



بررسی شکل پذیری لوله آلیاژ آلومینیوم 6063 در دمای بالا به کمک آزمون چند - برآمدگی با فرآیند شکل دهی داغ با دمش گاز

محسن حاجی نژادسرخي¹، سید جمال حسینی پور^{2*}، حامد جمشیدی اول³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1394

پذیرش: 04 بهمن 1394

ارائه در سایت: 12 اسفند 1394

کلید واژگان:

شکل دهی داغ با دمش گاز

آزمون برآمدگی آزاد

آزمون چند - برآمدگی لوله

آلیاژ آلومینیوم 6063

چکیده

با توجه به شکل پذیری پایین آلیاژهای آلومینیوم در دمای محیط، شکل دهی این آلیاژها در دمای بالا انجام می شود. تحقیقات نشان داده است که نتایج حاصل از آزمون کشش ساده در دمای بالا در پیش بینی رفتار ماده در شکل دهی لوله های آلومینیومی در دمای بالا از دقت کافی برخوردار نیست؛ بنابراین تعیین خواص مکانیکی این لوله ها در دمای بالا از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این پژوهش ابتدا شکل پذیری لوله های آلیاژ آلومینیوم 6063 به کمک آزمون برآمدگی آزاد در محدوده دمایی 430 C - 600 C بررسی شده و سپس خواص مکانیکی آن شامل تنش جریان، ضریب حساسیت به نرخ کرنش و نیز ضریب استحکام به کمک آزمون چند - برآمدگی در محدوده دمایی 530 C - 580 C به دست آمده است. برای این منظور از فرایند شکل دهی داغ با دمش گاز استفاده شده و تأثیر پارامترهای مهم فرایند مانند دما، فشار و زمان بر نسبت انبساط، و ارتفاع برآمدگی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که بیشترین نسبت انبساط 58% در دمای 580 C به دست می آید. با افزایش درجه حرارت از 430 C به 600 C فشار ترک از 1.9 مگاپاسکال به 0.6 مگاپاسکال کاهش می یابد. با افزایش زمان اعمال فشار، ارتفاع برآمدگی افزایش می یابد، همچنین با افزایش دما، تنش جریان و ضریب استحکام کاهش یافته و ضریب حساسیت به نرخ کرنش افزایش می یابد.

Formability of 6063 aluminum alloy tube at high temperature using multi-bulge test by hot metal gas forming process

Mohsen Hajinejad Sorkhi, Seyed Jamal Hosseini-pour*, Hamed Jamshidi Aval

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 December 2015
Accepted 24 January 2016
Available Online 02 March 2016

Keywords:

Hot metal gas forming
Tube free-bulge test
Tube multi-bulge test
Aluminum alloy 6063

ABSTRACT

Due to the low formability of aluminum alloys at ambient temperature, forming of these alloys is performed at high temperature. Research has shown that the results of simple tensile test to predict the materials behavior at high temperatures are not sufficiently accurate to predict the formability of aluminum tubes at high temperature. The mechanical properties of the tube are very important at high temperatures. In this study the formability of 6063 aluminum alloy tubes are investigated by free bulging test at temperature range 430°C to 600°C. Then the mechanical properties including flow stress, strain rate sensitivity coefficient and strength constant are obtained using tube multi-bulge test at temperature range 530°C to 580°C. For this purpose, hot metal tube gas forming process is used and the effect of process parameters such as the effect of temperature, pressure and time on the expansion ratio and height of the bulge are studied. The results show that the maximum expansion ratio is 58% at 580°C. Bursting pressure decreases from 1.9MPa to 0.6MPa with temperature increasing from 430°C to 600°C. The bulge height increases with increasing forming time at constant pressure. Also, with increasing temperature in the temperature range 530°C to 580°C the flow stress and strength constant decrease and strain rate sensitivity coefficient increases.

1- مقدمه

قطعات استوانه های یک تکه استفاده بسزایی دارد [2]. هیدروفرمینگ نیز فرآیندی برای شکل دهی قطعات لوله ای شکل است که می توان قطعات را با استحکام بالاتر و ضخامت کمتر تولید کرد، اما روش هیدروفرمینگ دارای محدودیت در شکل پذیری آلیاژهای آلومینیوم در درجه حرارت محیط و فشار بالای مورد نیاز برای شکل دهی است. این محدودیت ها بر طراحی قطعه، طراحی فرآیند، طراحی ابزار و مونتاژ ابزار تأثیر می گذارند. به دلیل فشار بالای

امروزه در صنعت خودرو برای کاهش مصرف سوخت و همچنین بهبود انعطاف پذیری در طراحی و تولید قطعات پیچیده، کاربرد مواد سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم به صورت جدی مورد توجه قرار گرفته است [1]. عملیات برآمدگی لوله برای تولید بسیاری از اجزا مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد. برای نمونه در تولید سیلندرهای استوانه های موج دار و همچنین

Please cite this article using:

M. Hajinejad Sorkhi, S. J. Hosseini-pour, H. Jamshidi Aval, Formability of 6063 aluminum alloy tube at high temperature using multi-bulge test by hot metal gas forming process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 185-192, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سوپرپلاستیک لوله تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که این روش نسبت به آزمون کشش از دقت لازم جهت به‌دست آوردن ویژگی سوپرپلاستیک مواد لوله‌ای شکل تحت تنش دو محوره برخوردار است. یان و همکاران [15] شکل‌پذیری لوله‌های منیزیمی AZ31B را به وسیله فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز مورد بررسی قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری لوله آلومینیومی در ابتدا با افزایش دما به میزان حداکثر 27% در دمای 150 C می‌رسد و سپس با افزایش دما تا 300 C به میزان 11% کاهش می‌یابد. از دمای 300 C دوباره این نسبت حالت صعودی به خود می‌گیرد و به بیشترین مقدار خود در حدود 30% در دمای 480 C می‌رسد. هی و همکاران [16] شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیوم 6061 را به وسیله فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز مورد بررسی قرار دادند. ایشان توانستند بهترین محدوده دمایی شکل‌دهی لوله آلیاژ آلومینیوم 6061 را در فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز به‌دست آورند. مائو و همکاران [17] با استفاده از حرارت‌دهی به روش مقاومتی، دمش گاز همراه با تغذیه محوری لوله آلیاژ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که، شکل‌پذیری لوله آلومینیومی در حالت گرم تا حد بسیار زیادی نسبت به حالت سرد افزایش پیدا کرده است و با افزایش تغذیه محوری، نسبت انبساط افزایش می‌یابد.

آلیاژهای گروه 6000 به طور گسترده در قطعات لوله‌ای در حال استفاده هستند و یکی از محبوب‌ترین آلیاژها در صنعت به شمار می‌آیند، زیرا به دلیل قابلیت اکستروژن شدن می‌تواند به آسان به اشکال پیچیده تبدیل شوند [18]. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد تاکنون پژوهشی در زمینه بررسی شکل‌پذیری و تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز لوله آلیاژ آلومینیوم 6063 در دماهای مختلف انجام نشده است. در این پژوهش خواص مکانیکی و تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز لوله آلیاژ آلومینیوم 6063 با استفاده از آزمون برآمدگی آزاد و آزمون چند- برآمدگی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- آزمایشات تجربی

2-1- تجهیزات مورد استفاده

تجهیزات مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز لوله عبارتند از: قالب با هندسه رینگ از جنس فولاد که با استفاده از دستگاه تراش ماشین‌کاری شده است، کوره، گاز آرگون، مانومتر، ترموکوپل، لوله آلیاژ آلومینیوم 6063. در شکل 1 و 2 به ترتیب شماتیکی از قالب با هندسه رینگ و تجهیزات آزمایشگاهی فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز نشان داده شده است.

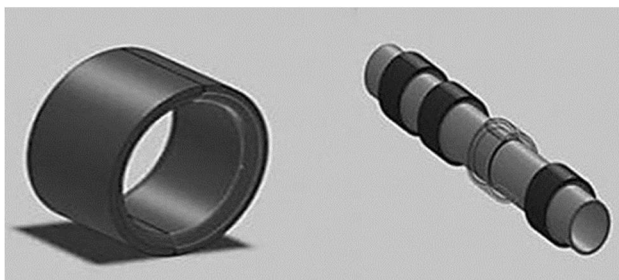


Fig. 1 Schematic of the ring dies geometry

شکل 1 شماتیکی از مجموعه قالب با هندسه رینگ

شکل‌دهی در این فرآیند به پرس با تناژ بالا نیاز بوده و قالب‌ها باید به گونه‌ای ساخته شوند که فشارهای بالا را تحمل کنند. این امر دشواری شکل‌دهی و هزینه مواد خام و تناژ پرس مورد نیاز را افزایش می‌دهد؛ بنابراین می‌توان با استفاده از تکنولوژی شکل‌دهی در دمای بالا بر این محدودیت‌ها غلبه کرد [3]. علاوه بر این هیدروفرمینگ گرم دارای محدودیت‌های دیگری نیز است. به دلیل استفاده از سیال روغن بیشینه محدوده دمایی شکل‌دهی در حدود 300 C است [5,4]. در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با گاز، لوله تا رسیدن به دمای شکل‌دهی حرارت می‌بیند. فشار گاز که معمولاً نیتروژن، آرگون یا هواس، در سطح داخلی لوله اعمال می‌شود و لوله شکل مورد نظر را به خود می‌گیرد [6]. در این روش استحکام تسلیم ماده با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد و می‌توان با استفاده از گاز با فشار کم، قطعات پیچیده را شکل داد [7]. در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران تحقیقاتی را بر انجام فرآیند شکل‌دهی در دمای بالا انجام داده‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

هی و همکاران [8] رفتار تغییر شکل لوله آلیاژ منیزیم AZ31B را در راستای محیطی و طولی مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آن‌ها شکل‌پذیری ماده در راستای محیطی در یک محدوده دمایی کاهش می‌یابد، ولی در راستای طولی با افزایش دما شکل‌پذیری ماده به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. کیم و همکاران [9] هیدروفرم‌پذیری لوله‌های آلومینیومی را در دماهای مختلف بررسی کردند. ایشان انتقال دمای بین لوله و قالب را در آزمون برآمدگی آزاد به‌وسیله شبیه‌سازی و آزمون تجربی بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش دما ارتفاع برآمدگی افزایش می‌یابد. هاشمی و همکاران [10] به کمک معیارهای شکست نرم اصلاح‌شده و با در نظر گرفتن تأثیر دما و نرخ کرنش در شکست، ترکیب‌دهی لوله و شعاع گوشه قطعه مربعی را در هیدروفرمینگ گرم تا دمای 300 C پیش‌بینی کردند. ایشان توانستند توسط معیارهای شکست نرم اصلاح‌شده محل رخداد ترک‌دهی را به خوبی مشخص کنند. در تحقیقی دیگر هاشمی و همکاران [11]، برآمدگی آزاد و با نیروی محوری آلیاژ آلومینیوم 6063 را در فرآیند هیدروفرمینگ گرم به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. محدوده دمایی آزمایش ایشان از دمای محیط تا دمای 300 C بود. بیشترین نسبت انبساط که این محققین با نیروی محوری به‌دست آوردند 15% بود. یوشیزاوا و همکاران [12] در مورد محاسبه ضریب حساسیت به نرخ کرنش با استفاده از آزمون فشار داغ تحقیق کردند. آن‌ها با استفاده از آزمون فشار داغ مقدار ضریب حساسیت به نرخ کرنش آلیاژ آلومینیوم SPZ را تحت تنش‌های مختلف به‌دست آوردند و با نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش داغ مقایسه و اشاره کردند که نتایج حاصل از آزمون فشار داغ دقیق‌تر بوده و تست کشش داغ در تعیین ویژگی ماده در دمای بالا یک مشکل جدی را از لحاظ نزدیکی آزمون انجام‌شده به واقعیت ایجاد می‌کند. ضوئی و همکاران [13]، تحلیل المان محدود و بررسی آزمایشگاهی شکل‌دهی داغ با گاز ورق آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با استفاده از سیال گاز می‌توان به دماهای بالای شکل‌دهی دست یافت. همچنین با افزایش دما، شکل‌پذیری افزایش و فشار ترک کاهش می‌یابد. آن‌ها به این مورد اشاره کردند که اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی و کار تجربی به دلیل استفاده از خصوصیات ماده حاصل از آزمون کشش داغ است که در این آزمون تنش در حالت تک محوری بوده و با حالت واقعی متفاوت است. مرسی و همکاران [14] در خصوص استفاده از آزمون چند- برآمدگی برای لوله آلیاژ تیتانیوم تحقیق کردند و ویژگی

2-2- آزمون برآمدگی آزاد لوله

جهت محاسبه فشار ترک و بیشترین نسبت انبساط لوله در فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز از آزمون برآمدگی آزاد لوله در محدوده دمایی 430°C - 600°C استفاده شد. از لوله آلیاژ آلومینیوم 6063 با قطر خارجی 25 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شد. طول منطقه آزاد 35 میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابتدا لوله از دو سمت برای جلوگیری از نشت گاز به وسیله مهره‌های مخصوص کاملاً مسدود شد. سپس قالب و لوله در داخل کوره قرار داده شد و تحت حرارت یکنواخت قرار گرفت. درجه حرارت توسط کنترلر دما و ترموکوپل، در طی زمان شکل‌دهی اندازه‌گیری و کنترل شد. ترموکوپل، از طریق سوراخ بالای کوره با سطح خارجی لوله تماس پیدا می‌کند و دمای سطح لوله را اندازه‌گیری می‌کند. ترموکوپل به یک سیستم کنترل‌کننده دارای دقت ± 2 درجه سانتی‌گراد متصل است. با رسیدن لوله به دمای مورد نظر فشار گاز به لوله تا هنگام پارگی لوله اعمال و سپس فشار ترک لوله در هر آزمون ثبت شد. بالاترین درجه حرارت در آزمایش تجربی 600°C و فشار اعمالی در این دما 6 بار در نظر گرفته شد. در شکل 4 نمودار مسیر فشار اعمالی در آزمون برآمدگی آزاد نشان داده شده است. محدوده فشار اعمال شده در آزمون برآمدگی آزاد با توجه به دمای هر آزمایش از 6 تا 19 بار متغیر بود. پس از انجام هر آزمون، لوله از مرکز برآمدگی به وسیله دستگاه وایرکات بریده شد. بیشترین ارتفاع برآمدگی با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری و سپس بیشترین نسبت انبساط با استفاده از معادله (1) [11] محاسبه شد.

$$\text{Maximum Bulging Ratio} = \frac{(D_{\max} - D_i)}{D_i} \quad (1)$$

$D_{\max}$ بیشترین قطر لوله پس از برآمدگی و D_i قطر نخستین لوله است. نمونه‌ای از قطعه بریده‌شده جهت اندازه‌گیری در شکل 5 در دمای 580°C در آزمون برآمدگی آزاد نشان داده شده است.

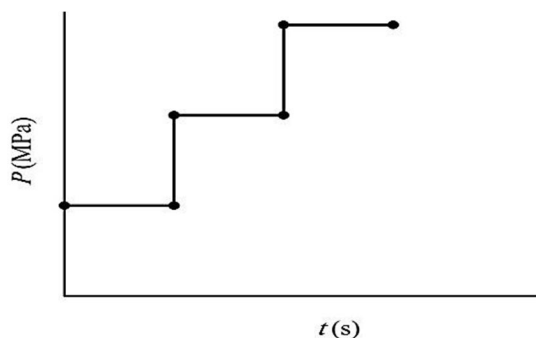


Fig. 4 Pressure path in free bulge test

شکل 4 مسیر فشار در آزمون برآمدگی آزاد

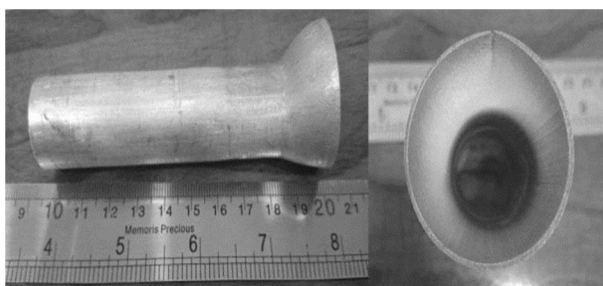


Fig. 5 The cross section of the specimen after free bulging test

شکل 5 مقطع بریده‌شده نمونه پس از آزمون برآمدگی آزاد

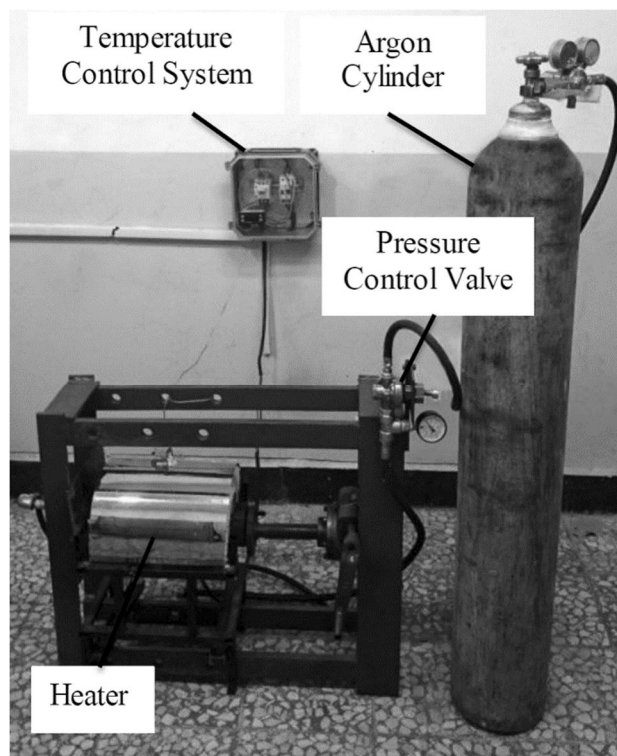


Fig. 2 Hot metal gas forming set up

شکل 2 تجهیزات آزمایشگاهی شکل‌دهی داغ لوله با دمش گاز

آنالیز ترکیب شیمیایی لوله آلیاژ آلومینیوم 6063 به روش کوانتومتری انجام و در جدول 1 گزارش شده است. کوره استفاده شده قابلیت ایجاد حرارت تا دمای 700°C را داراست. آرگون گاز به کار گرفته‌شده برای شکل‌دهی است. ترموکوپل نوع k در تمامی مراحل فرآیند روی لوله قرار گرفته تا دمای هر لحظه لوله را گزارش دهد. شکل 3 شماتیکی از مراحل برآمدگی آزاد لوله را نشان می‌دهد.

جدول 1 آنالیز ترکیب شیمیایی لوله

Table 1 chemical composition of tube

مس	روی	آهن	سیلیسیم	منیزیم	آلومینیوم
0.0166	0.01	0.0208	0.335	0.482	پایه

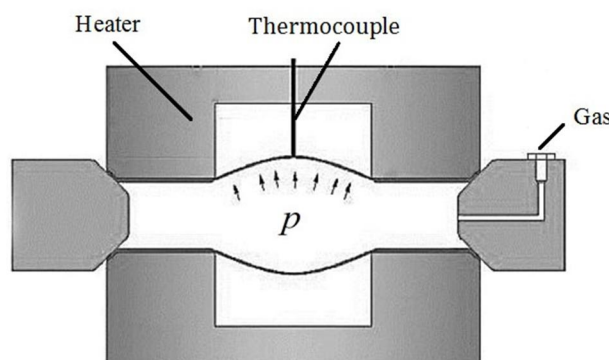


Fig. 3 Schematic of free bulging test

شکل 3 شماتیک آزمون برآمدگی آزاد لوله

3-2- آزمون چند- برآمدگی

جهت بررسی تنش جریان و نیز ثابت استحکام k و توان حساسیت به نرخ کرنش m ، در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله با دمش گاز، از آزمون چند- برآمدگی در محدوده دمایی 530°C - 580°C استفاده شد. از لوله آلیاژ آلومینیم 6063 با قطر خارجی 25 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شد. ابتدا لوله از دو سمت برای جلوگیری از نشت گاز به وسیله مهره‌های مخصوص کاملاً مسدود شد؛ سپس قالب و لوله در داخل کوره قرار داده شد و تحت حرارت یکنواخت قرار گرفت. درجه حرارت توسط کنترلر دما و ترموکوپل، مطابق با آزمون برآمدگی آزاد در طی زمان شکل‌دهی اندازه‌گیری شد. منطقه هر کدام از برآمدگی‌ها، 20 و 25 و 30 میلی‌متر در نظر گرفته شد که با رسیدن لوله به دمای مورد نظر، با اعمال فشار گاز آرگون به‌صورت ثابت، در زمان‌های مشخص سبب تغییر شکل لوله به ارتفاع‌های مختلف در این مناطق گردید. پس از شکل‌دهی، لوله از مرکز هر قسمت از برآمدگی به وسیله دستگاه وایرکات بریده شد و با یک ضخامت سنج با دقت 0.01 میلی‌متر برای اندازه‌گیری ضخامت استفاده شد. شرایط آزمایش در جدول 2 و نمودار مسیر فشارهای اعمالی به لوله برحسب زمان در آزمون چند- برآمدگی در شکل 6 نشان داده شده است. در شکل 7 نمونه‌ای از قطعه بریده شده جهت اندازه‌گیری نشان داده شده است.

جدول 2 شرایط آزمایشگاهی در آزمون چند- برآمدگی

Table 2 Experimental conditions in tube multi-bulge test

شماره آزمون	زمان آزمون (s)	فشار (bar)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
1	450	7.5	530
2	240	6.5	550
3	270	5.5	580



Fig. 6 Pressure path in tube multi-bulge test

شکل 6 مسیر فشار در آزمون چند- برآمدگی

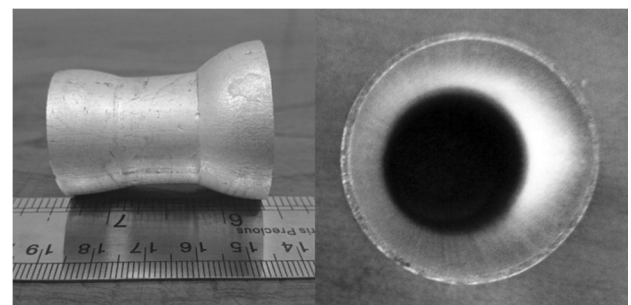


Fig. 7 The cross section of the specimen after multi-bulge test

شکل 7 مقطع بریده‌شده نمونه پس از آزمون چند- برآمدگی

3- تنوری

جهت تعیین تنش جریان و نیز ثابت استحکام و ضریب حساسیت به نرخ کرنش در مواد لوله‌ای شکل با استفاده از آزمون چند- برآمدگی، مجموعه روابط (2-12) در نظر گرفته شد [14]. شکل 8 تصویری از لوله را پس از تغییر شکل نشان می‌دهد. رشد دانه، حفره و کرنش سختی در محاسبات در نظر گرفته نشده است. رابطه (2) که معادله اصلی در فرآیندهای شکل‌دهی داغ است، در این پژوهش به‌عنوان معادله ساختاری ماده در نظر گرفته شده است.

$$\sigma = k \varepsilon^m \quad (2)$$

که σ تنش جریان، k ثابت استحکام، m توان حساسیت به نرخ کرنش و ε نیز نرخ کرنش است. تنش جریان مؤثر را می‌توان توسط نظریه غشایی که در آن از تنش در راستای ضخامت صرف‌نظر می‌شود به‌صورت رابطه (3) بیان کرد، که σ_m تنش نصف‌النهاری و σ_c تنش محیطی است.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_m \sigma_c + \sigma_c^2} \quad (3)$$

تنش نصف‌النهاری و تنش محیطی به وسیله رابطه (5,4) داده شده‌اند.

$$\sigma_m = \frac{pr}{2t_f} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{p(r_0+h)}{t_f} \left(\frac{l^2-r_0h}{l^2+h^2} \right) \quad (5)$$

p فشار لازم برای شکل‌دهی، t_f ضخامت نهایی لوله، r شعاع لوله پس از شکل‌دهی، r_0 شعاع اولیه لوله، l نصف طول پس از تغییر شکل و h ارتفاع برآمدگی است.

با استفاده از روابط (5,3) تنش جریان در رأس هر برآمدگی از طریق رابطه (6) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_e = \frac{p(r_0+h)}{2t_f} \sqrt{\left(1 + 4 \left(\frac{l^2-r_0h}{l^2+h^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{l^2-r_0h}{l^2+h^2} \right) \right)} \quad (6)$$

با استفاده از رابطه حجم ثابت می‌توان روابط (7-10) را نوشت.

$$\varepsilon_m + \varepsilon_c + \varepsilon_t = 0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_c = \ln \frac{r}{r_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t}{t_0} \quad (9)$$

$$\varepsilon_m = (\varepsilon_t + \varepsilon_c) = \ln \frac{t_0 r_0}{t r} \quad (10)$$

ε_m کرنش نصف‌النهاری، ε_c کرنش محیطی، ε_t کرنش ضخامت و t_0 ضخامت نخستین لوله است.

ε_e کرنش مؤثر در رأس بوده و به‌صورت رابطه (11) محاسبه می‌شود

$$\varepsilon_e = \sqrt{\frac{4}{3} (\varepsilon_c^2 + \varepsilon_c \varepsilon_t + \varepsilon_t^2)} \quad (11)$$

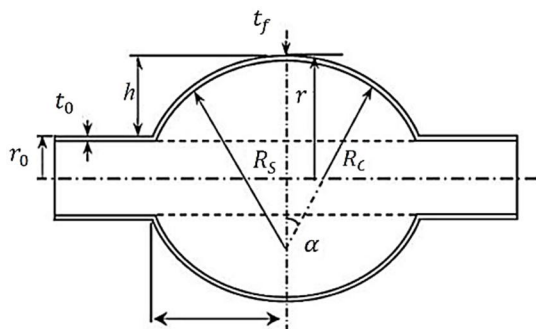


Fig. 8 Schematic of the tube geometry after deformed [14]

شکل 8 شماتیکی از هندسه لوله پس از تغییر شکل [14]

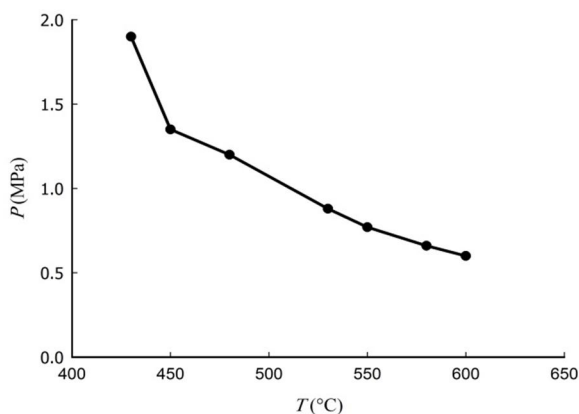


Fig. 9 The effect of temperature on crack pressure

شکل 9 تأثیر دما بر فشار ترک

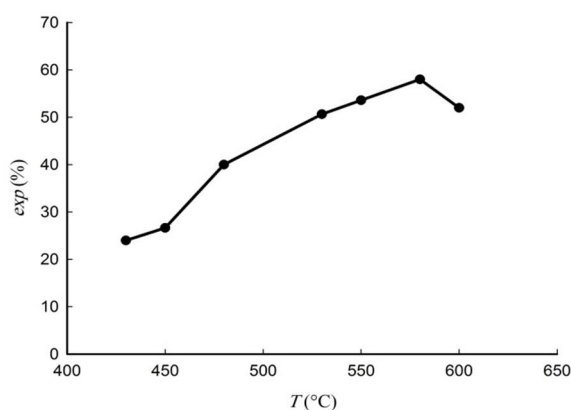


Fig. 10 The effect of temperature on the expansion ratio

شکل 10 تأثیر دما بر بیشینه نسبت انبساط

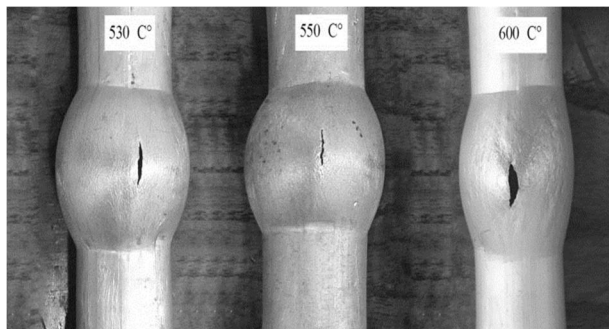
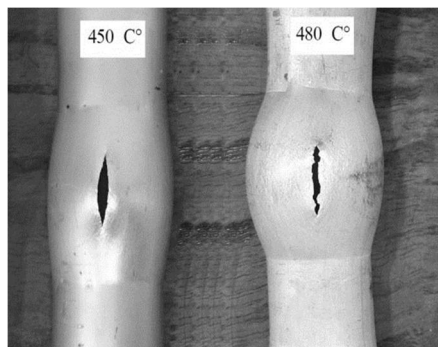


Fig. 11 Free bulge tube at different temperatures

شکل 11 نمونه‌های آزمون برآمدگی آزاد لوله در دماهای مختلف

در آزمون چند- برآمدگی، زمان تغییر شکل و درجه حرارت برای سه برآمدگی یکسان است؛ بنابراین می‌توان از نسبت کرنش $\frac{\epsilon_{e2}}{\epsilon_{e1}}$ در دو برآمدگی به جای نسبت نرخ کرنش $\frac{\dot{\epsilon}_{e2}}{\dot{\epsilon}_{e1}}$ در دو برآمدگی برای محاسبه m به صورت رابطه (12) استفاده کرد.

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\ln(\frac{\sigma_2}{\sigma_1})}{\ln(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1})} = \frac{\ln(\frac{\sigma_2}{\sigma_1})}{\ln(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1})} = \frac{\ln(\frac{\sigma_{e2}}{\sigma_{e1}})}{\ln(\frac{\epsilon_{e2}}{\epsilon_{e1}})} \quad (12)$$

4- نتایج و بحث

4-1- اثر دما بر نسبت انبساط و فشار ترک

تأثیر دما در مقاومت در برابر تغییر شکل را می‌توان با محاسبه فشار ترک سنجید. شکل 9 فشار ترک در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که فشار ترک با افزایش دما کاهش می‌یابد. فشار ترک در دمای 430 °C در حدود 19 بار است که با افزایش دما تا 600 °C به 6 بار کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دما تنش تسلیم ماده کاهش پیدا کرده و مقاومت ماده در برابر شکل‌دهی با افزایش دما کاهش می‌یابد و نیاز به نیروی کمتری برای شکل‌دهی است.

شکل 10 نسبت انبساط بیشینه را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما نسبت انبساط افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار نسبت انبساط 58% در دمای 580 °C است، سپس نسبت انبساط کاهش می‌یابد و به مقدار 52% در دمای 600 °C می‌رسد.

در شکل 11 لوله‌ها پس از آزمون برآمدگی آزاد در دماهای مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما میزان شکل‌پذیری قطعه افزایش یافته و طول خط ترک کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار طول خط ترک در دمای 430 °C و کمترین آن در دمای 580 °C ایجاد شده و دوباره با افزایش دما تا 600 °C طول خط ترک افزایش یافته است. تغییرات طول خط ترک با دما متناسب با تغییرات نسبت انبساط با دماست، به گونه‌ای که تا دمای 580 °C نسبت انبساط روند افزایشی و طول خط ترک روند کاهشی را نشان می‌دهد و سپس با افزایش دما تا 600 °C این روند معکوس می‌شود. دلیل این تغییرات را باید در تغییر مکانیزم شکست با افزایش دما جستجو کرد. در شکل 12 نمونه آزمایش در دمای 430 °C در بزرگ‌نمایی بالاتر نشان داده شده است. در این دما شکست با صدای زیاد ناشی از ترکیدگی همراه بوده و مکانیزم شکست ناشی از گلوپی شدن و پارگی ماده است. با افزایش دما به تدریج حفره‌ها در سطح لوله ظاهر شده و صدای ترکیدگی کاهش می‌یابد. در دمای 580 °C همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، وجود حفره‌ها در خط ترک و اطراف آن کاملاً آشکار است و مکانیزم شکست ناشی از حفره‌زایی است. در شکل 14 با افزایش دما تا 600 °C نرخ رشد حفره به شدت افزایش یافته و منجر به شکست زود هنگام، کاهش نسبت انبساط و افزایش طول خط ترک می‌شود [6].

با توجه به نتایج تجربی به‌دست آمده هم‌چون نسبت انبساط بیشینه و فشار ترک می‌توان به این نتیجه رسید که محدوده دمایی 530 °C تا 580 °C نشان‌دهنده محدوده دمایی مناسب این نوع آلیاژ آلومینیوم است که میزان خط ترک در این محدوده دمایی در حال کاهش، و نسبت انبساط در حال افزایش است، بنابراین بررسی خواص مکانیکی ماده در این محدوده دمایی انجام شده است.

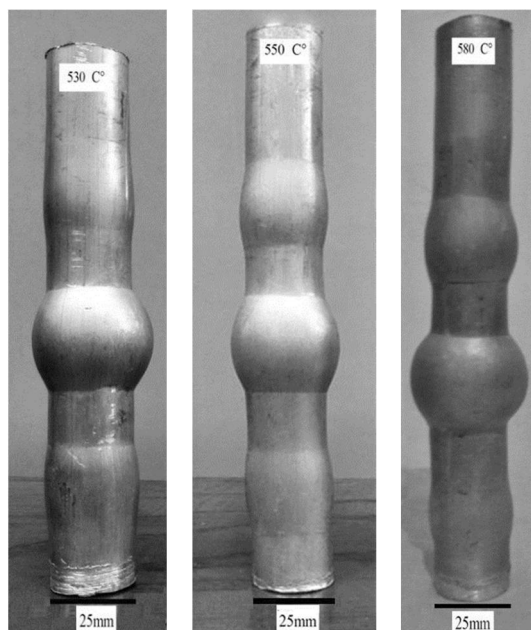


Fig. 15 the specimens of tube multi-bulge test at various temperatures

شکل 15 نمونه‌های آزمون چند- برآمدگی در دماهای مختلف

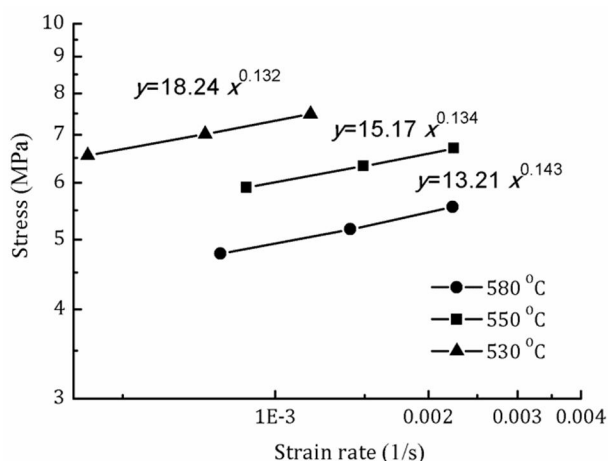


Fig. 16 Flow stress in the temperature range 530°C to 580°C

شکل 16 تنش سیلان در محدوده دمایی 530°C تا 580°C

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون چند- برآمدگی نشان می‌دهد که تنش سیلان با افزایش نرخ کرنش در دمای ثابت افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این فرایند سرعت تغییر شکل نیز بسیار مهم است.

4-3- اثر دما بر ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) و ثابت استحکام (k)

با توجه به معادله 2، شیب منحنی تنش- نرخ کرنش و عرض از مبدا آن در شکل 15 به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر میانگین ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) و ثابت استحکام (k) در محدوده دمایی مورد مطالعه است. در شکل‌های 16 و 17 به ترتیب تغییرات ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) و ثابت استحکام (k) بر حسب دما نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما مقدار میانگین m افزایش یافته و در دمای 580°C به مقدار 0.143 می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار m میزان شکل‌پذیری ماده افزایش می‌یابد [18]. در شکل 10 مشاهده می‌شود که با افزایش دما مقدار نسبت انبساط لوله افزایش یافته است، همچنین در شکل

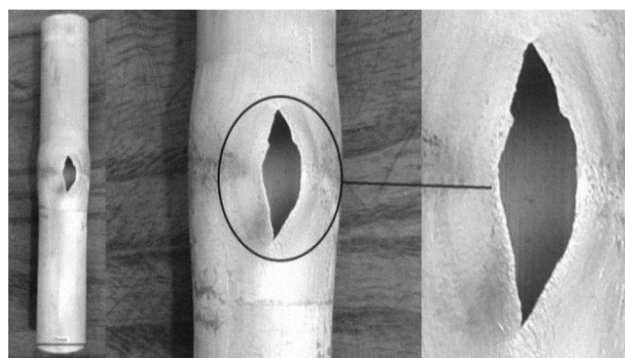


Fig. 12 The greatest amount of crack line at 430°C

شکل 12 بیشترین میزان طول خط ترک در 430°C

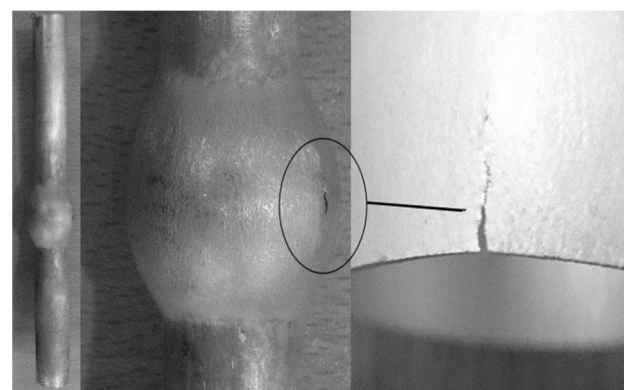


Fig. 13 The least amount of crack line at 580°C

شکل 13 کمترین میزان طول خط ترک در 580°C

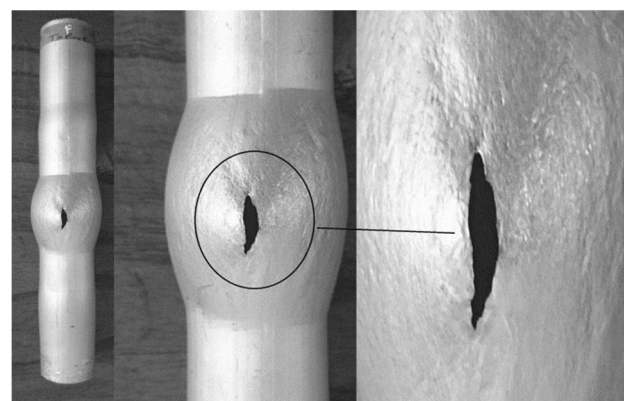


Fig. 14 The amount of crack line at 600°C

شکل 14 میزان طول خط ترک در 600°C

4-2- اثر دما بر تنش سیلان ماده

جهت بررسی خواص ماده از آزمون چند- برآمدگی استفاده شده است. ویژگی آزمون چند- برآمدگی به گونه‌ای است که، تنش سیلان به‌دست آمده از این آزمون به دلیل شرایط تنش دو محوره آن در مقایسه با شرایط تنش یک محوره در آزمون کشش داغ، به تنشی که در حالت واقعی در این فرآیند رخ می‌دهد بسیار نزدیک است. شکل 15 نمونه‌های آزمون چند- برآمدگی را در محدوده دمایی 530°C - 580°C نشان می‌دهد. در شکل 15 منحنی لگاریتمی تنش سیلان به‌دست‌آمده برای محدوده دمایی 530°C - 580°C برحسب لگاریتم نرخ کرنش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما تنش جریان ماده کاهش یافته که این امر موجب کاهش فشار در فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز می‌شود که در شکل 9 نشان داده شده است، همچنین

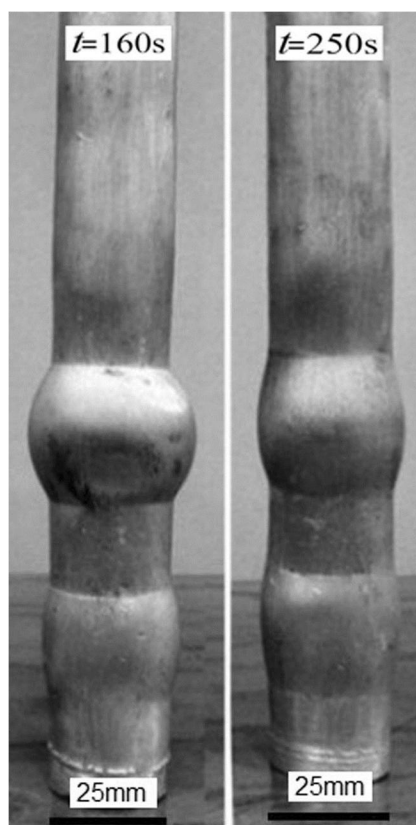


Fig. 19 The effect of pressure time on the bulge height at 580°C
شکل 19 اثر زمان اعمال فشار بر ارتفاع برآمدگی در دمای 580°C

ترکیدی لوله شده است، اما در فشار 5 بار با وجود زمان شکل‌دهی بیشتر تا 270 ثانیه نمونه سالم به‌دست آمده است. این نشان می‌دهد که در فرایند شکل‌دهی داغ با دمش گاز کنترل فشار گاز نقش بسیار مهمی در تغییر شکل قطعه ایفا می‌کند و به‌دست آوردن پنجره شکل‌دهی در این فرایند از اهمیت بالایی برخوردار است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص مکانیکی و تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز لوله آلایز آلومینیوم 6063 با استفاده از آزمون برآمدگی آزاد و آزمون چند- برآمدگی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که:

1- با افزایش دما استحکام ماده کاهش پیدا کرده و با نیروی کمتری می‌توان به شکل مورد نظر در فرآیند شکل‌دهی داغ با گاز رسید.

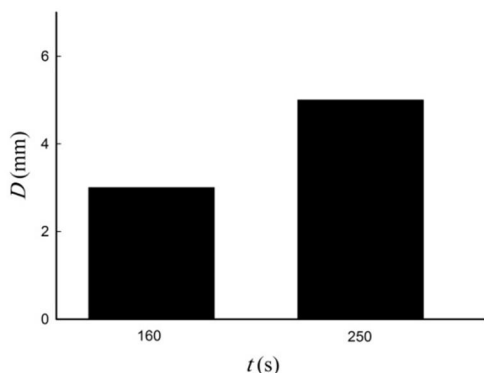


Fig. 20 The effect of time pressure on the bulge height
شکل 20 تأثیر زمان اعمال فشار بر ارتفاع برآمدگی

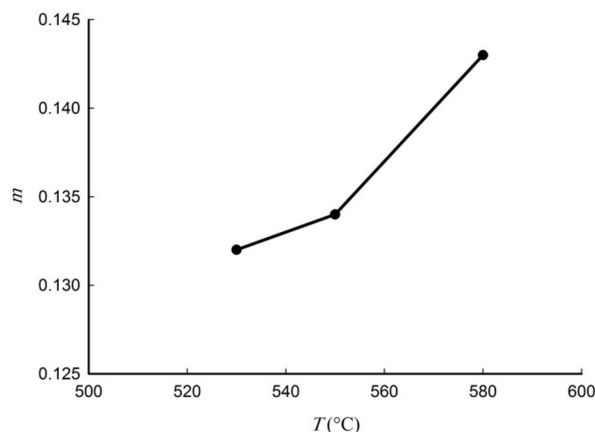


Fig. 17 The effect of temperature on the strain rate sensitivity coefficient m

شکل 17 اثر دما بر ضریب حساسیت به نرخ کرنش m

18 مشاهده می‌شود که با افزایش دما مقدار میانگین k کاهش یافته و از مقدار حدود 18.2 MPa در دمای 530°C به حدود 13.2 MPa در دمای 580°C می‌رسد؛ بنابراین با افزایش دما مقدار تنش سیلان ماده و به تبع آن فشار شکل‌دهی کاهش یافته است.

4-4- اثر زمان و مقدار فشار بر ارتفاع برآمدگی

شکل 19 دو نمونه از آزمون چند- برآمدگی لوله را در دمای 580°C با فشار یکسان 5.5 بار در زمان‌های 160 و 250 ثانیه نشان می‌دهد. در شکل 20 مقدار قطر نهایی لوله در دو زمان یادشده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان شکل‌دهی با وجود ثابت بودن مقدار فشار و دما، تغییر شکل پلاستیک ادامه می‌یابد. این موضوع از تفاوت‌های اصلی فرایند شکل‌دهی داغ با دمش گاز با فرایندهای مشابه هم‌چون فرایند هیدروفرمینگ است. دلیل این امر ناشی از رفتار ویسکوپلاستیک ماده در دمای بالاست. در شکل 21 تأثیر میزان فشار اعمالی بر ارتفاع برآمدگی در آزمون چند- برآمدگی لوله برای دمای 580°C نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در فشار 4.5 بار در زمان 150 ثانیه تغییر شکل قابل توجه‌ای آغاز نشده است. در این فشار برای انجام تغییر شکل نیاز به زمان‌های بسیار زیاد است که در عمل معقول نیست؛ بنابراین در این فرایند برای آغاز تغییر شکل یک کمینه فشار ضروری است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که فشار 6 بار در زمان 150 ثانیه منجر به

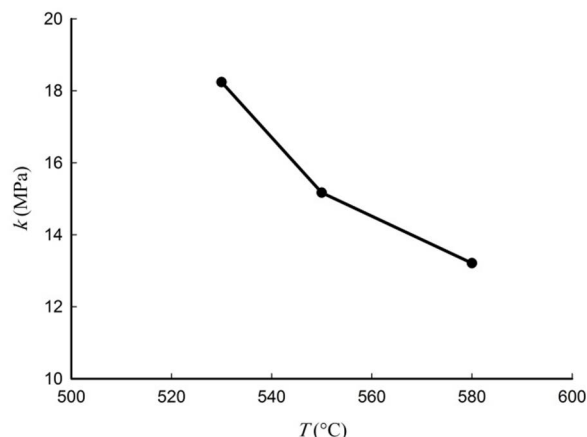


Fig. 18 The effect of temperature on the strength constant k

شکل 18 تأثیر دما بر ثابت استحکام k

مکانیک ساخت و تولید دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل در انجام آزمون آزمایشگاهی تشکر نمایم.

7- مراجع

- [1] H. Ch, Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming, *Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, pp. 383-392, 2005.
- [2] B. Dykstra, Hot Metal Gas Forming- The Next Generation Process for Manufacturing Vehicle Structural Components, *SAE International Body Engineering Conference*, Detroit, Michigan, USA, 2001.
- [3] S. Novtnyt, M. Geiger, Process design for hydroforming of light metal sheets at elevated temperatures, *Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1-3, pp. 594-599, 2003.
- [4] M. Koc, T. Altan, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *Machine Tools Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 123-138, 2002.
- [5] L. Yan-li, H. Zhu-bin, Y. Shi-jian, W. Jia, Formability determination of AZ31B tube for IHPF process at elevated temperature, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 4, pp. 851-856, 2011.
- [6] H. Zhu-bin, F. Xiao-bo, S. Fei, Z. Kai-lun, W. Zhi-biao, Y. Shi-jian, Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal gas forming at elevated temperature, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, pp. 364-369, 2012.
- [7] Y. Shi-jian, Q. Jun, H. Zhu-bin, An experimental investigation into the formability of hydroforming 5A02 Al-tubes at elevated temperature, *Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 680-683, 2006.
- [8] Z. He, S. Yuan, G. Liu, J. Wu, W. Cha, Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 6-7, pp. 877-884, 2010.
- [9] T. Zribi, A. Khalfallah, H. BelHadjSalah, Experimental characterization and inverse constitutive parameters identification of tubular materials for tube hydroforming process *Materials Materials Design*, Vol. 49, No. 1, pp. 866-877, 2013.
- [10] S. J. Hashemi, H. M. Naeini, G. L. , Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 201-211, 2014. (in Persian)
- [11] S. Hashemi, H. Naeini, G. Liaghat, R. Tafti, F. Rahmani, Forming limit diagram of aluminum AA6063 tubes at high temperatures by bulge tests, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 11, pp. 4745-4752, 2014.
- [12] M. Yoshizawa, H. Ohsawa, Evaluation of strain-rate sensitivity in superplastic compressive deformation, *Materials Processing Technology*, Vol. 68, No. 3, pp. 206-214, 1997.
- [13] M. S. Zoei, M. Farzin, A. H. Mohammadi, Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 49-56, 2011. (in Persian)
- [14] A. El-Morsy, N. Akkus, K. Manabe, H. Nishimura, Evaluation of superplastic characteristics of tubular materials by multi-tube bulge test, *Materials Letters*, Vol. 60, No. 4, pp. 559-564, 2006.
- [15] J.-H. Cheng, The determination of material parameters from superplastic inflation tests, *Materials Processing Technology*, Vol. 58, No. 2-3, pp. 233-246, 1996.
- [16] Z.-b. He, B.-g. Teng, C.-y. Che, Z.-b. Wang, K.-l. Zheng, S.-j. Yuan, Mechanical properties and formability of TA2 extruded tube for hot metal gas forming at elevated temperature, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, pp. 479-484, 2012.
- [17] T. Maeno, K.-i. Mori, K. Fujimoto, Hot gas bulging of sealed aluminium alloy tube using resistance heating, *Materials Manufacturing Rev*, Vol. 1, No. 5, pp. 1-7, 2014.
- [18] A. Assempour, M. Ganjani, Implementation of a robust algorithm for prediction of Forming limit diagrams, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6, 2008.
- [19] S. J. Hosseini, An investigation into hot deformation and dynamic recrystallization of aluminum alloy 5083, *School of Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 15-26, 2008. (in Persian)



Fig. 21 The effect of pressure on the bulge height at 580°C

شکل 21 اثر میزان اعمال فشار بر ارتفاع برآمدگی در دمای 580°C

2- فشار ترک با افزایش درجه حرارت از 1.9 مگاپاسکال در دمای 430°C به 0.6 مگاپاسکال در دمای 600°C کاهش پیدا می‌کند و در محدوده دمایی 530°C - 580°C کاهش طول خط ترک مشاهده می‌شود.

3- بیشینه نسبت انبساط در ابتدا با افزایش دما از 430°C در حال افزایش است، و بیشترین نسبت انبساط 58% در دمای 580°C است، سپس کاهش یافته و به مقدار 52% در دمای 600°C می‌رسد که در این دما دوباره طول خط ترک افزایش می‌یابد.

4- با افزایش دما ضریب استحکام کاهش یافته و از حدود 18.2 MPa در دمای 530°C به مقدار 13.2 MPa در دمای 580°C می‌رسد، همچنین با افزایش دما ضریب حساسیت به نرخ کرنش افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود در حدود 0.143 در دمای 580 °C می‌رسد.

5- با افزایش زمان در یک فشار اعمالی ثابت، ارتفاع برآمدگی افزایش می‌یابد که ناشی از رفتار ویسکوپلاستیک ماده در دمای بالاست.

6- فشار گاز اعمالی به لوله نقش بسیار مهمی در شکل‌پذیری قطعه در فرآیند شکل‌دهی با دمش گاز ایفا می‌کند. اگر فشار گاز اعمالی به لوله بیش از حد باشد سبب ترکیدگی در قطعه نهایی شده و از سویی اگر فشار گاز اعمالی کم باشد، لوله شکل نمی‌گیرد.

7- محدوده دمایی مناسب در فرآیند شکل‌دهی داغ لوله آلایز آلومینیوم 6063 در این پژوهش در محدوده 530°C - 580°C بوده که نسبت انبساط در این محدوده در حال افزایش و خط ترک در حال کاهش است.

6- تقدیر و تشکر

در پایان لازم است که از همکاری مصطفی رجایی دانشجوی دکتری مهندسی