



Study of Effect of Temperature on Forming Diameter and Thinning in Warm Incremental Forming of Aluminum Tubes

Seyed Jalal Hashemia^{1*}, Farzad Rahmani², Seyed MohammadHossein Seyedkashi³

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran.

³Professor, Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shokatabad Campus, University of Birjand, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.18.2023

Revised: 04.19.2023

Accepted: 06.11.2023

Keyword:

Incremental Forming
Ductile Fracture Criterion
Forming Diameter

***Corresponding Author:**

Seyed Jalal Hashemia

Email: j_hashemi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Incremental forming process has the ability to make sheet parts with different cross-sections and sizes using simple and cheap forming tools. Using this process, it is possible to produce tubular sections, which are usually formed by hydroforming process. In this paper, the incremental forming of aluminum tubes with axisymmetric cross-section was investigated. A forming die setup was designed and manufactured to create symmetrical bulge on aluminum tubes, and the movement of the forming punch was performed by a CNC milling machine. In order to increase the formability of material, temperature of the tube was increased to a maximum of 300 degrees Celsius and the diameter of the formed part studied. Simulation of process was carried out using Abaqus software and ductile fracture criteria was used to find maximum formability. The results showed that the normalized Cockcroft-Latham criterion can be used with a small error to predict the maximum forming diameter. By increasing the process temperature from 100 to 200 °C, the forming diameter increased by 4%. The greatest effect of the forming step was observed at 300 °C, and with the increase of the step from 0.5 to 1.5 mm, the forming diameter decreased by 3.7%. The fracture section of the tubes was also examined by scanning electron microscope (SEM).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A type of sheet metal forming process in which only a small part of the product is formed at any time is called incremental sheet forming. Incremental forming is a flexible method for making products from metal sheets that does not require a special punch or die for forming. In this method, a blank sheet is held firmly by a simple holding die, and the final shape of the part is obtained by relative displacements of a tool with the help of a computer numerical control device. Today, tubular parts are widely used in various industries such as automotive and aerospace. Tubular parts with variable cross section are usually formed by hydroforming process. Axisymmetric bulge is one of the sections that can be formed by the hydroforming process. Production of axisymmetric cross-section using hydroforming process, in addition to the high cost of die, also faces other problems such as the need for high pressure of forming fluid, tools for die closing and sealing equipment. In this paper, the effect of important forming parameters of aluminum tubes on ductility in the incremental forming process was investigated. The cross-section of the part is axisymmetric bulge, and the forming tool moves inside the tube and by contacting the inner surface of the tube, it gradually undergoes plastic deformation. In order to predict tube failure and determine the forming limit, four ductile fracture criteria were used in the simulation, and the failure surface of the samples was also studied by scanning electron microscope (SEM).

Methodology

In this paper, AA6063 alloy aluminum tubes with an outer diameter of 40 mm and a thickness of 1.5 mm were used. The experimental setup is shown in Figure 1. The connection of the upper and lower dies was carried out using three bolts and the whole forming assembly was closed with a strap clamp on the table of the CNC milling machine. In order to increase the temperature of the tube during forming, a heating element in the form of a belt is used and the temperature of the tube is kept constant during the forming process by a temperature controller. During forming process, no lubrication was used and the type of fit between the tube and the dies was transition. The movement of the forming tool inside the tube was spiral with a specific pitch and depth. At the beginning of the process, the forming tool enters the tube from above and the tip of the tool is placed in a position where the outer surface of the tube is free and not in contact with the die. After the tool touches the outer surface of the tube, the first pass of forming begins. At the beginning of the first pass of forming, the tool moves to a predetermined value in the radial direction and changes the shape of the pipe. This amount of radial penetration is called the forming depth.

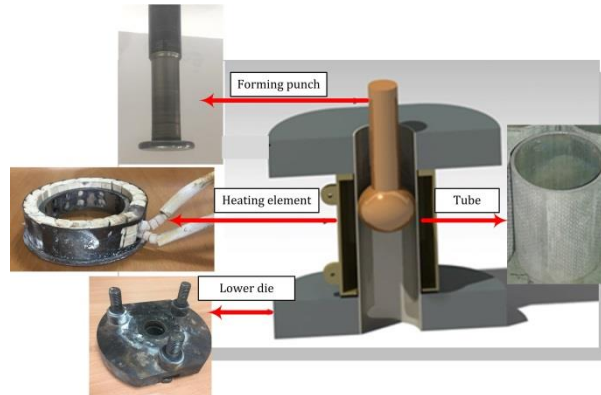


Figure 1. Experimental setup.

Abaqus software was used to simulate the forming process and application of ductile fracture criteria. The aluminum tube was considered as a three-dimensional deformable part and the dies were considered as rigid surfaces. The S4R element was used for the meshing of the pipe.

Results and discussion

After running the simulation for different forming speed, temperature, forming step and radius, the rupture time and location were determined using seven selected failure criteria. This prediction was displayed with the contour on different points of the pipe, and reaching the prediction value to an indicator of the probability of failure according to the desired criterion. Figure 5 shows the fracture prediction contour by the normal Cockroft-Latham criterion under a constant forming speed of 800 mm/min, a forming depth of 1 mm and a temperature of 200 °C.

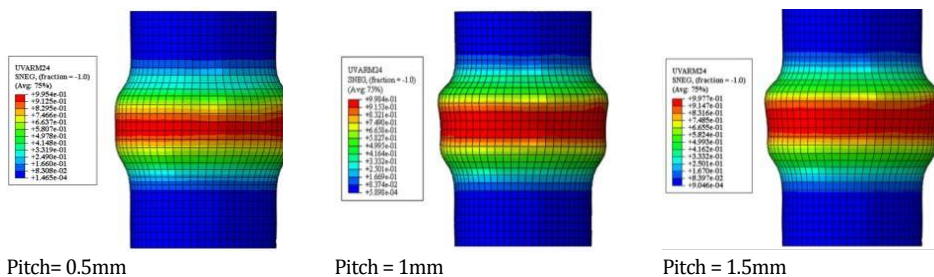


Figure 2. Effect of forming pitch on the prediction of Cockroft-Latham.

The samples of warm incremental forming produced at temperatures of 300 °C with different forming pitches, different forming depths and constant linear speed of 800 rpm are shown in Figure 3. Due to the higher stress in the radial direction of the tube, fracture is always in the hoop direction, and also the beginning of the fracture is from the uppermost point of forming area or the beginning of the movement of the punch in each stage and

contact with the tube. This issue shows the creation of the greatest elongation and tensile stress in the area of the upper and lower radius. The friction of the tube wall with the upper and lower dies prevents the flow of material into the forming area where the tube is not in contact with the dies. As a result, at the time of applying the forming depth at the beginning of each forming feed, a large longitudinal tensile stress was generated in the contact area of the tool where more thinning occurred. The phenomenon of material not flowing to the forming area increases at high temperatures because the coefficient of friction and adhesion of the tube to the dies also increases at high temperatures.

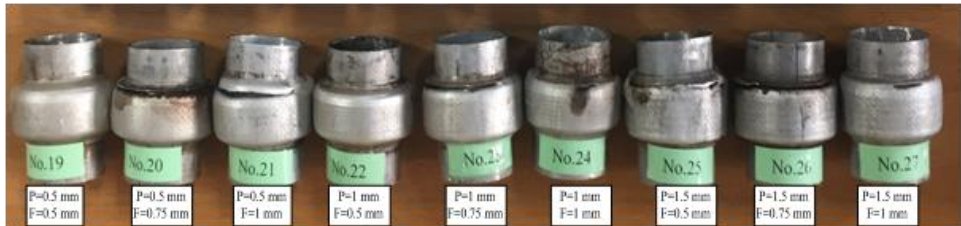


Figure 2. Effect of forming pitch on the prediction of Cockcroft-Latham.

Conclusion

In this paper, incremental forming of AA6063 aluminum tubes was studied at temperatures of 100 °C, 200 °C and 300 °C. The formed section was axisymmetric and the failure of the samples was predicted by the ductile fracture criteria in the simulation. The results showed that with increasing temperature, the diameter of the samples increased; but, in all samples, the beginning of failure occurred at the corner of the bulge area. On average, the diameter formed at 300 °C increased by approximately 4% compared to 100 °C. By increasing the forming depth and forming pitch at all temperatures, the formability decreased and the maximum of forming diameter decreased. A comparison of the experimental and numerical results showed that the normalized Cockcroft-Latham criterion has the best prediction for the maximum diameter. Examining the fracture cross-section of the samples illustrated that there is a fracture zone under pure shear at the fracture edge, which increases in width as the temperature increases.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



مطالعه اثر دما بر قطر شکل‌دهی و نازک‌شدگی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم لوله‌های آلومینیومی

سیدجلال هاشمی^{۱*}، فرزاد رحمانی^۲، سیدمحمدحسین سیدکاشی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

فرآیند شکل‌دهی تدریجی توانایی ساخت قطعات ورقی با مقطع و سایزهای مختلف با استفاده از ابزارهای شکل‌دهی ساده و ارزان را دارا می‌باشد. با استفاده از این فرآیند می‌توان مقاطع لوله‌ای را تولید کرد که معمولاً برای شکل دادن آنها با فرآیند هیدروفرمینگ انجام می‌شود. در این مقاله، شکل‌دهی تدریجی لوله‌های آلومینیومی با مقطع متقارن-محوری بررسی شده است. یک مجموعه قالب شکل‌دهی برای ایجاد بالچ متقارن روی لوله‌های آلومینیومی طراحی و ساخته شده و کنترل حرکت سنبه شکل‌دهی توسط کنگی ماشین فرز با روش عددی انجام شده است. به منظور افزایش شکل‌پذیری ماده، دمای لوله تا حداکثر ۳۰۰ درجه افزایش داده شده و قطر قطعه شکل داده شده مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی فرآیند نیز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده و از معیارهای شکست نرم برای پیش‌بینی حداکثر شکل‌پذیری بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که معیار کوکرافت-لاتهام نرمال شده می‌تواند با خطای کمی برای پیش‌بینی حداکثر قطر شکل‌دهی مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش دمای فرآیند از ۱۰۰ به ۲۰۰ درجه قطر شکل‌دهی ۰.۴٪ بیشتر شده است. بیشترین اثر گام شکل‌دهی در دمای ۳۰۰ درجه مشاهده شده که با افزایش گام از ۰/۵ به ۱/۵ میلی‌متر، قطر شکل‌دهی ۳/۷٪ کاهش یافته است. مقطع شکست لوله‌ها نیز توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفته است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

کلید واژگان:

شکل‌دهی تدریجی
معیار شکست نرم
قطر شکل‌دهی

*نویسنده مسئول: سیدجلال هاشمی

پست الکترونیکی:

J_hashemi@tvu.ac.ir



مقدمه

در سال‌های اخیر، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل افزایش نسبت استحکام به وزن قطعات و همچنین مقاومت در خوردگی بالا در صنعت خودرو مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. این آلیاژها می‌توانند وزن خودرو را تا ۳۰ درصد کاهش داده و مصرف سوخت را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. به دلیل وجود عناصر آلیاژی و همچنین ساختار هگزگونال منیزیم، شکل‌پذیری آنها در دمای اتاق پایین می‌باشد. این در حالی است که با بالا بردن دمای فرآیند می‌توان شکل‌پذیری این آلیاژها را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش داد [۲].

از آنجا که در صنعت خودرو کاهش زمان و تعداد مراحل تولید از اهمیت بالایی برخوردار است، روش‌های مختلف شکل‌دهی لوله برای تولید قطعات پیچیده و یکپارچه جزء فرآیندهای مهم شکل‌دهی مورد استفاده در صنعت می‌باشد. برای شکل‌دهی مقاطع لوله‌ای شکل با سطح مقطع متغیر معمولاً از فرآیند هیدروفورمینگ استفاده می‌شود که در آن فشار یک سیال به سطح داخلی لوله باعث تغییر شکل پلاستیک مطابق با شکل قالب خواهد شد. با توجه به کاربرد روزافزون فرآیند هیدروفورمینگ در صنعت خودرو، ارائه یک روش شکل‌دهی جدید که مشکلاتی از قبیل ساخت قالب و سیستم هیدرولیکی پیشرفته را دارا نباشد جزء نیازهای اساسی صنعت است [۳].

نوعی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی که در آن در هر لحظه فقط بخش کوچکی از محصول شکل‌دهی می‌شوند، شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی نامیده می‌شود. شکل‌دهی تدریجی یک روش انعطاف‌پذیر برای ساخت محصولات از ورق‌های فلزی است که به پنج یا قالب مخصوص برای شکل‌دهی احتیاج ندارد. در این روش ورق اولیه به وسیله یک قالب نگهدارنده ساده، محکم نگه داشته شده و شکل نهایی قطعه، با جابه‌جایی‌های نسبی یک ابزار به کمک دستگاه کنترل عددی رایانه‌ای به دست می‌آید. بنابراین نیاز به دستگاهی است تا بتواند حداقل در سه راستای دستگاه کارترین (محورهای نرمال ZYX) قابلیت جابجایی داشته و شکل‌های سه بعدی را تولید نماید. به این دلیل به سراغ ماشین‌های کنترل عددی رفته و از ویژگی مهم آنها یعنی کنترل‌پذیر بودنشان استفاده می‌شود. به عبارت دیگر با قرار دادن ابزار مخصوص شکل‌دهی در داخل اسپیندل دستگاه فرز CNC، علاوه بر دوران آن با سرعت بالا حول محور عمودی، می‌توان به کمک برنامه‌نویسی‌های متنوع در کنترلر دستگاه، ابزار را بر روی هر مسیر دلخواه به حرکت در آورده و بر اساس نیاز، شکل‌های متفاوتی را در ورق ایجاد نمود. لازم به ذکر است که استفاده از ربات‌های صنعتی نیز در این زمینه قابلیت‌های زیادی را در اختیار قرار می‌دهد که بر این اساس تعدادی از محققان این رشته در تازه‌ترین تلاش‌های خود، به دنبال به‌کارگیری این تجهیزات در فرآیندهای شکل‌دهی هستند [۴].

امروزه قطعات لوله‌ای کاربرد زیادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی و هوافضا دارند. قطعات لوله‌ای با سطح مقطع متغیر معمولاً با فرآیند هیدروفورمینگ شکل داده می‌شوند. بالچ متقارن محوری یکی از مقاطع قابل شکل دادن با فرآیند هیدروفورمینگ می‌باشد. کورکولیس و کایریاکایدس [۵] تحلیل تغییر شکل لوله‌ها را در بالچ متقارن محوری با در نظر گرفتن اثر ناهمسانگردی مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از نتایج تجربی توابع تسلیم ناهمسانگرد را کالیبره کردند. چو و ژو [۶] رابطه ریاضی را برای پیش‌بینی گلوبی شدن و جلوگیری از پارگی در هیدروفورمینگ این مقطع توسعه دادند. آنها همچنین عیوب کمانش و چروکیدگی را بررسی کرده و نشان دادند کمانش معمولاً برای لوله‌ها بلند و با ضخامت کم رخ می‌دهد. ایشان در مطالعه دیگری [۷]، پنجره فرآیند هیدروفورمینگ بالچ متقارن محوری را توسعه داده که محدوده انتخاب فشار داخلی و نیروی محوری مناسب برای شکل‌دهی بدون ایجاد پارگی و چروکیدگی را تصویر می‌کند. سیدکاشی و همکارانش [۸] اثر ابعاد لوله اولیه را بر منحنی بارگذاری مورد نیاز برای بالچ متقارن محوری لوله‌های بررسی کرده و با استفاده از روش بهینه‌سازی بازبخت شبیه‌سازی شده، مناسب‌ترین منحنی بارگذاری را محاسبه کردند. در سال‌های اخیر هیدروفورمینگ مقطع بالچ متقارن محوری در دمای بالا نیز مورد بررسی قرار گرفته است. هاشمی و همکارانش [۹] اثر دما را بر روی توزیع ضخامت محصول نهایی در فرآیند هیدروفورمینگ بررسی کرده و نشان دادند که می‌توان با افزایش دما نازک‌شدگی را کاهش داد. سیدکاشی و همکارانش در پژوهش دیگری [۱۰] منحنی بارگذاری

مورد نیاز برای بالچ متقارن لوله‌های آلومینیومی AA۶۰۶۱ در دمای بالا را بهینه کردند. نتایج آنها نشان داد با انتخاب مناسب منحنی بارگذاری نسبت انبساط در دمای ۳۰۰ درجه حدود ۳۶٪ افزایش می‌یابد. تولید مقطع متقارن محوری با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ علاوه بر داشتن هزینه بالایی ساخت قالب با مشکلات دیگری از قبیل نیاز به فشار بالایی سیال شکل‌دهی، تجهیزات بستن قالب و آب‌بندی نیز روبرو می‌باشد.

تا به حال تحقیقات اندکی بر روی شکل‌دهی تدریجی لوله‌ها انجام شده است. رحمنی و همکارانش [۱۱] شکل‌دهی تدریجی لوله‌های از جنس مس را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و مقطع گرد لوله را به مقطع مربعی تبدیل کردند. پروین و گورا [۱۲] با استفاده از شکل‌دهی تدریجی و به صورت تجربی، ایجاد شیار بر روی سطح خارجی لوله و فلنج در انتهای لوله را به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. آقابیگی و همکارانش [۱۳] تغییر شکل انتهای لوله را به مقاطع مختلف از جمله مقطع بیضی و مربعی روی لوله‌های تیتانیومی بررسی کردند. آنها برای افزایش شکل‌پذیری از دمای بالا در فرآیند شکل‌دهی استفاده کرده و نشان دادند در دمای بالا به زاویه دیواره بیشتری می‌توان دست یافت. لی و همکارانش [۱۴] با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، یک هندسه جدید برای سر کروی ابزار شکل‌دهی برای تولید فلنج روی لوله‌ها با فرآیند شکل‌دهی تدریجی با ابزار چرخان طراحی کردند. رحمنی و همکارانش [۱۵] به صورت تجربی و براساس طراحی آزمایش به روش فول فاکتوریل، اثر پارامترهای مختلف را بر شکل‌دهی گرم لوله‌های آلومینیومی به وسیله فرآیند شکل‌دهی تدریجی مورد بررسی قرار دادند. آنها اثر دما، سرعت شکل‌دهی و گام شکل‌دهی را بر طول قطعه نهایی، قطر شکل داده شده و زبری داخل قطعه تعیین کردند. هو و همکارانش [۱۶] مدلی را برای محاسبه نیروهای محوری، شعاعی و مماسی وارد شده بر ابزار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی فلنج روی لوله‌ها توسعه داده و اعداد محاسبه شده توسط مدل را با نتایج تجربی و عددی مورد مقایسه قرار دادند. عیسی‌پور و همکارانش [۱۷] با استفاده روش طراحی آزمایش روبه‌پاسخ و نتایج تجربی اثر پارامترهای مختلف فرآیندی را بر اثر هندسه نهایی فلنج ایجاد شده روی انتهای لوله‌های فولادی زنگ نزن مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این تحقیق، گام عمودی ابزار بیشترین اثر را بر قطر نهایی فلنج دارد. موحدی‌نیا و همکارانش [۱۸] شکل‌دهی مقطع مربعی را با استفاده از یک ابزار چرخان و به صورت تدریجی در انتهای لوله‌های آلومینیومی انجام داده و اثر پارامترهای فرآیندی را بر توزیع ضخامت و هندسه محصول بررسی کردند.

در شکل‌دهی فلزات معمولاً تغییر شکل‌های بزرگ مشاهده می‌شود و شکل‌پذیری به‌وسیله شکست نرم محدود می‌گردد. در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از پژوهشگرها تلاش زیادی برای ارتباط دادن کرنش شکست فلز به متغیرهای ماکروسکوپی وابسته به ماده، فرآیند یا هر دو انجام داده‌اند. تعدادی معیار شکست نرم براساس دو رویه پیشنهاد شده‌اند. روبه‌اول براساس تشکیل حفره‌ها در کنار ذرات، رشد حفره و به هم پیوستن حفره‌ها می‌باشد که معیارهای براساس مدل رشد ترک نامیده می‌شوند. روبه‌دوم براساس قوانین تجربی یا نیمه تجربی می‌باشد که بدون هیچگونه پشتوانه فیزیکی یا تحلیلی پیشنهاد شده‌اند [۱۹]. تعداد زیادی از معیارهای ساده شکل‌گیری ترک توسط تحقیقات بر روی شکل‌دهی حجمی ارائه شده‌اند. این معیارها براساس مشاهده، تجربه، و ریاضیات ساده می‌باشند. معیارهای تجربی بر روی گستره وسیعی از حالت‌های تنش به کار رفته‌اند. بر طبق این معیارها، شکست زمانی رخ می‌دهد که در یک نقطه از ماده مقدار تابع عددی زیر برابر با مقدار بحرانی C شود (معادله ۱) [۲۰].

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g(\sigma_{ij}) d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

در رابطه بالا g تابع وزن است که معمولاً بر حسب اجزای تانسور تنش σ_{ij} است. $\bar{\epsilon}_f$ کرنش مؤثر و $\bar{\epsilon}$ کرنش مؤثر در لحظه شکست و C ثابت می‌باشند [۲۰].

یکی از مشکلات اساسی در شکل دهی لوله‌ها در فرآیندهای شکل دهی به خصوص فرآیند هیدروفورمینگ و شکل دهی تدریجی، مشخص نبودن حد شکل دهی و حداکثر قطر ممکن قابل دستیابی می‌باشد. با توجه به ماهیت پیچیده تغییر شکل در فرآیند شکل دهی تدریجی ایجاد یک معیار جامع برای پیش‌بینی پارگی و حداکثر قطر شکل دهی بسیار مشکل است. معیارهای شکست نرم توسعه یافته در پژوهش‌های پیشین می‌توانند برای تعیین محل شروع پارگی در شکل دهی لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این معیارها معمولاً اثر دما و نرخ کرنش را در پیش‌بینی شکست در نظر نگرفته‌اند که با استفاده از پارامتر زن-هولومن می‌توان این اثر را نیز در پیش‌بینی اضافه کرد. در این مقاله اثر پارامترهای مهم شکل دهی لوله‌های آلومینیومی بر شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی بررسی و از چند معیار شکست نرم برای پیش‌بینی حداکثر قطر شکل دهی ممکن استفاده شده است. تأثیر دما و نرخ کرنش نیز در معیارهای شکست وارد شده است. مقطع مورد مطالعه به حالت بالچ متقارن می‌باشد و ابزار شکل دهی در داخل لوله حرکت کرده و با تماس با سطح داخلی لوله به صورت تدریجی آن را دچار تغییر شکل پلاستیک می‌کند. در جهت پیش‌بینی شکست لوله و تعیین حد شکل دهی از چهار معیار شکست نرم در شبیه‌سازی استفاده شده و سطح شکست نمونه‌ها نیز با میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

بخش تجربی

در این مقاله از لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA۶۰۶۳ با قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر که دارای ضخامت ۱/۵ میلی‌متر بوده استفاده شده است. لوله‌ها با فرآیند اکستروژن تولید شده است و کاملاً بدون درز می‌باشند. آزمایش کشش در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف بر روی نمونه‌های تهیه شده از لوله در راستای طولی انجام شده و مقدار توابع کرنش و کار شکست برای کالیبراسیون چهار معیار شکست نرم کوکرافت-لاتهام و بروزو، کوکرافت-لاتهام نرمال و آبادا محاسبه شده‌اند (به ترتیب معادلات ۱ تا ۴). نتایج آزمایش کشش و روش کالیبراسیون معیارها در مرجع [۲۱] آورده شده است. در معادلات ۲ تا ۵، $\bar{\epsilon}_f(\dot{\epsilon}, T)$ نشان‌دهنده تابع کرنش شکست و $W_f(\bar{\epsilon}, T)$ نشان‌دهنده کار شکست در آزمایش کشش می‌باشند. T و $\dot{\epsilon}$ به ترتیب نشانگر دما و نرخ کرنش در آزمایش کشش هستند.

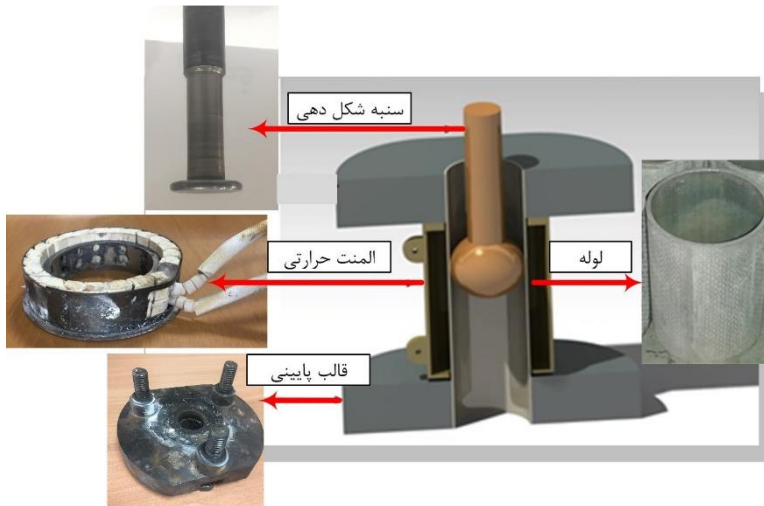
$$F_1 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T)}{W_f(\dot{\epsilon}, T)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (۲)$$

$$F_2 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma^*}{3(\sigma^* - \sigma_m) \times \bar{\epsilon}_f(\dot{\epsilon}, T)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (۳)$$

$$F_3 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}}}{\bar{\epsilon}_f(\dot{\epsilon}, T)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (۴)$$

$$F_4 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{3\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}}{\bar{\epsilon}_f(\dot{\epsilon}^*, T^*)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (۵)$$

مجموعه قالب و ابزار شکل‌دهی در شکل ۱ نمایش داده شده است. اتصال قالب بالایی و پایینی به کمک سه پیچ انجام شده و کل مجموعه شکل‌دهی با روپند روی میز ماشین فرز CNC بسته شده است. به منظور افزایش دمای لوله در زمان شکل‌دهی، از یک المنت حرارتی به شکل کمر بند استفاده شده و دمای لوله در طول فرآیند شکل‌دهی به وسیله یک کنترلر دما ثابت نگه داشته شده است. در زمان شکل‌دهی از هیچ روانکاری استفاده نشده و انطباق بین لوله و قالب‌ها به صورت روان بوده است.



شکل ۱. مجموعه شکل‌دهی تدریجی لوله در دمای بالا.

حرکت ابزار شکل‌دهی در داخل لوله به صورت مارپیچ با گام^۱ و عمق مشخص بوده است. در ابتدای فرآیند ابزار شکل‌دهی از بالا وارد لوله می‌شود و نوک ابزار در موقعیتی قرار می‌گیرد که سطح خارجی لوله آزاد بوده و با قالب در تماس نباشد. پس از تماس شدن ابزار به سطح خارجی لوله، پاس اول شکل‌دهی آغاز می‌شود. در ابتدای پاس اول شکل‌دهی، ابزار به مقدار از پیش تعیین شده در راستای شعاعی حرکت کرده و باعث تغییر شکل لوله می‌شود. این مقدار نفوذ شعاعی، عمق شکل‌دهی^۲ نامیده می‌شود. محور طولی ابزار در زمان شکل‌دهی همیشه موازی محور لوله باقی می‌ماند. به منظور شکل‌دهی متقارن در تمام طول آزاد لوله، بعد از نفوذ شعاعی، ابزار شکل‌دهی شروع به حرکت مارپیچ در جهت طولی لوله می‌کند و در نتیجه تمام بخش آزاد لوله که در بین دو قالب بالا و پایین قرار گرفته است دچار انقباض خواهد شد. سرعت حرکت خطی ابزار در طول مسیر مارپیچ ثابت می‌باشد. شکل‌دهی لوله‌ها در دماهای مختلف تا ایجاد پارگی ادامه یافته است.

شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی تدریجی لوله

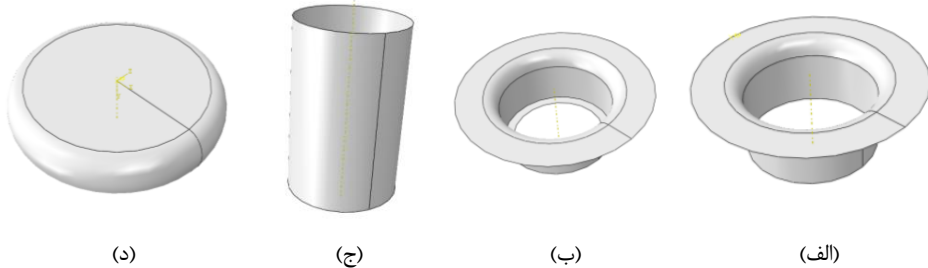
به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی و استفاده از معیارهای شکست نرم از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس^۳ استفاده شده است. لوله آلومینیومی به صورت جسم شکل‌پذیر و سه بعدی و قالب‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده است. برای مش‌بندی لوله از از المان S4R بهره گرفته شده است. اجزای مدل شبیه‌سازی به صورت جداگانه در شکل ۲ نشان

¹ Pitch

² Forming Depth

³ Abaqus

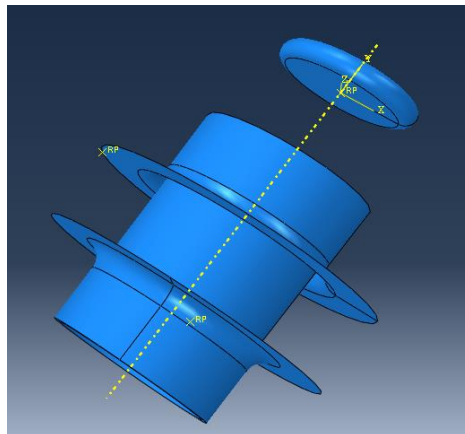
داده شده است. مدل شبیه‌سازی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. معیارهای شکست نرم معرفی شده در بخش قبل، به کمک یک زیربرنامه برای پیش‌بینی شکست در نرم افزار آباکوس تعریف شده‌اند. مقدار پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲. (الف) قالب بالایی (ب) قالب پایینی (ج) لوله (د) ابزار شکل‌دهی.

جدول ۱. مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی.

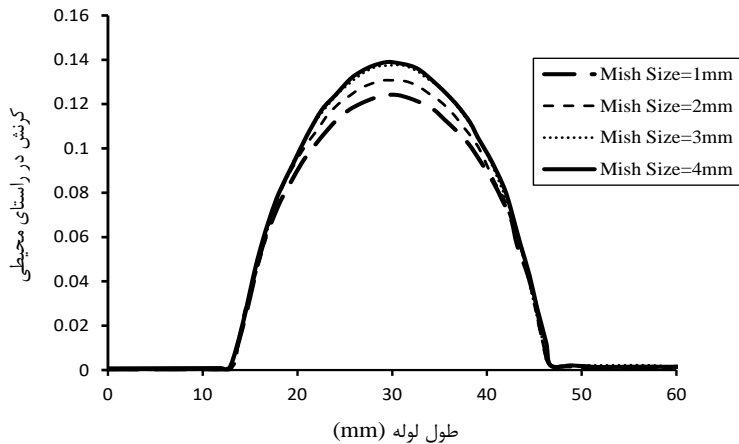
پارامتر	یکا	مقدار
قطر اولیه لوله	mm	۴۰
ضخامت اولیه لوله	mm	۱/۵
ضریب اصطکاک	-	۰/۱
دمای لوله	°C	۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰
مدول یانگ لوله	GPa	۷۰
ضریب پواسون	-	۰/۳



شکل ۳. مدل شبیه‌سازی در آباکوس.

۱۲۰۰ المان چهار گرهی نوع S4RT با یک نقطه انتگرال‌گیری روی سطح لوله ایجاد شد. این نوع المان پوسته‌ای برای آنالیز تغییر شکل‌های کوپل ترمومکانیکی مناسب می‌باشد. برای انتخاب بهترین اندازه المان، شبیه‌سازی با اندازه‌های مختلف انجام شد و مقدار کرنش محیطی در مسیری از ابتدا تا انتهای لوله مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ نتایج به‌دست

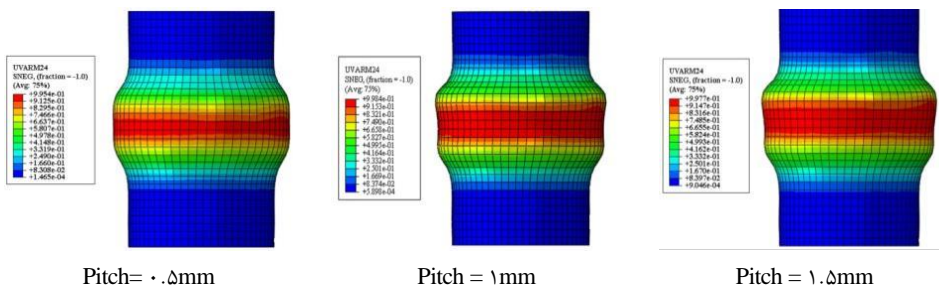
آمده برای اندازه‌های مختلف المان را نشان می‌دهد که مقادیر کرنش در اندازه ۲ میلی‌متر همگرا شده و از همین اندازه برای همه شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.



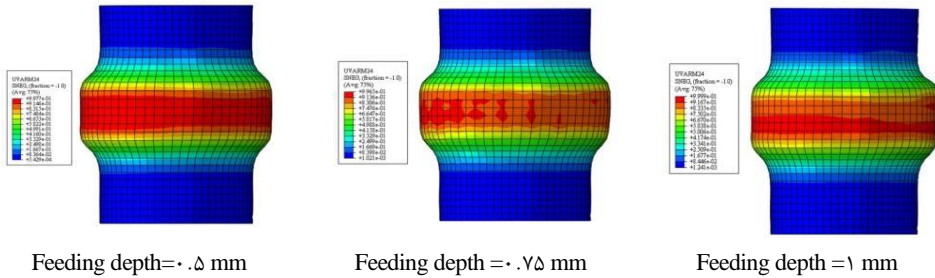
شکل ۴. تأثیر اندازه المان بر روی کرنش محیطی.

نتایج و بحث

پس از اجرای شبیه‌سازی برای سرعت شکل‌دهی، دما، گام و عمق شکل‌دهی مختلف، زمان و مکان پارگی با استفاده از چهار معیار شکست انتخاب شده، مشخص می‌شود. این پیش‌بینی با کانتور بر روی نقاط مختلف لوله نمایش داده می‌شود که رسیدن مقدار پیش‌بینی به یک نشان‌دهنده احتمال شکست طبق معیار مورد نظر می‌باشد. شکل ۵ کانتور پیش‌بینی شکست توسط معیار کوکرافت لاتهام نرمال را تحت سرعت شکل‌دهی ثابت ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عمق شکل‌دهی ۱ میلی‌متر و دما 200°C نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گام شکل‌دهی شکست در بالج کمتری پیش‌بینی می‌شود. شکل ۶ کانتور پیش‌بینی شکست توسط معیار کوکرافت لاتهام نرمال را تحت سرعت، گام شکل‌دهی و دمای ثابت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق شکل‌دهی پارگی زودتر اتفاق می‌افتد و قطر شکل‌دهی کمتر می‌شود.

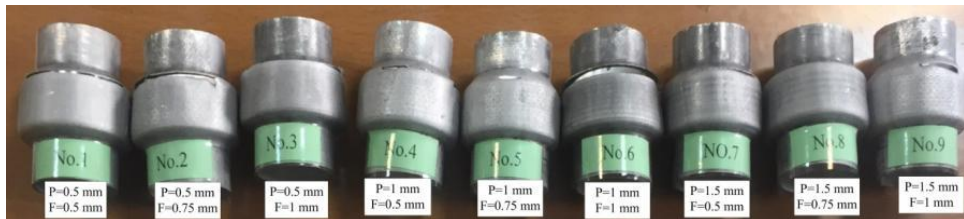


شکل ۵. تأثیر گام شکل‌دهی بر پیش‌بینی معیار شکست کوکرافت لاتهام نرمال در دمای 200°C .

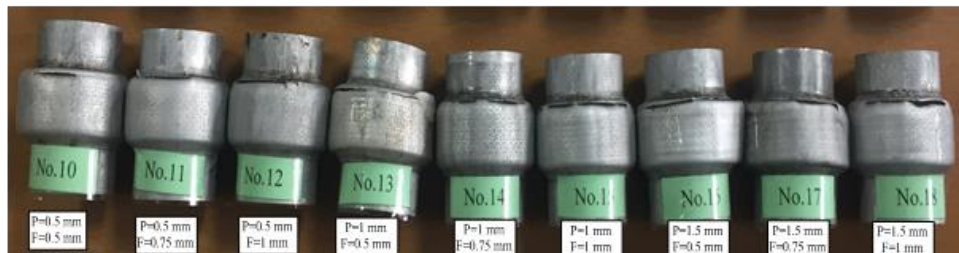


شکل ۶. تأثیر عمق شکل دهی بر پیش‌بینی معیار شکست کوکرافت لاتهام نرمال در دمای ۳۰۰ °C.

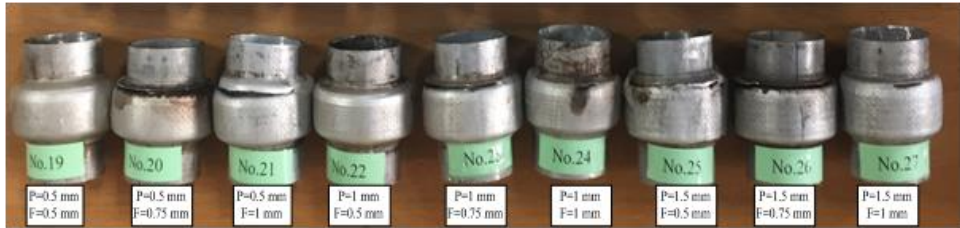
نمونه‌های شکل دهی تدریجی گرم تولید شده در دماهای ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با گام‌های شکل دهی، عمق شکل دهی متفاوت و سرعت خطی ثابت ۸۰۰ دور بر دقیقه در شکل ۷ تا شکل ۹ نشان داده شده است. P نشان‌دهنده گام و F نشان‌دهنده عمق شکل دهی می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود، به دلیل بالاتر بودن تنش در راستای شعاعی لوله، همیشه راستای پارگی عرضی بوده و همچنین ابتدای پارگی از بالاترین نقطه شروع شکل دهی یا همان ابتدای حرکت سنبه در هر مرحله و تماس با لوله می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده ایجاد بیشترین کشیدگی و تنش کششی در ناحیه شعاع بالایی و پایینی است. اصطکاک دیواره لوله با قالب‌های بالا و پایین از جریان مواد به داخل ناحیه شکل دهی- که لوله تماس با قالب‌ها ندارد- جلوگیری می‌کند. در نتیجه در زمان اعمال عمق شکل دهی در ابتدای هر تغذیه شکل دهی، تنش کششی طولی زیادی در محل تماس ابزار به وجود آمده و نازک‌شدگی بیشتری در این ناحیه رخ می‌دهد. پدیده جریان نیافتن مواد به ناحیه شکل دهی، در دماهای بالا بیشتر می‌شود زیرا ضریب اصطکاک و چسبندگی لوله به قالب‌ها نیز در دماهای بالا افزایش می‌یابد.



شکل ۷. نمونه‌های شکل دهی تدریجی گرم در دمای ۱۰۰ درجه در گام شکل دهی و عمق شکل دهی متفاوت.



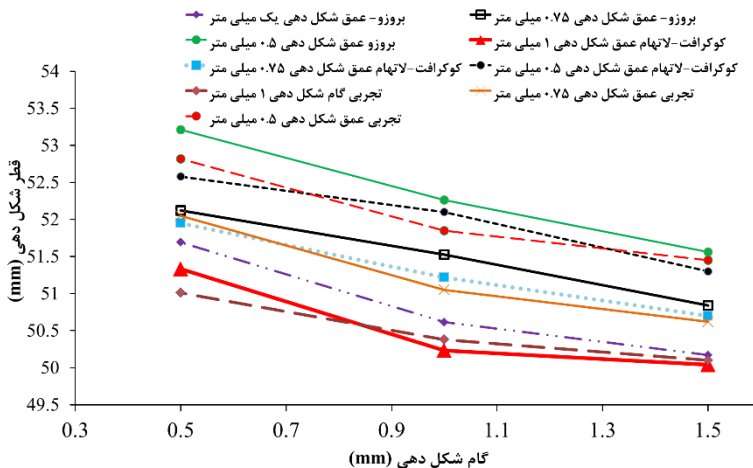
شکل ۸. نمونه‌های شکل دهی تدریجی گرم در دمای ۲۰۰ درجه در گام شکل دهی و عمق شکل دهی متفاوت.



شکل ۹. نمونه‌های شکل دهی تدریجی گرم در دمای ۳۰۰ درجه در گام شکل دهی و عمق شکل دهی متفاوت.

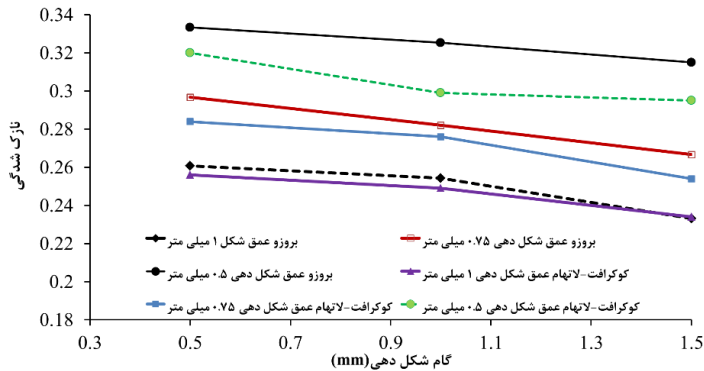
پیش بینی قطر شکل دهی و درصد نازک شدگی

در این بخش پیش بینی معیارها در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است در هر دما فقط نتایج پیش بینی دو معیار خاص آورده شده که به نتایج تجربی نزدیک تر بوده‌اند و از نتایج دو معیار دیگر در آن دما چشم پوشی شده است. قابل ذکر است مقدار پارامترهای فرآیندی استفاده شده در شکل دهی طوری انتخاب شده است که پارگی سریع در لوله رخ ندهد و از طرف دیگر زمان فرآیند طولانی نشود. به عنوان مثال در صورت استفاده از گام شکل دهی بیشتر از ۱/۵ میلی متر، پارگی در ابتدای فرآیند شکل دهی مشاهده خواهد شد و اگر گام کمتر از ۰/۵ میلی متر در نظر گرفته شود زمان فرآیند به شدت بالاتر رفته و انرژی هدر رفته در اثر گرم کردن لوله بالا خواهد رفت. در شکل ۱۰ مقایسه پیش بینی قطر شکل دهی تجربی و دو معیار قابل قبول در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. همان طور که اشاره شد نتیجه پیش بینی دو معیار دیگر یعنی کوکرافت-لاتهام نرمال و آپادا به دلیل فاصله زیاد با نتایج تجربی در دمای ۱۰۰ درجه گزارش نشده است. همان طور که مشاهده می شود نزدیک ترین پیش بینی قطر با نتایج تجربی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد مربوط به معیار کوکرافت لاتهام می باشد. پس می توان نتیجه گرفت معیار کوکرافت لاتهام برای تشخیص پارگی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد بهترین معیار می باشد. با افزایش گام شکل دهی از ۰/۵ میلی متر به ۱/۵ میلی متر در تغذیه های محوری ثابت، قطر کاهش یافته است.



شکل ۱۰. پیش بینی قطر شکل دهی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد.

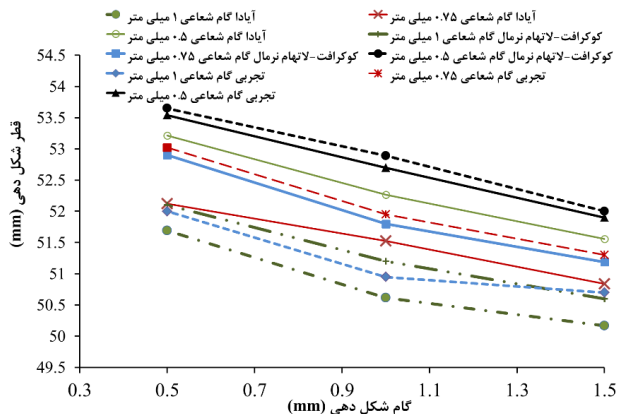
شکل ۱۱، نازک‌شدگی پیش‌بینی شده با دو معیار کوکرافت لاتهام و بروزو را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گام شکل‌دهی در عمق‌های شکل‌دهی ثابت، درصد نازک‌شدگی کاهش پیدا می‌کند.



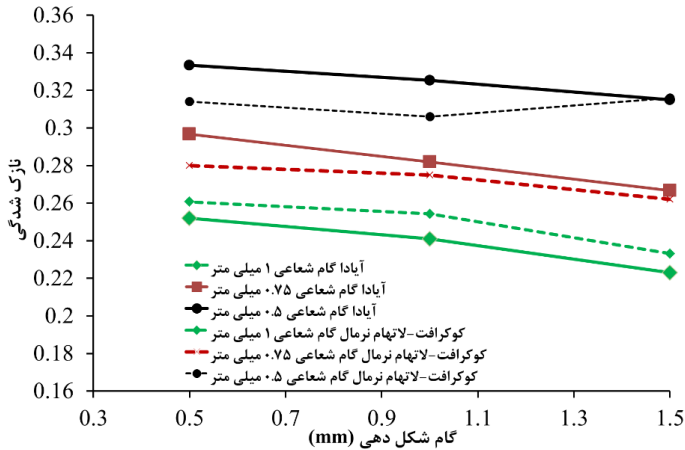
شکل ۱۱. پیش‌بینی درصد نازک‌شدگی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد.

شکل ۱۲ پیش‌بینی قطر شکل‌دهی دو معیار کوکرافت لاتهام نرمال و آیدا و نتایج تجربی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌بینی معیار کوکرافت لاتهام نرمال به نتایج تجربی خطای کمتری دارد پس می‌توان نتیجه گرفت معیار کوکرافت لاتهام نرمال بهترین معیار برای تشخیص پارگی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. روند نزولی قطر شکل‌دهی با افزایش گام شکل‌دهی در عمق شکل‌دهی ثابت همانند دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد با این تفاوت که با افزایش دما از ۱۰۰ به ۲۰۰ درجه سانتیگراد افزایش قطر محسوسی قابل رویت است و در گام شکل‌دهی ۰/۵ میلی‌متر و عمق شکل‌دهی ۰/۵ میلی‌متر از دمای ۱۰۰ به ۲۰۰ درجه سانتیگراد با افزایش ۱/۲٪ همراه می‌باشد.

شکل ۱۳، نازک‌شدگی دو معیار کوکرافت لاتهام نرمال و آیدا را نشان می‌دهد. با توجه به افزایش قطر شکل‌دهی در این دما درصد نازک‌شدگی نیز زیاد می‌شود بیشترین درصد نازک‌شدگی مربوط به گام شکل‌دهی و عمق شکل‌دهی ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین قطر شکل‌دهی را نیز دارا می‌باشد.

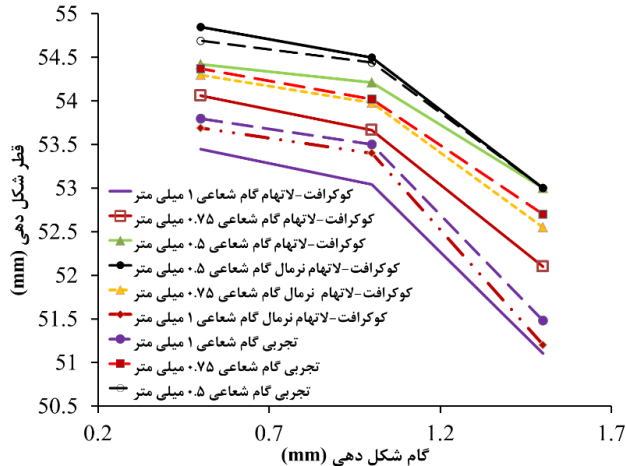


شکل ۱۲. پیش‌بینی قطر شکل‌دهی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد.

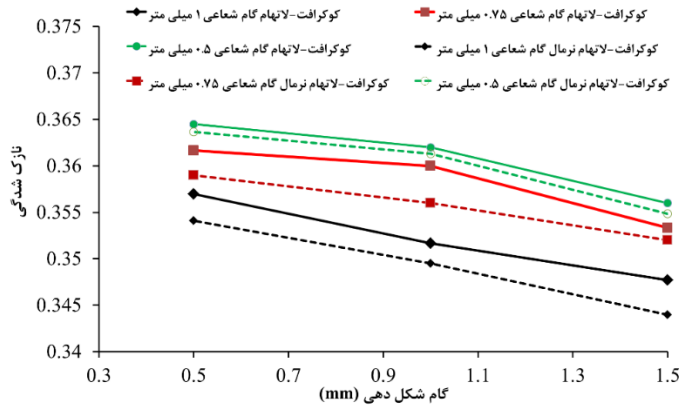


شکل ۱۳. پیش‌بینی درصد نازک‌شدگی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد.

پیش‌بینی قطر شکل‌دهی دو معیار کوکرافت لاتهام و کوکرافت لاتهام نرمال در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در مقایسه دو معیار با نتایج تجربی، معیار کوکرافت لاتهام نرمال خطای کمتری را دارا می‌باشد پس می‌توان معیار کوکرافت لاتهام نرمال را به عنوان بهترین معیار پیش‌بینی پارگی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد معرفی نمود. با افزایش گام شکل‌دهی در عمق شکل‌دهی ثابت، قطر شکل‌دهی کاهش می‌یابد کمترین قطر شکل‌دهی مربوط به گام شکل‌دهی ۱/۵ میلی‌متر و عمق شکل‌دهی ۱ میلی‌متر می‌باشد. افزایش ۴٪ قطر شکل‌دهی در گام شکل‌دهی و شعاعی ۰/۵ میلی‌متر از دمای ۱۰۰ به ۳۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. نازک‌شدگی دو معیار کوکرافت لاتهام و کوکرافت لاتهام نرمال در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴. پیش‌بینی قطر شکل‌دهی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۱۵. پیش‌بینی درصد نازک‌شدگی در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد.

مقایسه شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ نشان می‌دهد با افزایش دما، قطر شکل داده شده نیز افزایش می‌یابد. اما میزان افزایش قطر با تغییر دما از ۲۰۰ به ۳۰۰ درجه نسبت به تغییر دما از ۱۰۰ به ۲۰۰ درجه بیشتر از دو برابر شده است. این موضوع به تغییر خواص مکانیکی ماده در دمای ۳۰۰ درجه نسبت به دماهای دیگر بستگی دارد. در واقع کرنش شکست نمونه‌های تست کشش در دمای ۳۰۰ درجه نسبت به دما ۲۰۰ درجه خیلی بیشتر شده است.

بررسی سطح شکست نمونه‌ها

برای بررسی سطح شکست سطح نمونه‌ها، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده است. در این راستا از سطح شکست سه نمونه در دماهای مختلف اما با شرایط شکل‌دهی یکسان (گام، عمق و سرعت شکل‌دهی برابر) عکس‌برداری انجام شد که در شکل ۱۶ تا شکل ۱۸ برای دماهای مختلف مشاهده می‌شود. به علت نازک‌شدن دیواره لوله در محل شکست و خم شدن آن در اثر تماس با ابزار عکس‌برداری به سختی انجام شده و مقداری از سطح داخلی نمونه‌ها نیز در عکس‌ها مشاهده می‌شود.

شکست نرم در فلزات با سه مکانیزم مختلف ایجاد و رشد پلاستیک حفره‌ها، گلوبی و کاهش پیوسته سطح مقطع و برش خالص در صفحه‌ای با تنش برشی ماکزیم رخ می‌دهد. سطح مقطع شکست نرم معمولاً با حفره‌ها ابعاد مختلف پوشانده شده است. مکانیزم گلوبی و کاهش پیوسته به ندرت در فلزات رخ می‌دهد زیرا معمولاً ذرات ناخالصی و فاز دوم در همه قطعات وجود دارد و این ذرات محل شروع ایجاد حفره خواهند بود [۲۲]. زمانی که شکست نرم تحت برش خالص رخ دهد حفره‌ها به ندرت دیده شده و سطح شکست به صورت صاف مشاهده می‌شود [۲۳].

سطح همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود یک قسمت از سطح شکست دچار برش خالص شده و بخش دیگر به علت شکست نرم دارای حفره‌هایی می‌باشد. با توجه به اینکه قسمت حفره‌دار در قسمت داخلی لوله دیده می‌شود مشخص می‌شود که ابتدا پارگی در اثر تنش کششی ناشی از عمل ابزار شکل‌دهی آغاز شده و پس از رسیدن ضخامت به یک مقدار حداقلی برش خالص در دیواره ایجاد می‌شود. با بررسی شکل‌ها مشخص می‌شود با افزایش دمای شکل‌دهی عرض ناحیه شکست تحت برش خالص بیشتر شده است.



شکل ۱۶. عکس سطح مقطع شکست نمونه در گام شکل دهی، شعاعی ۰/۵ میلی متر و دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۱۷. عکس سطح مقطع شکست نمونه در گام شکل دهی، شعاعی ۰/۵ میلی متر و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۱۸. عکس سطح مقطع شکست نمونه در گام شکل دهی، شعاعی ۰/۵ میلی‌متر و دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله شکل‌دهی تدریجی لوله‌های آلومینیومی AA6063 در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقطع شکل داده شده به صورت متقارن محوری بوده و شکست نمونه‌ها توسط معیارهای شکست نرم در شبیه‌سازی پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما قطر نمونه‌ها افزایش می‌یابد اما در همه نمونه‌ها شروع شکست در گوشه ناحیه بالج اتفاق می‌افتد. به طور میانگین، قطر شکل داده شده در دمای ۳۰۰ درجه نسبت به دمای ۱۰۰ درجه حدود ۴٪ افزایش داشته است. با افزایش عمق و گام شکل‌دهی در همه دماها، شکل‌پذیری کمتر شده و حداکثر قطر شکل داده شده کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که معیار کوکرافت-لاتهام نرمال شده بهترین پیش‌بینی را برای حداکثر قطر دارد. بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که یک ناحیه شکست تحت برش خالص در لبه شکست وجود دارد که با افزایش دما عرض این ناحیه بیشتر می‌شود.

References

- [1] Keigler, M., Bauer, H., Harrison, D., & De Silva, A. K. M. (2005). Enhancing the formability of aluminium components via temperature controlled hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), 363-370. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.024>
- [2] Aue-u-lan, Y. (2007). *Hydroforming of tubular materials at various temperatures* [Doctoral, The Ohio State University]. Columbus, Ohio. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?ac_c_num=osu1167627628
- [3] Hashemi, S. J., & Dadgar Asl, Y. (2021). Numerical and Experimental Investigation of Low Pressure Hydroforming of Aluminum Tubes. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 291-307. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.296120.1643>

- [4] Afonso, D., De Sousa, R. A., Torcato, R., & Pires, L. (2019). *Incremental forming as a rapid tooling process*. Springer. <https://www.amazon.com/Incremental-Forming-Springer-Briefs-Sciences-Technology/dp/3030153592>
- [5] Korkolis, Y. P., & Kyriakides, S. (2008). Inflation and burst of anisotropic aluminum tubes for hydroforming applications. *International Journal of Plasticity*, 24(3), 509-543. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.07.010>
- [6] Chu, E., & Xu, Y. (2004). Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(2), 263-283. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.014>
- [7] Chu, E., & Xu, Y. (2004). Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part II: process window diagram. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(2), 285-297. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.013>
- [8] Seyedkashi, S. M. H., Naeini, H. M., Liaghat, G. H., Mashadi, M. M., Mirzaali, M., Shojaee, K., & Moon, Y. H. (2012). The effect of tube dimensions on optimized pressure and force loading paths in tube hydroforming process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(6), 1817-1822. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0430-7>
- [9] Hashemi, S. J., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G., Azizi Tafti, R., & Rahmani, F. (2013). Numerical and Experimental Investigation of Temperature Effect on Thickness Distribution in Warm Hydroforming of Aluminum Tubes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1), 57-63. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0213-4>
- [10] Seyedkashi, S. M. H., Naeini, H. M., & Moon, Y. H. (2014). Feasibility study on optimized process conditions in warm tube hydroforming. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(7), 2845-2852. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0638-9>
- [11] Rahmani, F., Seyedkashi, S. M. H., & Hashemi, S. J. (2019). Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(11), 2351-2361. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65141-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65141-1)
- [12] Praveen, K. G., & Kurra, S. (2021). Analysis of deformation behavior in various incremental tube forming processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(14), 1631-1641. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1926493>
- [13] Aghabeyki, F., Mirnia, M. J., & Elyasi, M. (2021). Cold and warm flaring of thin-walled titanium tube using single-point incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(11), 3357-3376. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07135-x>
- [14] Lee, H-R., Lee, M-G., & Park, N. (2022). Incremental Tube Forming Process with a Novel Free Rotating Bearing Tool Tip: Experiment and FE Modeling with Anisotropic Plasticity Model. *Metals and Materials International*, 28(10), 2356-2370. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01245-1>
- [15] Rahmani, F., Seyedkashi, S. M. H., & Hashemi, S. J. (2020). Experimental Study on Warm Incremental Tube Forming of AA6063 Aluminum Tubes. *International Journal of Engineering*, 33(9), 1773-1779. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.09c.11>
- [16] Hou, X., Li, Y., Xiao, X., Qiu, X., Yang, M., & Gao, X. (2022). Modeling and analysis of multi-pass progressive flanging force of copper tube end. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(7-8), 4703-4712. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09653-8>

- [17] Isapour Rudy, M., Vahdati, M., & Mirnia, M. J. (2023). Statistical Analysis and Optimization of Variables Affecting the End Diameter of AISI 304 Steel Tube Produced by Flaring Process. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(12), 2861-2876. <https://doi.org/10.22060/mej.2022.21622.7479>
- [18] Movahedinia, H., Mirnia, M. J., Elyasi, M., & Baseri, H. (2018). An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 867-880. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0971-0>
- [19] Clift, S. E., Hartley, P., Sturgess, C. E. N., & Rowe, G. W. (1990). Fracture prediction in plastic deformation processes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 32(1), 1-17. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(90\)90148-C](https://doi.org/10.1016/0020-7403(90)90148-C)
- [20] Fischer, F. D., Kolednik, O., Shan, G. X., & Rammerstorfer, F. G. (1995). A note on calibration of ductile failure damage indicators. *International Journal of Fracture*, 73(4), 345-357. <https://doi.org/10.1007/BF00027274>
- [21] Hashemi, S., Rahmani, F., & Seyedkashi, S. (2020). Numerical and Experimental Investigation of Forming Limit Diagram in Warm Incremental Forming Process of Aluminum Tubes. *Modares Mechanical Engineering*, 20(6), 1635-1645. <https://mme.modares.ac.ir/article-15-38356-en.html>
- [22] Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2008). *Mechanical behavior of materials* (2 ed.). Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947>
- [23] Li, X., Yang, W., Xu, D., Ju, K., & Chen, J. (2021). A new ductile fracture criterion considering both shear and tension mechanisms on void coalescence. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(3), 374-398. <https://doi.org/10.1177/1056789520962831>