{t}{d}$ درصد پرشدگی قالب کاهش می‌یابد. همچنین در نسبت $\frac{D}{d}$ ثابت، با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ تا حدود ۰/۰۵ کاهش درصد پرشدگی قالب به صورت تدریجی است، اما با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ به ۰/۰۶ کاهش درصد پرشدگی قالب به شدت رخ می‌دهد. با استفاده از شبیه‌سازی مقادیر فشار داخلی و تغذیه محوری متناسب با نسبت‌های $\frac{D}{d}$ و $\frac{t}{d}$ مختلف، تغییر داده شد. نتایج حاصل نشان دادند که مطابق با پیش‌بینی مدل تئوری، مقدار فشار داخلی نسبی و تغذیه محوری نسبی باید به‌طور خطی به‌ترتیب با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ و نسبت انبساط ($\frac{D}{d} - 1$) افزایش یابند، تا نمونه‌هایی با درصد پرشدگی یکسان به دست آید.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی فلز داغ با گاز، تغذیه محوری، لوله‌های پله‌ای، آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳، پارامترهای هندسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

*نویسنده مسئول: j.hosseini@nit.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از قطعات لوله‌ای شکل با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌ها و به‌خصوص کاهش مصرف سوخت در وسایل نقلیه مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به شکل‌پذیری پایین لوله‌های آلومینیمی در دمای محیط، تحقیقات در این رابطه روی شکل‌دهی در دمای بالا متمرکز شده است. لی و همکاران^[1] با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ گرم شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیمی ۷۰۷۵ از دمای اتاق تا دمای ۳۰۰°C را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج به‌دست‌آمده شکل‌پذیری با افزایش دما زیاد می‌شود. سیدکاشی و همکاران^[2] اثر ابعاد لوله، شعاع گوشه و نرخ کرنش بر میزان فشار داخلی بهینه و جابه‌جایی محوری مورد نیاز برای فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیمی ۶۰۶۱ در دمای ۳۰۰°C را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم بازپخت منحنی‌های بارگذاری فشار و نیروی محوری را بهینه ساختند. هاشمی و همکاران^[3] هیدروفرمینگ گرم لوله‌های با مقطع مربعی را تا دمای ۳۰۰°C مورد بررسی قرار داده و به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و استفاده از معیارهای شکست

نرم، پارگی در این لوله‌ها را پیش‌بینی کردند. هاشمی و همکاران^[4] در تحقیقی دیگر برآمدگی (بالج) آزاد همراه با نیروی محوری لوله‌های آلومینیمی ۶۰۶۳ در فرآیند هیدروفرمینگ گرم تا دمای ۳۰۰°C را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها بیشترین نسبت انبساط را ۱۵٪ گزارش کردند. کیلگر و همکاران^[5] فرآیند هیدروفرمینگ گرم را به‌وسیله نرم‌افزار ال‌اس-دینا (LS-DYNA) شبیه‌سازی نموده و پارامترهای شکل‌پذیری و توزیع ضخامت آلیاژ آلومینیم را مورد بررسی قرار دادند. گنگ و همکاران^[6] روی شکل‌پذیری لوله آلیاژ منیزیم با استفاده از هیدروفرمینگ گرم با توزیع دمای غیریکنواخت روی لوله‌های نازک با نسبت انبساط کم مطالعه نمودند. آنها از سیستم خنک‌کاری در دو انتهای لوله و در منطقه تغییر شکل نیز از سیستم گرمایشی استفاده کردند و بدین‌ترتیب بین نواحی مختلف لوله گرادیان دمایی به وجود آوردند و توزیع ضخامت را مورد بررسی قرار دادند. لاورری و همکاران^[7] مقیاس‌پذیری فرآیند معمولی هیدروفرمینگ لوله را از ابعاد ماکرو به میکرو مورد بررسی قرار دادند. آنها برای جلوگیری از مشکلات ایجادشده در ابزار در مقیاس میکرو با استفاده از یک مدل ریاضی، سنبه‌ای با نوک مخروطی طراحی نموده و مورد تجزیه تحلیل المان محدود و آزمایش تجربی قرار دادند. مشخص شد که با این مدل، تنش در سنبه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین انجام عملیات هیدروفرمینگ میکرولوله امکان‌پذیر است.

هی و همکاران^[8] آزمایش کشش حلقه لوله آلیاژ AZ31 را تا دمای ۳۰۰°C و آزمایش کشش تک‌محوره را تا دمای ۳۵۰°C انجام دادند. مشخص شد حداکثر کشیدگی در لوله‌های بدون درز با بالارفتن دما افزایش و در لوله‌های درزدار کاهش می‌یابد. نزال و همکاران^[9] از شبیه‌سازی برای بررسی فشار شکل‌دهی ورق و لوله AZ31 به‌وسیله فرآیند شکل‌دهی‌داغ با دمش گاز در دمای ۴۰۰°C استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که هرچه شعاع لوله کمتر باشد فشار اولیه شکل‌دهی افزایش و سپس برای ثابت‌ماندن نرخ کرنش کاهش می‌یابد و تغییر طول منطقه برآمدگی (بالج) آزاد با توجه به شعاع ثابت نمونه‌ها، هیچ تاثیری بر فشار شکل‌دهی اولیه ندارد. لی و همکاران^[10] شکل‌پذیری لوله آلیاژ AZ31B را تا دمای ۴۸۰°C با دمش گاز نیتروژن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش دما ازدیاد طول در جهت محیطی به سرعت شروع به افزایش و حداکثر به ۳۰٪ در دمای ۱۵۰°C رسیده و سپس تا دمای ۲۱۰°C رو به کاهش گذاشته و پس از آن تا ۳۰۰°C افزایش یافته و به حدود ۴۷٪ می‌رسد. هی و همکاران^[11] شکل‌پذیری لوله آلومینیم ۶۰۶۱ را با دمش گاز تا دمای ۶۰۰°C با استفاده از آزمایش برآمدگی آزاد مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان داشتند که با افزایش دما فشار ترکیدگی به‌شدت کاهش می‌یابد و نسبت انبساط در دمای ۴۵۰°C به اندازه ۸۶٪ است که پس از این دما کاهش یافته تا این که به مقدار ۶۵٪ در دمای ۵۰۰°C می‌رسد. در تحقیقی دیگر هی و همکاران^[12] شکل‌پذیری لوله تیتانیوم TA2 را توسط شکل‌دهی با دمش گاز تا دمای ۹۵۰°C مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که استحکام کششی لوله عملاً با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. همچنین فشار ترکیدن به وضوح با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. صوئی و همکاران^[13] تحلیل المان محدود و فرآیند شکل‌دهی‌داغ ورق آلومینیم ۳۰۰۳ به‌وسیله دمش گاز نیتروژن تا دمای ۶۰۰°C را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما فشار مورد نیاز شکل‌دهی کاهش، شکل‌پذیری افزایش و فشار ترک کاهش می‌یابد. نصرالله‌زاده و همکاران^[14, 15] بررسی تجربی فرآیند

$$(L + \Delta L) \times \pi d \times t_0 = (L \times \pi D \times t) \quad (1)$$

$$+ 2 \left[\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \times t \right]$$

که در رابطه فوق ΔL مقدار تغذیه محوری است. در حالت ایده‌آل با فرض یکسان بودن ضخامت لوله و ضخامت نمونه ($t=t_0$) می‌توان نوشت:

$$\Delta L \times d = L \times (D - d) + \frac{1}{2} (D^2 - d^2) \quad (2)$$

رابطه (۲) را می‌توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{(D - d)}{d} + \frac{1}{2} \times \frac{(D - d) \times (D + d)}{d \times L} \quad (3)$$

قطر متوسط و نسبت انبساط در روابط (۴) و (۵) ذکر شده است:

$$\bar{D} = \frac{1}{2} (D + d) \quad (4)$$

$$Expansion Ratio = \left(\frac{D}{d} - 1 \right) \quad (5)$$

بنابراین رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه (۶) بازنویسی نمود:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{D}{d} - 1 \right) \times \left(1 + \frac{\bar{D}}{L} \right) \quad (6)$$

به منظور به دست آوردن یک رابطه ساده و با توجه به این که اغلب برای این نوع از قطعات طول منطقه شکل‌دهی خیلی بزرگ‌تر از قطر آن است، بنابراین با فرض اینکه $L \gg \bar{D}$ است و صرف نظر کردن از جمله دوم سمت راست رابطه (۶)، برای فرآیند شکل‌دهی با گاز لوله رابطه (۷) در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\Delta L}{L} = \beta \left(\frac{D}{d} - 1 \right) \quad (7)$$

که β ضریب تناسب است.

از طرف دیگر براساس تئوری مکانیک جامدات، تنش محیطی در مخزن استوانه‌ای جدارنازک تحت فشار از رابطه (۸) به دست می‌آید [21]:

$$\sigma = \frac{P d}{2t} \quad (8)$$

با توجه به رابطه (۸)، برای فرآیند شکل‌دهی با گاز لوله رابطه (۹) در نظر گرفته شده است:

$$\frac{P}{\bar{\sigma}} = \alpha \frac{t}{d} \quad (9)$$

که P فشار گاز اعمالی، $\bar{\sigma}$ تنش سیلان متوسط ماده در دمای مورد نظر و α ضریب تناسب است. روابط (۷) و (۹) ارتباط بین پارامترهای هندسی بی‌بعد شده ($\frac{t}{d}$ و $\frac{D}{d}$) را با پارامترهای فرآیندی بی‌بعد شده (تغذیه محوری نسبی $\frac{\Delta L}{L}$ و فشار اعمالی نسبی $\frac{P}{\bar{\sigma}}$) نشان می‌دهند. مطابق این مدل پیش‌بینی می‌شود که برای لوله‌هایی که نسبت $\frac{D}{d}$ و $\frac{t}{d}$ یکسان دارند مقادیر نسبی فشار و تغذیه محوری می‌تواند تقریباً یکسان باشد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ و نسبت انبساط $(\frac{D}{d} - 1)$ به ترتیب باید مقدار فشار نسبی و مقدار تغذیه محوری نسبی افزایش یابد.

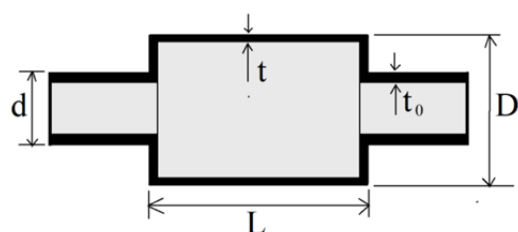
شکل‌دهی لوله‌های آلومینیمی با روش دمش‌گاز تا دمای 500°C برای تولید قطعات با سطح مقطع مربعی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش دما کاهش چشم‌گیری در فشار شکل‌دهی به وجود می‌آید و با افزایش زمان اعمال فشار، پخشیدگی گوشه‌ها بیشتر خواهد شد. حاجی‌نژاد و همکاران [16] شکل‌پذیری لوله آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ در دمای بالا به کمک آزمون چند برآمدگی با فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز تا دمای 600°C را بررسی نمودند و نمودار سیلان لوله در دمای مختلف را به دست آوردند. مائو و همکاران [17] با اعمال تغذیه محوری در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش هوا تا دمای 560°C ، شکل‌پذیری لوله آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ را به وسیله آزمون برآمدگی آزاد مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که تغذیه محوری نقش بسیار مهمی در شکل‌پذیری لوله در حالت داغ نسبت به حالت سرد دارد. پلی و همکاران [18] روش ترکیبی از فرآیند شکل‌دهی لوله داغ با گاز و فرآیند سخت‌کاری فشاری ابداع کردند. آنها با استفاده از این روش تاثیر متغیرهای فرآیند بر پدیده سخت‌شدن دو نوع مختلف از قطعات لوله‌ای فولادی را مورد بررسی قرار دادند. موصل و همکاران [19] نیز یک زنجیره فرآیند جدیدی برای فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز برای تولید قطعات اکروز از فولاد زنگ نزن فریتی ارایه کرده است. وو و همکاران [20] مسیر بارگذاری فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز و ریزساختار قطعات لوله‌ای تولیدشده از آلیاژ تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان می‌دهد عمده تحقیقات صورت‌گرفته در رابطه با فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با گاز روی لوله‌هایی با مشخصات هندسی ثابت انجام شده است. هدف از این تحقیق بی‌بعدسازی پارامترهای هندسی و فرآیندی، بررسی اثر پارامترهای هندسی روی پارامترهای فرآیندی و ارایه یک مدل ساده به منظور پیش‌بینی مقادیر فشار و تغذیه محوری مورد نیاز برای تولید لوله‌های پله‌ای با مقادیر پارامترهای هندسی لوله و قالب متفاوت است.

۲- روش تحقیق

به منظور توسعه نتایج برای لوله‌های با هندسه مختلف، اثر پارامترهای هندسی شامل ضخامت، قطر لوله و قطر قالب بر درصد پخشیدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با استفاده از روابط تئوری پارامترهای مذکور بی‌بعدسازی شده و سپس نتایج آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود توضیح داده می‌شود.

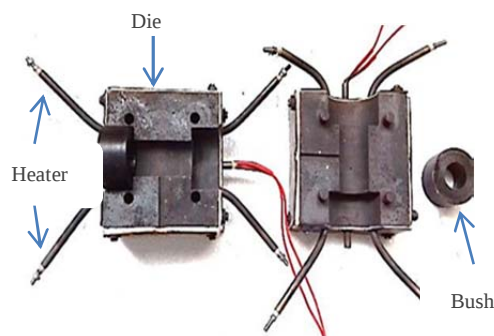
۲-۱- روابط تئوری

در شکل ۱ پارامترهای هندسی مورد نظر به صورت شماتیک نشان داده شده است، که در آن t_0 ضخامت لوله، d قطر لوله، D قطر قالب، L طول قالب و t ضخامت نمونه پس از تغییر شکل در منطقه حفره قالب هستند.



شکل ۱) نمایش شماتیک پارامترهای هندسی

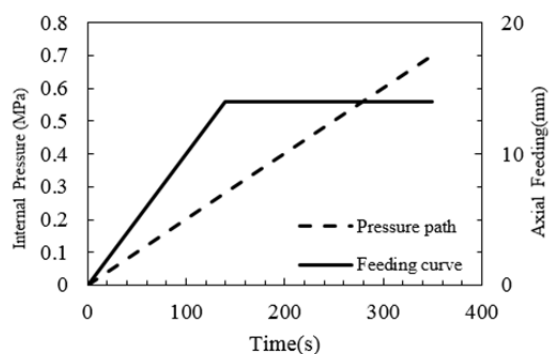
با توجه به اصل ثبات حجم در تغییر شکل پلاستیک، از برابر قرار دادن حجم لوله با حجم نمونه تغییر شکل‌یافته در منطقه حفره



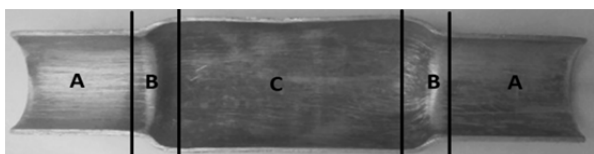
شکل (۳) مجموعه قالب



شکل (۴) تجهیزات برای فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با دمش‌گاز همراه با تغذیه محوری



نمودار (۱) مسیر بارگذاری با فشار ۰/۷ مگاپاسکال و تغذیه محوری ۱۴ میلی‌متر

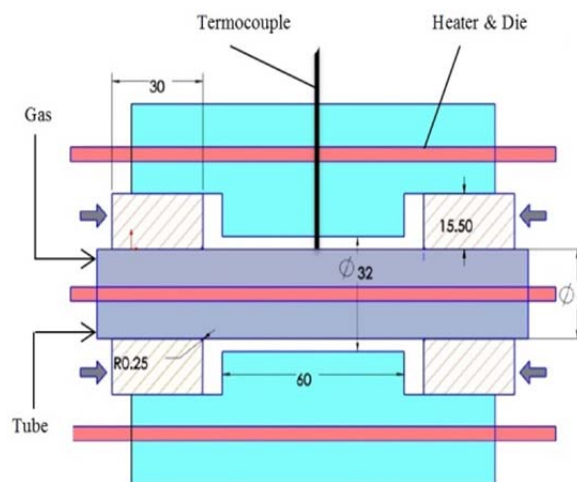


شکل (۵) نمونه برش خورده

۲-۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

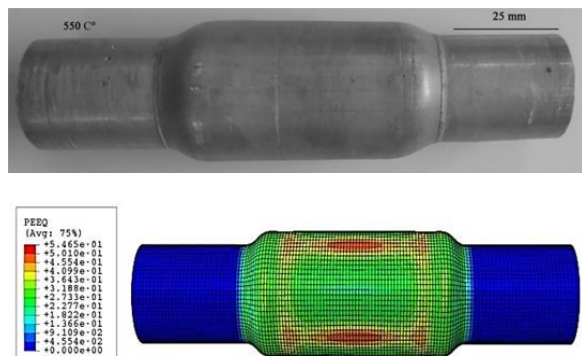
برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS) استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، به دلیل تغییر شکل متقارن لوله از مدل متقارن محوری استفاده شد. اگرچه می‌توان در شبیه‌سازی لوله همسانگرد از مدل دوبعدی استفاده کرد، اما در این تحقیق به منظور برآورد تنش و کرنش محیطی و چروکیدگی در شبیه‌سازی لوله از مدل سه‌بعدی استفاده شده است. البته خاطر نشان می‌شود که در این تحقیق نتایج حاصل از مدل سه‌بعدی نسبت به مدل دوبعدی نزدیک‌تر به نتایج تجربی به دست آمد. نوع المان‌ها C3D8R و تعداد ۳ المان در راستای ضخامت لوله در نظر گرفته شد. ابعاد المان‌ها

ماده مورد استفاده لوله بدون درز آلومینیم ۶۰۶۳ به ضخامت ۱/۳ و ۱/۵ میلی‌متر و قطر بیرونی ۲۵ و ۲۸ میلی‌متر است. برای تولید لوله پله‌ای، یک مجموعه قالب طراحی شد که در شکل ۲ به طور شماتیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود لوله با طول ۱۹۰ میلی‌متر در داخل قالب قرار گرفته و قالب بسته می‌شود. قطر داخلی قالب ۳۲ و ۳۶ میلی‌متر و طول منطقه تغییر شکل ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تغذیه محوری لوله از طریق جابه‌جایی دو بوش متصل به لوله از دو طرف انجام می‌شود. برای اعمال حرارت به‌طور یکنواخت از چهار عدد گرمکن میله‌ای و دو عدد گرمکن فشنگی در درون قالب و یک عدد گرمکن میله‌ای در درون لوله با توان هر کدام ۳۰۰ وات استفاده شده است. در شکل ۳، قالب ساخته‌شده نشان داده شده است. به منظور انجام آزمایشات، یک مجموعه دستگاه که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد، طراحی و ساخته شد. در شکل ۴ مجموعه تجهیزات ساخته‌شده برای فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با دمش‌گاز همراه با تغذیه محوری نشان داده شده است. میزان سرعت و مقدار جابه‌جایی دستگاه، توسط برد کنترل‌کننده استپ موتور تنظیم می‌شود. به منظور تامین فشار گاز شکل‌دهی از یک دستگاه کمپرسور هوا با حداکثر ظرفیت ایجاد فشار یک مگاپاسکال استفاده و فشار به‌صورت خطی و آرام به درون لوله اعمال شد، تا به مقدار تعیین‌شده برسد. کنترل فشار حین انجام فرآیند به‌وسیله مانومتر صورت می‌گیرد. برای آب‌بندی لوله در دو انتهای آن، از دو بوش فلزی پیچ و مهره‌ای استفاده شده است که مانع از نشت هوای فشرده از لوله می‌شود. از اشعه مادون قرمز برای اندازه‌گیری دقیق میزان پیشروی تغذیه محوری استفاده شده است. برای کنترل درجه حرارت از یک کنترلر درجه حرارت استفاده شد که به‌وسیله یک ترموکوپل نوع k به سطح لوله متصل است. آزمایشات در دمای ۵۵۰°C انجام شد. نحوه اعمال فشار و تغذیه محوری به‌صورت تدریجی و خطی در یک بازه زمانی حداکثر ۳۵۰ ثانیه‌ای تا فشار و تغذیه محوری مورد نظر انجام شده است. در نمودار ۱ مسیر فشار و تغذیه محوری برحسب زمان برای فشار ۰/۷ مگاپاسکال با تغذیه محوری ۱۴ میلی‌متر نشان داده شده است. پس از انجام آزمایشات مطابق شکل ۵ نمونه‌ها در راستای طولی لوله به‌وسیله دستگاه برش سیمی بریده شده و ضخامت نمونه در قسمت‌های مختلف با استفاده از میکرومتر اندازه‌گیری شد. همچنین پروفیل قطعه و درصد پرشدگی قالب مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۲) شماتیکی از مجموعه قالب طراحی‌شده برای انجام آزمایشات

بررسی اثر پارامترهای هندسی در شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای از آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ ... ۱۸۶۹
آزمان تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌بینی شبیه‌سازی از دقت خوبی برخوردار است.



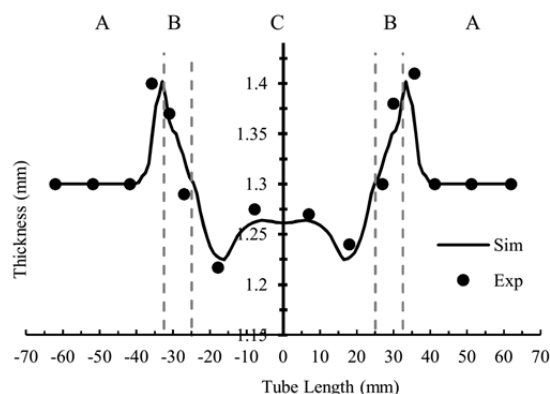
شکل ۷) لوله پله‌ای شکل داده شده در آزمون تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۲) مقایسه درصد پرشدگی آزمون تجربی و شبیه‌سازی

درصد پرشدگی	
آزمایش	۹۱/۲
شبیه‌سازی	۸۶/۳
درصد خطا (%)	۵/۵

جدول ۴) ابعاد لوله و قالب مورد بررسی در نسبت ضخامت به قطر لوله ثابت

t (میلی‌متر)	d (میلی‌متر)	D (میلی‌متر)	D/d	t/d
۱/۰۴	۲۰	۲۲/۸	۱/۱۴	۰/۰۵۲
۱/۳	۲۵	۲۸/۵		
۱/۵۶	۳۰	۳۴/۲		
۱/۰۴	۲۰	۲۵/۶	۱/۲۸	
۱/۳	۲۵	۳۲		
۱/۵۶	۳۰	۳۸/۴		
۱/۰۴	۲۰	۲۸/۴	۱/۴۲	
۱/۳	۲۵	۳۵/۵		
۱/۵۶	۳۰	۴۲/۶		

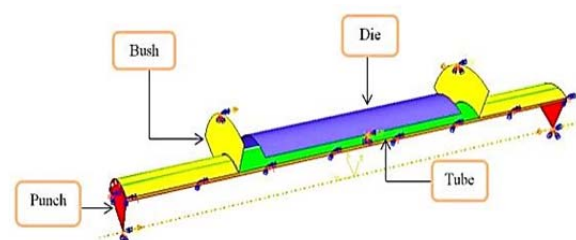


نمودار ۳) نمودار توزیع ضخامت در شبیه‌سازی و تجربی

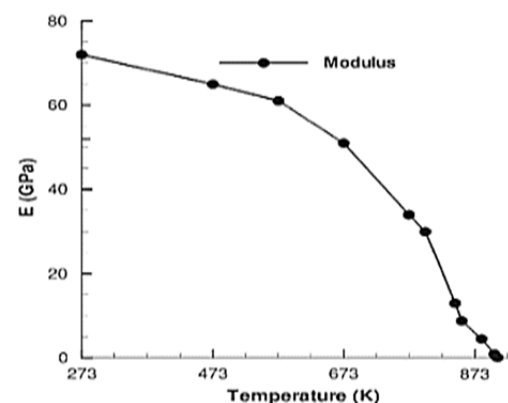
۳-۲- بررسی پارامترهای هندسی در فشار و تغذیه محوری ثابت

به‌منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی در درصد پرشدگی قالب، شبیه‌سازی اجزای محدود در شرایط فشار و تغذیه محوری ثابت انجام شد. در جدول‌های ۳ و ۴ محدوده پارامترهای هندسی مورد بررسی ذکر شده است. برای کلیه محدوده پارامترهای هندسی مذکور، مقادیر فشار و تغذیه محوری ثابت و مطابق با مسیر بارگذاری نمودار ۱ انجام شد.

۱۸۶۹/۴۳ میلی‌متر مکعب است. قالب با استفاده از المان خطی و چهارگوش R3D4، از سری المان‌های صلب گسسته المان‌بندی شده است. از حل‌گر ضمنی برای تحلیل شبیه‌سازی استفاده شد. با توجه به این که در آزمایش‌های تجربی از روانکار استفاده نشده است، در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس با هم، از مدل اصطکاکی کولمب با ضریب اصطکاک ۰/۵ استفاده شده است [22]. روش انتخاب سطوح روش تماس سطح به سطح و روش حل مدل اصطکاکی از نوع پنالتی انتخاب شده است. نمودار تنش- کرنش با استفاده از نتایج حاجی‌نژاد و همکاران [16] برای آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ در دمای ۵۵۰°C به نرم‌افزار اعمال شد. لازم به ذکر است که تحقیق حاضر در ادامه تحقیق حاجی‌نژاد و همکاران [16] توسط همین تیم پژوهشی روی آلیاژ یکسان انجام شده است. در نمودار ۲ [23] و جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ مذکور که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه شده است.



شکل ۶) مدل المان محدود به‌کاررفته در شبیه‌سازی



نمودار ۲) نمودار تغییرات مدول الاستیک آلیاژ آلومینیم برحسب دما [23]

جدول ۱) خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ [16, 22]

خواص ماده	مقدار
نسبت پواسون	۰/۳۳
چگالی (کیلوگرم بر مترمربع)	۲۶۸۰

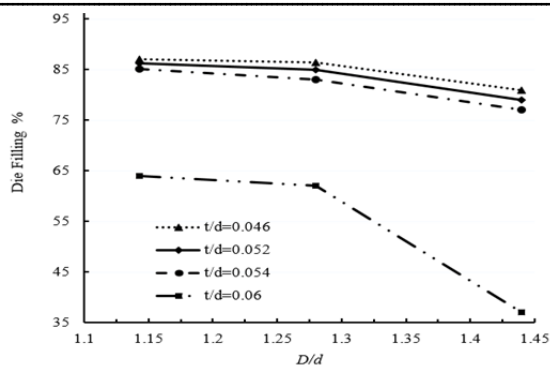
۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی شبیه‌سازی

برای تایید شبیه‌سازی اجزا محدود، توزیع ضخامت از مرکز لوله پر شده و درصد پرشدگی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد. در شکل ۷ نمونه پله‌ای استوانه‌ای شکل داده شده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برای لوله با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱/۳ میلی‌متر و قطر قالب ۳۲ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده، تفاوت بین درصد پرشدگی آزمون تجربی و شبیه‌سازی کمتر از ۵٪ است. همچنین در نمودار ۳ توزیع ضخامت نمونه شکل‌داده‌شده در شبیه‌سازی و

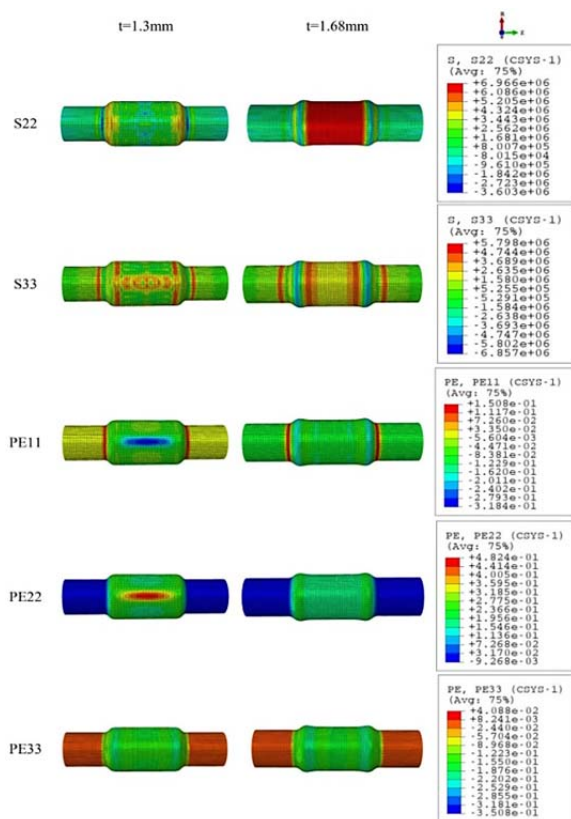
جدول ۳) ابعاد لوله و قالب مورد بررسی در نسبت قطر قالب به قطر لوله ثابت

t (میلی‌متر)	d (میلی‌متر)	D (میلی‌متر)	t/d	D/d
۱/۲	۲۶	۳۳/۴۳	۰/۰۴۶	۱/۲۸
۱/۳	۲۸	۳۶		
۱/۴	۳۰/۲	۳۸/۸		
۱/۱	۲۱/۱	۲۷/۱		
۱/۳	۲۵	۳۲/۱	۰/۰۵۲	۱/۲۸
۱/۵	۲۹	۳۷/۳		
۱/۳	۲۴/۳	۳۱/۲۴		
۱/۴	۲۶	۳۳/۴۲		
۱/۵	۲۸	۳۶	۰/۰۵۴	۱/۲۸
۱/۲۶	۲۱/۱	۲۷/۱۳		
۱/۵	۲۵	۳۲/۱۴		
۱/۱۸	۲۸	۳۶		



نمودار ۵) تاثیر نسبت قطر لوله به قطر قالب بر درصد پرشدگی، با نسبت‌های متفاوت ضخامت به قطر لوله

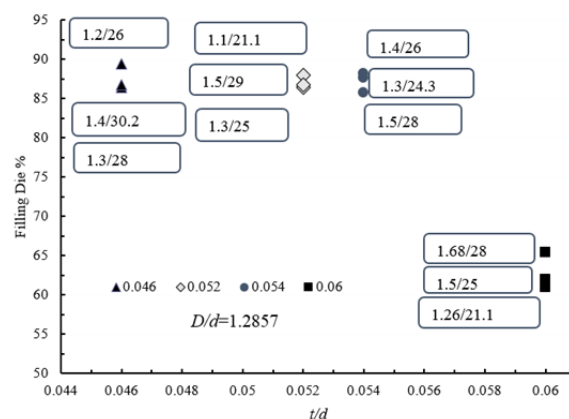
در شکل ۸ توزیع کرنش شعاعی، محیطی، محوری و توزیع تنش‌های محوری و محیطی در انتهای فرآیند برای لوله با قطر ۲۸ و قطر قالب ۳۶ میلی‌متر با دو ضخامت ۱/۳ و ۱/۶۸ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت ضخامت به قطر لوله بالا، حداکثر تنش محیطی در مرکز نمونه قرار دارد. با کاهش نسبت ضخامت به قطر لوله حداکثر تنش‌های محیطی از وسط نمونه به گوشه‌های آن (منطقه B)، منتقل می‌شود.



شکل ۸) توزیع تنش و کرنش نمونه‌ها با ضخامت ۱/۳ و ۱/۶۸ میلی‌متر (تنش محیطی S22، تنش محوری S33، کرنش شعاعی PE11، کرنش محیطی PE22، کرنش محوری PE33)

در نسبت ضخامت به قطر لوله پایین، تنش محیطی در مرکز نمونه به دلیل برخورد نمونه با دیواره قالب کاهش می‌یابد و حداکثر کرنش شعاعی منفی در وسط نمونه رخ داده که به سمت لبه لوله (منطقه A) به صفر کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، کرنش محیطی مثبت در وسط نمونه بزرگ‌تر است. کرنش محوری حداکثر در وسط نمونه

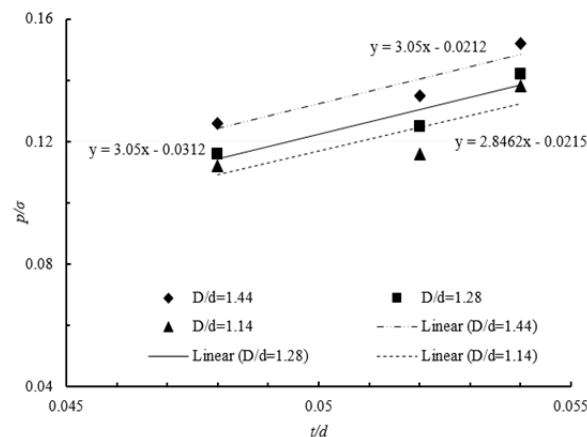
در نمودار ۴ اثر نسبت $\frac{t}{d}$ بر درصد پرشدگی قالب برای یک نسبت $\frac{D}{d}$ یکسان نشان داده شده است. برای هر نسبت $\frac{t}{d}$ مشخص سه لوله با مقادیر قطر و ضخامت متفاوت در نظر گرفته شد. مشاهده می‌شود که مطابق پیش‌بینی تئوری برای لوله‌هایی که مقادیر قطر و ضخامت متفاوت دارند، اما نسبت $\frac{t}{d}$ آنها یکسان است درصد پرشدگی قالب تقریباً مشابه است.



نمودار ۴) تاثیر نسبت ضخامت به قطر لوله بر درصد پرشدگی، در نسبت قطر قالب به قطر لوله ۱/۲۸

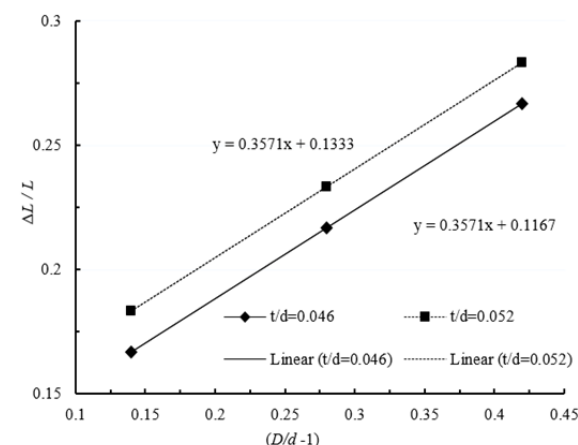
در نمودار ۵ اثر نسبت $\frac{D}{d}$ بر درصد پرشدگی قالب برای نسبت $\frac{t}{d}$ متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای هر نسبت $\frac{t}{d}$ مشخص با افزایش نسبت $\frac{D}{d}$ درصد پرشدگی قالب کاهش می‌یابد. همچنین در هر $\frac{D}{d}$ یکسان نیز با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ درصد پرشدگی قالب کاهش می‌یابد. بدیهی است که به دلیل ثابت بودن مقدار فشار و تغذیه محوری، با افزایش t و D یا کاهش d مقدار درصد پرشدگی قالب کاهش یابد. نکته قابل توجه آن است که با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ تا حدود ۰/۰۵ کاهش درصد پرشدگی قالب تدریجی است. اما با افزایش این نسبت به ۰/۰۶ درصد پرشدگی قالب به شدت کاهش یافته است. براساس تئوری مکانیک جامدات، لوله‌های با نسبت $\frac{t}{d}$ کمتر از ۰/۰۵ جدارنازک محسوب شده و بنابراین شرایط بارگذاری تنش صفحه‌ای است [21]. در صورتی که با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ به ۰/۰۶ لوله از حالت جدارنازک خارج شده و به جدارضخیم تبدیل می‌شود. بنابراین شرایط تنش به صورت سه‌بعدی شده و منجر به کاهش شکل‌پذیری لوله می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ ، مطابق پیش‌بینی تئوری فشار نسبی تقریباً به‌طور خطی باید افزایش یابد، تا نمونه سالم با درصد پرشدگی یکسان به دست آید. مقدار ضریب تناسب α در حدود ۳ به دست آمد و مقدار خطا در حدود ۳٪ است.



نمودار ۶) تغییرات فشار نسبی بر حسب پارامترهای هندسی برای درصد پرشدگی در حدود ۸۷ تا ۹۰٪

همچنین در نمودار ۷ تغییرات تغذیه محوری نسبی بر حسب نسبت انبساط $(\frac{D}{d} - 1)$ در مقادیر $\frac{t}{d}$ مختلف برای درصد پرشدگی بین ۸۷ تا ۹۰٪ نشان داده شده است. در اینجا نیز مطابق پیش‌بینی تئوری مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت انبساط $(\frac{D}{d} - 1)$ مقدار تغذیه محوری نسبی تقریباً به‌طور خطی افزایش یافته است. با استفاده از شیب این خطوط ضریب تناسب β در حدود ۰/۳۶ با خطای در حدود ۱۳٪ به دست آمد. علت افزایش خطا در اینجا می‌تواند ناشی از صرف‌نظرکردن از جمله دوم سمت راست رابطه (۶) باشد.

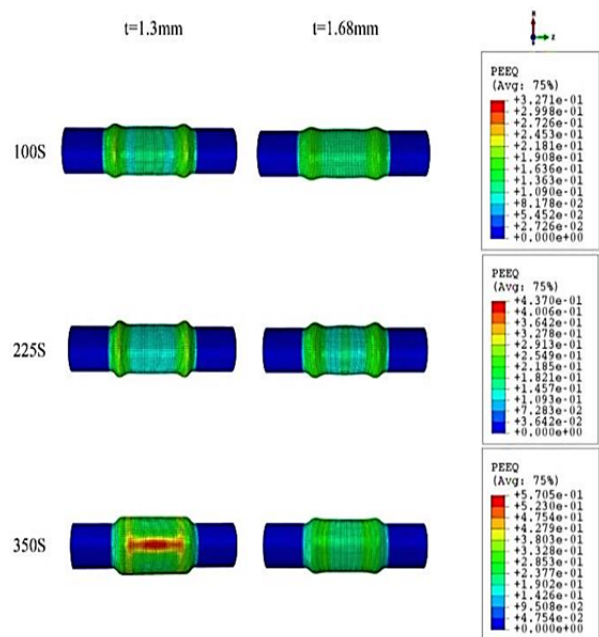


نمودار ۷) تغییرات تغذیه محوری نسبی بر حسب پارامترهای هندسی برای درصد پرشدگی در حدود ۸۷ تا ۹۰٪

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمونه‌های شکل‌داده‌شده در آزمایشات تجربی با نسبت $\frac{t}{d}$ برابر ۰/۴۶ و ۰/۵۴ و نسبت $\frac{D}{d}$ برابر ۱/۱۴ و ۱/۲۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌های سالم بدون هیچ چروک یا پارگی به دست آمده است.

(منطقه C) رخ می‌دهد. افزایش نسبت ضخامت به قطر لوله توزیع کرنش شعاعی را تغییر می‌دهد. نکته قابل توجه این است که کرنش محیطی ۰/۲۵ در وسط نمونه در منطقه حفره قالب اتفاق می‌افتد، که نشان‌دهنده پرشدن قالب در این منطقه است.

شکل ۹ تغییرات کرنش معادل برای لوله با قطر ۲۸ و قطر قالب ۳۶ میلی‌متر در زمان‌های مختلف (۱۰۰، ۲۲۵ و ۳۵۰ ثانیه) را نشان می‌دهد. در نسبت ضخامت به قطر لوله کم، چروک ابتدایی در نمونه‌ها ارتفاع بلندتری در گوشه‌ها نمونه دارند و بالاترین کرنش در وسط نمونه با توجه به غلبه اثر فشار گاز بر تغذیه محوری رخ می‌دهد. چروک در گوشه نمونه به‌وسیله افزایش تغذیه محوری و غلبه اثر آن بر فشار گاز ایجاد می‌شود.



نمودار ۹) توزیع کرنش معادل در زمان‌های متفاوت برای نمونه با ضخامت ۱/۳ و ۱/۶۸ میلی‌متر

در نسبت ضخامت به قطر لوله کم، چروک صاف می‌شود و سطح میانی نمونه بدون هیچ‌گونه پاره‌شدن تحت تاثیر فشار در طول زمان پر می‌شود اما در نسبت ضخامت به قطر لوله بالا چروک در انتهای تغییر شکل حفظ می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان بیان نمود که چروک ایجادشده در نسبت ضخامت به قطر لوله بالا مانع دستیابی به نمونه سالم با درصد پرشدگی مناسب می‌شود. افزایش فشار یا درجه حرارت می‌تواند به کاهش چروک در این شرایط کمک نماید.

۳-۳- بررسی پارامترهای هندسی در درصد پرشدگی قالب یکسان

همان‌طور که در قسمت تئوری اشاره شد، با افزایش نسبت‌های $\frac{t}{d}$ و $\frac{D}{d}$ باید مقادیر فشار و تغذیه محوری افزایش یابد. در این قسمت با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف براساس روابط (۷) و (۹) مقادیر فشار و تغذیه محوری متناسب با نسبت‌های $\frac{t}{d}$ و $\frac{D}{d}$ متفاوت در محدوده لوله‌های جدارنازک تغییر داده شد، تا درصد پرشدگی تقریباً یکسان به دست آید.

در نمودار ۶ تغییرات فشار نسبی بر حسب نسبت $\frac{t}{d}$ در مقادیر $\frac{D}{d}$ مختلف برای درصد پرشدگی بین ۸۷ تا ۹۰٪ نشان داده شده است.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی و چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتوای علمی و ادبی مقاله حاضر مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل پژوهشی مستقل بوده، هیچ گونه تضاد منافعی با اشخاص یا سازمان‌های دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مصطفی رجایی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر داده‌ها/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ سید جمال حسینی‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/روش‌شناس (۴۰٪)؛ حامد جمشیدی‌اول (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر داده‌ها/نگارنده بحث (۲۰٪)

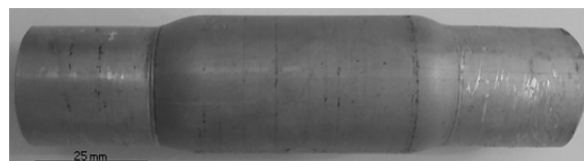
منابع مالی: مطالعه حاضر تحت حمایت مالی اعتبار پژوهشی پروژه‌های دکتری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل بوده است.

منابع

- 1- Lee MY, Sohn SM, Kang CY, Suh DW, Lee SY. Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2004;155-156:1337-1343.
- 2- Seyedkashi SMH, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Mosavi Mashadi M, Moon YH. Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes. Modares Mechanical Engineering. 2013;12(5):122-131. [Persian]
- 3- Hashemi SJ, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Shahbazi Karami J, Roohi AH. Prediction of bursting in warm tube hydroforming using modified ductile fracture criteria. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(16):201-211. [Persian]
- 4- Hashemi SJ, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Azizi Tafti R, Rahmani F. Forming limit diagram of aluminum AA6063 tubes at high temperatures by bulge tests. Journal of Mechanical Science and Technology. 2014;28(11):4745-4752.
- 5- Keigler M, Bauer H, Harrison D, De Silva AKM. Enhancing the formability of aluminum components via temperature controlled hydroforming. Journal of Materials Processing Technology. 2005;167(2-3):363-370.
- 6- Liu G, Zhang WD, He ZB, Yuan SJ, Lin Z. Warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio within non-uniform temperature field. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22 Suppl 2:s408-s415.
- 7- Lowrie J, Ngaile G. Scalability of conventional tube hydroforming processes from macro to micro/meso. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. 2018;232(12):2164-2177.
- 8- He ZB, Liu G, Wu J, Yuan SJ, Liang YC. Mechanical property and formability of AZ31B extruded tube at elevated temperature. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008;18 Suppl 1:s209-s213.
- 9- Nazzal MA, Abu-Farha FK. Finite element modeling of superplastic forming of tubular shapes. Key Engineering



الف



ب

شکل ۱۰ قطعات لوله‌ای پله‌ای شکل داده‌شده با قطر لوله ۲۸ میلی‌متر، قطر قالب ۳۲ میلی‌متر (الف) ضخامت ۱/۳ میلی‌متر (ب) ضخامت ۱/۵ میلی‌متر



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ قطعات لوله‌ای پله‌ای استوانه‌ای شکل داده‌شده با قطر لوله ۲۸ میلی‌متر، قطر قالب ۳۶ میلی‌متر، (الف) ضخامت ۱/۳ میلی‌متر (ب) ضخامت ۱/۵ میلی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای هندسی لوله و قالب روی رفتار تغییر شکل لوله‌های پله‌ای از جنس آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ در فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل ساده به‌منظور پیش‌بینی مقادیر فشار و تغذیه محوری مورد نیاز برای تولید لوله‌های پله‌ای با مقادیر پارامترهای هندسی لوله و قالب متفاوت بود. نتایج حاصل به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

(۱) یک مدل تئوری ساده برای ارتباط بین پارامترهای هندسی لوله و قالب با پارامترهای فرآیندی فشار و تغذیه محوری به‌صورت بی‌بعد شده ارائه شد، که با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی صحت آن مورد تأیید قرار گرفت.

(۲) نتایج حاصل نشان داد که برای ۱٪ پرشدگی یکسان، با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ ، باید فشار نسبی P/σ افزایش یافته و با افزایش نسبت انبساط $(\frac{D}{d} - 1)$ ، باید مقدار تغذیه محوری نسبی $\frac{\Delta L}{L}$ افزایش یابد. به عبارت دیگر برای لوله‌هایی که نسبت $\frac{t}{d}$ و $\frac{D}{d}$ یکسان دارند، مقادیر نسبی فشار و تغذیه محوری یکسان منجر به درصد پرشدگی مشابه می‌شود.

(۳) بررسی پارامترهای هندسی در شرایط فشار و تغذیه محوری ثابت نشان داد که با افزایش نسبت $\frac{t}{d}$ تا حدود ۰/۵، کاهش درصد پرشدگی قالب تدریجی است. اما با افزایش این نسبت به ۰/۶، مقدار درصد پرشدگی قالب به‌شدت کاهش می‌یابد، که دلیل آن ناشی از تغییر شرایط بارگذاری لوله از حالت تنش صفحه‌ای (جدارنازک) به حالت تنش سه‌بعدی (جدارضخیم) است.

forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(3):185-192. [Persian]

17- Maeno T, Mori KI, Fujimoto K. Hot gas bulging of sealed aluminum alloy tube using resistance heating. *Manufacturing Review*. 2014;1:5.

18- Paul A, Strano M. The influence of process variables on the gas forming and press hardening of steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;228:160-169.

19- Mosel A, Lambbari J, Degenkolb L, Reuther F, Hinojo JL, Rößiger J, et al. Novel process chain for hot metal gas forming of ferritic stainless steel 1.4509. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1960(1):160019.

20- Wu Y, Liu G, Wang K, Liu Z, Yuan Sh. The deformation and microstructure of Ti-3Al-2.5V tubular component for non-uniform temperature hot gas forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88(5-8):2143-2152.

21- Timoshenko S. *Strength of materials, advanced theory and problems*. 3rd Edition. Ashrafi HR, translator. Tehran: Norpardazan; 2013. pp. 103-118. [Persian]

22- Shamsi Sarband A, Hosseinipour SJ, Bakhshi Jooybari M, Shakeri M. The effect of geometric parameters of conical cups on the preform shape in two-stage superplastic forming process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22(12):3601-3611.

23- Drezet JM, Phillion AB. As-cast residual stresses in an aluminum alloy AA6063 billet: Neutron diffraction measurements and finite element modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010;41(13):3396-3404.

Materials. 2010;433:179-184.

10- Lin YL, He ZB, Yuan SJ, Wu J. Formability determination of AZ31B tube for IHPF process at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(4):851-856.

11- He ZB, Fan XB, Shao F, Zheng KL, Wang ZB, Yuan SJ. Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal gas forming at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012;22 Suppl 2:s364-s369.

12- He ZB, Teng BG, Che CY, Wang ZB, Zheng KL, Yuan SJ. Mechanical properties and formability of TA2 extruded tube for hot metal gas forming at elevated temperature. *Transactions of Nonferrous Metals*. 2012;22:479-484.

13- Zoei MS, Farzin M, Mohammadi AH. Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet. *Modares Mechanical Engineering*. 2011;11(2):49-56. [Persian]

14- Nasrollahzade M, Moslemi Naeini H, Hashemi SJ, Abbaszadeh B, Shahbazi Karami J. Experimental investigation of aluminum tubes hot gas forming and production of square cross-section specimens. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(12):435-442. [Persian]

15- Nasrollahzade M, Shahbazi Karami J, Moslemi Naeini H, Hashemi SJ, Mohammadi Najafabadi H. Multiobjective optimization of hot metal gas forming process to production of square parts. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(10):364-374. [Persian]

16- Hajinejad Sorkhi M, Hosseinipour SJ, Jamshidi Aval H. Formability of 6063 aluminum alloy tube at high temperature using multi-bulge test by hot metal gas