Archive of SID

مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آبان 1398، دوره 6، شماره 5، ص‌ص. 18-24

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تجربی شکل‌دهی انفجاری لوله‌های آلومینیومی با مخلوط گازها

سیدجلال هاشمی[1*]، امراله ساده[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین

* تهران، صندوق پستی 13715-173، j_hashemi@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 آذر 1397

پذیرش: 18 اسفند 1397

ارائه در سایت: مهر 1398

کلیدواژگان:

شکل‌دهی انفجاری

لوله آلومینیومی

اختلاط گازها

چکیده

شکل‌دهی انفجاری یکی از روش‌های نوین برای شکل‌دهی ورقی فلزات می‌باشد که در آن عامل ایجاد تغییرشکل، انرژی آزاد شده از انفجار می‌باشد. یکی از روش‌های شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی به کمک انفجار مخلوط گاز می‌باشد. در این فرایند پس از حصول فشار مناسب در ترکیب دو گاز، با ایجاد احتراق در محل یا محفظه مورد نظر انرژی لازم برای شکل‌دهی به دست می‌آید. در این تحقیق روش جدیدی برای شکل‌دهی لوله‌ی آلومینیومی با انفجار مخلوط دو گاز هیدروژن و اکسیژن با نسبت اختلاط 32% اکسیژن– 68% هیدروژن بررسی شده است. به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک لوله آلومینیومی AA6063 تحت اثر انرژی حاصل از شوک انفجاری یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این دستگاه ، لوله‌های آلومینیومی تحت شرایط مختلف بارگذاری شکل‌دهی شده اند و اثر فشار اولیه گاز و محل ایجاد جرقه بر شکل‌دهی و تولید قطعه با شکل مطلوب بررسی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که فشار اولیه گاز 12 bar بر اساس نسبت اختلاط 32% اکسیژن– 68% هیدروژن می‌تواند باعث شکل‌دهی کامل لوله متناسب مطابق با شکل قالب شود. فشار اولیه بالاتر منجر به ترکیدگی لوله قبل از رسیدن به دیواره قالب می شود. هم‌چنین بهترین مکان برای جرقه زنی برای دستیابی به شکل‌دهی کامل وسط لوله می‌باشد.

Experimental investigation of explosive forming of aluminum tubes using gas mixture

Seyed Jalal Hashemi[1*], Amrollah Sadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Enghelab-e Eslami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

* P.O.B. 13715-173 Tehran, Iran, j_hashemi@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 18 December 2018

Accepted 9 March 2019

Available September 2019

Keywords:

Explosive forming

Aluminum tube

Gas mixture

Abstract

Explosive forming is one of the novel sheet metal forming processes in which released energy of explosion is reason of forming. Explosive forming using gas mixture is one of the explosive forming processes. In this process, after getting desired pressure in the mixture of two gases, required energy for forming is obtained by combustion in the chamber. In this research, a new method for forming of aluminum tubes by exploding gas mixture (33% oxygen-68% hydrogen) has been investigated. In order to make plastic deformation in AA6063 aluminum tubes under energy of explosion shock, an experimental setup has been designed and fabricated. Using this setup, aluminum tubes have been formed under different loading conditions and the effect of initial gas pressure and location of ignition on forming and suitable production of part in accordance with die configuration have been investigated. Experimental results show that the initial gas pressure of 12bar with mixing ratio of 32%oxygn-68%hydrogen can cause complete forming of tube in accordance with the die configuration. More initial gas pressure leads to bursting of tube before contact die wall. Also middle of tube is best location of ignition to obtain complete forming of tube.

1- مقدمه

در فرایند شکل‌دهی با سرعت بالا، برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه‌کار از انرژی لحظه‌ای آزاد شده استفاده می‌شود [1]. این فرایندهای شکل‌دهی که در دمای محیط انجام می‌شود در صنایع هوافضا، هواپیما سازی و خودروسازی کاربرد دارند. شکل‌دهی انفجاری یکی از روش های شکل‌دهی با سرعت بالا می‌باشد که در آن سنبه یا سیال شکل‌دهی با فشار ناشی از انفجار جایگزین شده است [2]. یک ماده منفجره انرژی شیمیایی را آزاد می‌کند که به موج انفجار تبدیل می‌شود. ماده منفجره می‌تواند جامد، مایع و یا گاز باشد. ژانگ و همکارانش [3] اثر تعداد تکه های ساختار اولیه بر شکل‌دهی انفجاری بدون قالب برای تولید کره فلزی را بررسی کردند. اکبری لوح‌موسوی و همکاران [4] برای دستیابی به بهترین مدل ماده در شبیه‌سازی و فاصله بهینه محل انفجار نسبت به ورق، فرایند شکل‌دهی

Please cite this article using:

S. J. Hashemi, A. Sadeh, Experimental investigation of explosive forming of aluminum tubes using gas mixture, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 18-24, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

Archive of SID

انفجاری را مورد بررسی عددی و تجربی قرار دادند. تانگ و همکاران [5] شکل‌دهی انفجاری یک کره فلزی جدار نازک را بررسی کردند. براساس نتایج آنها جوشکاری یک ورق اضافی به بالا و پایین محفظه می‌تواند به شکل‌دهی بیشتر کمک کند. هگمان و همکاران [6] خواص مکانیکی مقاطع زینی شکل داده شده به روش انفجاری را مورد بررسی قرار دادند. قره‌بابایی [7] در رساله دکتری خود مدل تحلیلی برای برآورد مقدار خیز ورق در شکل‌دهی انفجاری را توسعه داده و با نتایج تجربی و عددی مورد مقایسه قرار داد. ظهور و رضوانی [8] شکل‌دهی انفجاری ورق‌هالی مدور را با استفاده از آب به عنوان واسطه و تغییر فاصله ماده منفجره از ورق انجام دادند. برجی [9] شکل‌دهی انفجاری قطعات عدسی شکل را با استفاده از یک قالب با برآمدگی به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و نشان داد با محدود کردن لبه‌های ورق شکل‌دهی بهتر انجام می‌شود.

از جمله روش‌های شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی به کمک انفجار گاز می‌باشد که در این تحقیق از انفجار مخلوطی از هیدروژن و اکسیژن به منظور شکل‌دهی استفاده شده‌است. شکل‌دهی به کمک مخلوط گاز در مقایسه با مواد منفجره، دارای مزیت‌هایی نیز می‌باشد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [10]: (1) مخلوط گازهای تجاری که به عنوان منبع تامین انرژی استفاده می‌شود، خطر انفجار کمی دارد و مراحل استفاده از آن در هر کارگاه معمولی و با امکانات ساده، قابل دستیابی است. (2) فشار نهایی حاصل از انفجار و همچنین تغییرات فشار اعمالی در مراحل انجام کار به طور مستقل از یکدیگر قابل کنترل هستند. (3) معمولا مواد منفجره و تجهیزات مورد استفاده هنگام به‌کارگیری در آب قرار می‌گیرند، در حالی که در مخلوط گازی نیازی به وجود آب نیست. (4) صدای تولید شده کمتر است.

یاسار و همکارانش [11، 12] شکل‌دهی فنجان‌های آلومینیومی را به روش انفجار مخلوط گازها انجام دادند. در این تحقیق که از مخلوط اکسیژن و استیلن استفاده شد، برگشت فنری ورق بعد از شکل‌دهی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. خالقی و همکارانش [13] تغییر شکل پلاستیک ورق به حالت گنبدی با استفاده از انفجار مخلوط اکسیژن و هیدروژن را به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج، برای بیشترین شکل‌دهی نسبت اختلاط 68% هیدروژن و 32% اکسیژن مطلوب است. بابایی و همکارانش [14] شکل‌دهی ورق‌های فولادی و آلومینیومی را با نسبت‌های اختلاط مختلف استیلن و اکسیژن و هم چنین فشار اولیه گاز متفاوت برای دستیابی به بیشترین شکل‌پذیری را بررسی کردند.

در یک مطالعه دیگر، بابایی و همکارانش [15] یک مدل تحلیلی برای تغییر شکل ورق بر اساس خواص مکانیکی و هندسه قالب شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی انفجاری با اختلاط گازها توسعه دادند. میرزابابای مستوفی [16] شکل‌دهی انفجاری ورق‌های مستطیل شکل یک لایه، دولایه و کامپوزیتی با استفاده مخلوط گازها را انجام داد.

تا به حال تحقیق در زمینه شکل‌دهی لوله‌ها با روش انفجار مخلوط گازها ارائه نشده است. در این مقاله برای بررسی فرایند ذکر شده از انفجار مخلوط اکسیژن و هیدروژن استفاده شده است. نسبت اختلاط در همه آزمایش ها ثابت در نظر گرفته و اثر موقعیت جرقه زنی و فشار اولیه گاز قبل از انفجار بر شکل‌پذیری لوله‌های آلومینومی بررسی شده است.

2- تجهیزات تجربی

قطعه لوله‌ای مورد نظر برای دستیابی پس از فرایند شکل‌دهی در شکل 1 نمایش داده شده است. لوله‌های مورد بررسی در این مقاله از آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر خارجی اولیه 40 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر بوده است.

برای شکل‌دهی این مقطع، حفره قالب به صورت دو تکه ساخته شده و به وسیله شش پیچ به هم متصل می‌شوند. دو نمیه قالب در شکل 2 مشاهده می‌شود. برای آب‌بندی دو انتهای لوله از روش فلز به فلز استفاده شده و دو سنبه مخروطی وارد لوله می‌شوند به صورتی نشتی گاز صورت نگیرد. هم‌چنین این سیستم آب‌بندی باعث جلوگیری از حرکت دو انتهای لوله شده و لوله از دو انتها مقید می‌شود.

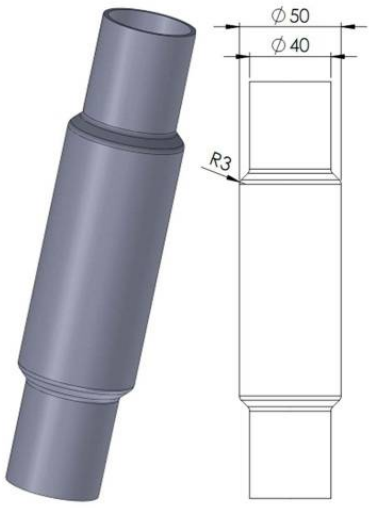

Fig. 1 Tubular part

شکل 1 قطعه لوله‌ای

www.SID.ir

Archive of SID

Fig. 2 Two half of explosive forming die

شکل 2 دو نیمه قالب شکل‌دهی انفجاری

در ابتدای فرایند، پس از قرار دادن لوله درون قالب و بستن دو نیمه قالب، آب‌بندی از دو انتهای لوله انجام می‌شود. سپس گازهای اکسیژن و هیدروژن که توسط دو سیلندر جداگانه تأمین می‌شود توسط دو شلینگ فشار قوی که به یکی از سنبه‌ها متصل است وارد لوله می‌شوند. نسبت اختلاط گازها به وسیله تنظیم فشار خروجی توسط رگلاتورهای قرار گرفته روی هر سیلندر کنترل می‌شود. با باز کردن شیر خروجی هر سیلندر فشار گاز داخل لوله بالا رفته و پس از رسیدن فشار خروجی هر سیلندر به حد مورد نظر ،شیرها بسته می‌شود. کنترل فشار گازها با مانومترهای دقیق انجام می‌شود. در این مقاله نسبت اختلاط 68٪ هیدروژن و 32٪ اکسیژن برای همه آزمایش‌ها استفاده شده است. فشار داخل لوله با فشارسنج متصل به قالب کنترل می‌گردد. بعد از اینکه فشار محفظه به مقدار مشخصی رسید، تمامی شیرها بسته شده و عمل جرقه زدن توسط فرمان اپراتور صورت می‌گیرد. برای جلوگیری از اثر مخرب موج انفجار بر شلنگ ها و دیگر تجهیزات، شیرهای یک طرفه روی ورودی قالب تعبیه شده تا در زمان انفجار بسته شوند. سیستم جرقه‌زنی حاوی یک عدد الکترود جرقه‌زنی مشعل‌های گازی متشکل از یک میله‌ی رسانای فلزی و کابلی می‌باشد که آن را به ترانس متصل کرده است. این ترانس ولتاژ 15 کیلو ولت ایجاد می‌کند که باعث می‌گردد جرقه به صورت ممتد در داخل محفظه‌ی احتراق در فشارهای بالا نیز بدون ایجاد مشکل صورت پذیرد. کل مجموعه شکل‌دهی انفجاری در شکل 3 نمایش داده شده است.

هر بار پس از انجام آزمایش، سطوح قالب حاوی اثرات زنگ‌زدگی ناشی از واکنش اکسیژن و هیدروژن بودند. به‌واسطه‌ی این واکنش، مقداری رطوبت و آب بر روی سطوح داخل لوله، درپوش‌ها و جداره‌ی شمع ایجاد می‌گردد. جهت جلوگیری از خوردگی این سطوح قبل از هر آزمایش تمیز گردیدند. هم‌چنین نوک شمع هم پس از هر آزمایش بوسیله‌ی سنباده پرداخت و تیز گردید.

Fig. 3 Tube explosive forming setup

شکل 3 مجموعه شکل‌دهی انفجاری لوله

3- آزمایش‌ها و نتایج

در این بخش ابتدا آزمایش‌های انجام شده و نتیجه آنها بیان می‌شود و سپس اثر فشار اولیه گاز بر نسبت بالج و توزیع ضخامت قطعات بررسی خواهد شد. آزمایش ها با توجه به محل قرار گرفتن سیستم جرقه زنی در لوله در دو حالت انجام شده است. در حالت اول محل جرقه‌زنی در انتهای لوله و در سمت مقابل ورودی گازها قرار دارد و در حالت دوم جرقه دقیقا در وسط طول شکل‌دهی لوله ایجاد شده است. پس از انجام هر آزمایش تغییر شکل لوله و ترکیدگی احتمالی آن بررسی می‌شود.

3-1- جرقه‌زنی در انتهای لوله

یکی از پارامترهای مهم مؤثر بر شکل‌دهی لوله در فرایند شکل‌دهی انفجاری با اختلاط گازها، فشار اولیه گاز قبل از انفجار درون لوله می‌باشد. اولین آزمایش شکل‌دهی در این حالت با فشار اولیه گاز 6 bar انجام شد که جهت رعایت نسبت اختلاط فشار 1/9 bar اکسیژن و 4/1 bar هیدروژن مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌ی این آزمایش نشان داد که انفجار در این فشار نهایی هیچ‌گونه تغییرشکلی در لوله ایجاد نمی‌کند. در واقع تنش حاصل از انفجار در این فشار اولیه از خیلی بالاتر از تنش تسلیم ماده نبوده و تقریباً در محدوده‌ی الاستیک لوله آلومینیومی می‌باشد. شکل 4 تصویر لوله تحت انفجار با این فشار را نشان می‌دهد. در واقع مقدار بالج لوله در این حالت نزدیک به صفر می‌باشد.

با توجه به عدم حصول تغییرشکل مطلوب با فشار اولیه پایین، آزمایش در فشارهای 10bar، 13bar و 15bar با همان نسبت

www.SID.ir

Archive of SID

اختلاط ذکر شده تکرار شد. قطعات تولید شده پس از انفجار با این فشارها در شکل 5 مشاهده می‌شوند.

Fig. 4 No deformation with initial gas pressure of 6bar

شکل 4 عدم تغییر شکل لوله با فشار نهایی 6 bar

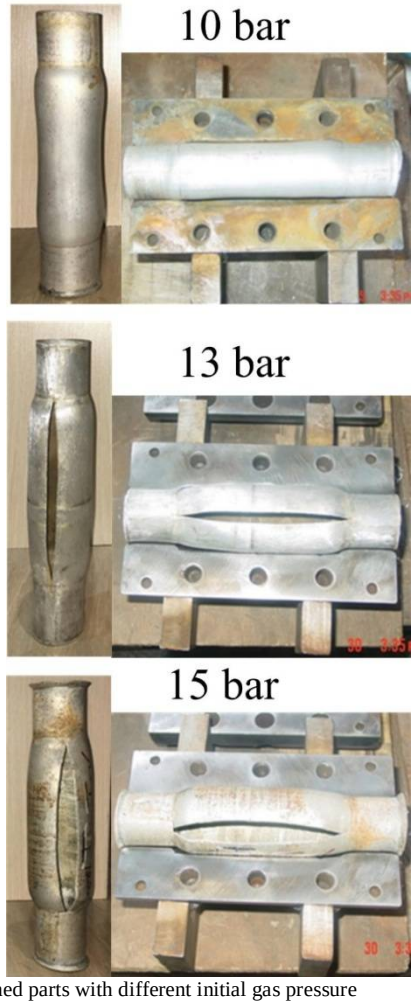

Fig. 5 Formed parts with different initial gas pressure

شکل 5 قطعات شکل داده با فشارهای اولیه گاز متفاوت

در فشار 10bar، شکل‌دهی به صورت ناقص رخ داده است. مقدار تغییر شکل ایجاد شده کم بوده و فاصله‌ی بالج تا مقدار مطلوب مورد نظر قابل توجه می‌باشد. به نظر می‌رسد که تنش ناشی از انفجار در این فشار نهایی از تنش تسلیم فراتر رفته اما منجر به تغییرشکل قابل ملاحظه‌ای نشده اگرچه پارگی در این لوله رخ نداده است. با توجه به شکل قطعه بعد از انفجار مشخص می‌شود که موج انفجار در ابتدا و انتهای لوله فشار لحظه‌ای بیشتری را ایجاد می‌کند. در ادامه‌ی آزمایش، انفجار با فشار نهایی 13 bar (4/2 bar اکسیژن و 8/8 bar هیدروژن) انجام شد. مشاهده می‌شود که شکل‌دهی به طور کامل رخ داده است، اما لوله دچار پارگی در طول آن نیز شده است. قدرت بالای انفجار در این فشار نهایی، منجر به ایجاد یک ترک در نزدیکی محل جرقه شده است. با حرکت موج انفجار در طول لوله، ترک نیز در این جهت اشاعه می‌یابد. با گسترش ترک، هوای حبس شده در بین دیواره‌ی خارجی لوله و جداره‌ی داخلی قالب از این محل به داخل لوله وارد شده و فرایند شکل‌دهی با سهولت انجام می‌گیرد. براین اساس لوله‌ی تولیدشده در این فشار، فرم داخلی قالب را به طور کامل گرفته است. در فشار اولیه 15bar نیز لوله دچار پارگی شدید شده است. این پارگی ناشی از قدرت بسیار زیاد موج حاصله از فشار بالای انفجار می‌باشد.

با توجه به عدم حصول نتیجه مطلوب با فشارهای قبل، فشار اولیه 12bar نیز مورد آزمایش قرار گرفت (شکل 6). در این حالت، تغییر شکل لوله باعث پر شدن قالب شد و دیواره خارجی لوله با دیواره های قالب تماس برقرار کرد اما به علت فشار بالای موج انفجار، ترکیدگی لوله در انتهای آن و نزدیک به محل جرقه‌زنی به وجود آمده است. در این فشار، میزان پارگی بسیار کمتر می‌باشد و بالج از لحاظ طولی و شعاعی به صورت تقریبا متقارن انجام شده‌است. شایان ذکر است که با تکرار آزمایش در فشارهای دیگر و مابین تمامی فشارهای ذکر شده هیچ قطعه‌ی سالمی ایجاد نشد و بهترین نمونه در این حالت جرقه زنی در فشار اولیه 12 bar حاصل شد.

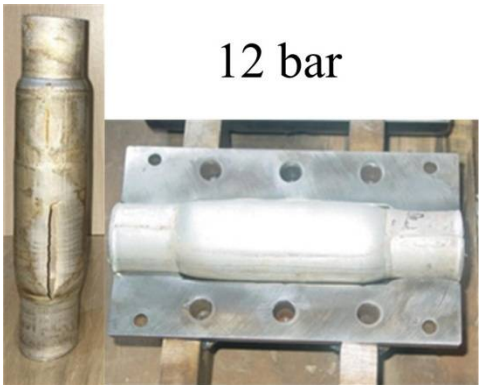

Fig. 6 Tube deformation under initial gas pressure of 12bar with ignition system at the end of tube

شکل 6 تغییر شکل لوله با فشار اولیه 12bar با سیستم جرقه‌زنی در انتهای لوله

www.SID.ir

Archive of SID

3-2- جرقه‌زنی در وسط لوله

با توجه به پارگی‌های رخ داده در حالت اول و تکرار آزمایش‌ها در تمامی فشارهای ذکر شده و ما بین این فشارها و عدم حصول یک نمونه‌ی سالم و هم‌چنین باتوجه به اینکه کلیه‌ی پارگی‌ها در نزدیکی سیستم جرقه ایجاد می‌شدند، آزمایش‌ها با تغییر در طراحی سیستم جرقه‌زنی، شامل افزایش طول سیم و انتقال سیستم جرقه به مرکز بالج لوله انجام شدند. در سیستم جرقه‌زنی حالت اول توجه به وجود جرقه در یک سمت لوله، موج انفجار از یک سمت انتشار یافته و درنتیجه میزان پارگی در دو طرف لوله یکسان نیست. پارگی در سمتی که انفجار رخ می‌دهد بیشتر از قسمت دیگر لوله است. محل قرار رفتن سیستم جرقه‌زنی در حالت دوم در شکل 7 نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حالت اول، فشار 6bar برای شکل‌دهی کافی نبوده و در فشار 15bar نیز ترکیدگی لوله قطعی است. به همین علت در این حالت جرقه‌زنی، آزمایش ها در سه فشار 10bar، 12bar و 13bar انجام گرفت. قطعات تولید شده بعد از فرایند انفجار در فشارهای اولیه ذکر شده در شکل 8 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود فشار 10bar برای شکل‌دهی کامل لوله ناکافی بوده و بالج کمی در دو انتهای لوله صورت گرفته است. با مقایسه نسبت به حالت قبل جرقه‌زنی مشخص می‌شود که در این حالت وسط لوله بیشتر بالج شده و تغییر شکل در امتداد طولی لوله یکنواخت‌تر است. در فشار اولیه 13bar نیز ترکیدگی لوله رخ داده است. اما در فشار 12bar، شکل‌دهی به صورت کامل، متقارن و بدون هیچ‌گونه پارگی رخ داده‌است.

3-3- نسبت بالج قطعات

نسبت بالج لوله‌ها (R) از معادله (1) محاسبه می‌شود که در آن D_0 قطر اولیه لوله، D قطر لوله بعد شکل‌دهی می‌باشد.

$$R = \frac{D - D_0}{D_0} \quad (1)$$

به دلیل این که بعد از ترکیدگی دهانه لوله باز می‌شود، اندازه‌گیری قطر نمونه‌هایی که دچار ترکیدگی شده‌اند در راستای عمود بر محل ترکیدگی انجام شده است. در ضمن قطر همه قطعات در وسط اندازه‌گیری شده است. شکل 9 نسبت بالج به دست آمده برای هر دو حالت سیستم جرقه‌زنی در فشارهای گاز اولیه متفاوت را نمایش می‌دهد. با مشاهده شکل 9 مشخص می‌شود که با افزایش فشار اولیه گاز نسبت بالج لوله ها نیز بیشتر شده است. هم چنین در حالت‌های آزمایشی با فشار اولیه بالاتر 12bar نسبت بالج بدست آمده از نسبت بالج ماکزیمم قالب بیشتر است. این پدیده به دلیل باز شدن دهانه محل ترکیدگی لوله می‌باشد.

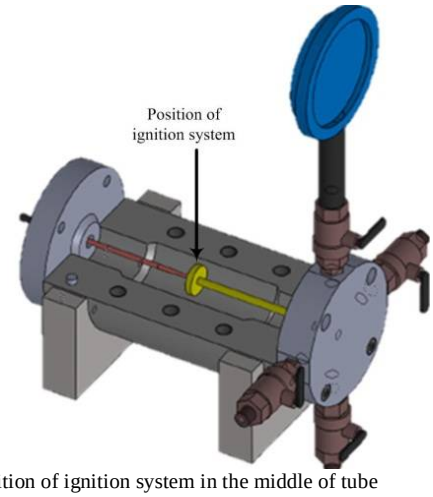

Fig. 7 Position of ignition system in the middle of tube

شکل 7 موقعیت سیستم جرقه‌زنی در وسط لوله

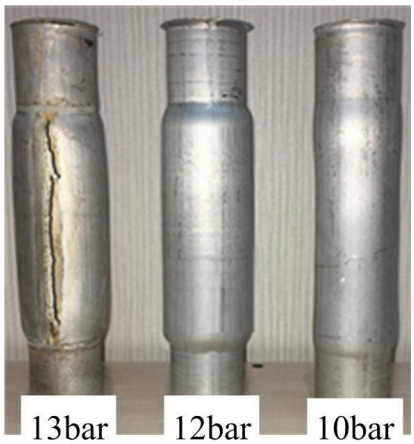

Fig. 8 Formed tubes under different initial gas pressure (ignition system I the middle of tube)

شکل 8 قطعات شکل داده با فشارهای اولیه گاز متفاوت (سیستم جرقه‌زنی در وسط لوله)

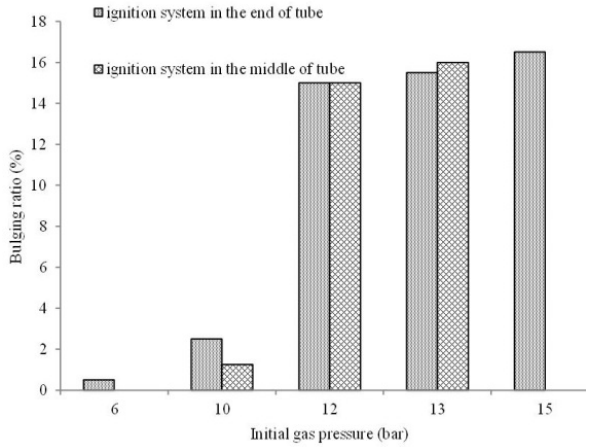

Fig. 9 Bulging ratio of tubes

شکل 9 نسبت بالج لوله‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

4-3- توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده

در این‌جا فقط قطعاتی که تحت شرایط آزمایش دچار ترکیدگی نشده‌اند مورد بحث قرار گرفته است. توزیع ضخامت نمونه‌های سالم با حالت‌های مختلف بارگذاری در شکل 10 مشاهده می‌شود. برای قطعاتی که با فشار اولیه 10bar شکل داده شده‌اند در دو حالت جرقه‌زنی، کاهش ضخامت در گوشه‌ها بیشتر بوده است و ضخامت در وسط لوله که بالج کامل انجام نشده، کاهش کمتری را از خود نشان می‌دهد. اما در کل به دلیل یکنواخت‌تر بودن بالج لوله در حالت دوم جرقه‌زنی، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر از حالت اول است. برای فشار 12bar و حالت دوم جرقه‌زنی که قطعه سالم با شکل‌گیری مناسب تولید شد توزیع ضخامت در ناحیه شکل‌دهی توزیع حالت یکنواختی را دارد. اما در وسط لوله که ابتدا بالج شده و به دیواره قالب می‌رسد، به دلیل اصطکاک با دیواره نازک‌شدگی کمتر شده است.

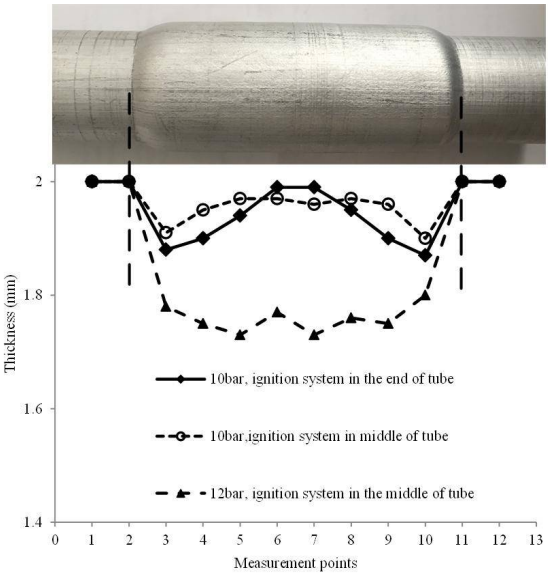

Fig. 10 Thickness distribution of formed tubes under different loading conditions

شکل 10 توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در شرایط مختلف بارگذاری

4- نتیجه‌گیری

با استفاده از سیستم شکل‌دهی انفجاری طراحی و ساخته شده در این پژوهش می‌توان شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی AA6063 را با استفاده از مخلوط دو گاز هیدروژن و اکسیژن با نسبت اختلاط مناسب و تنظیم فشار نهایی تا 12bar را اجرایی و شکل مورد نظر را در آن‌ها ایجاد نمود. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر می‌باشد:

- محل ایجاد جرقه در لوله تأثیر زیادی بر شکل پذیری لوله داشته و با توجه به نتایج، سیستم جرقه‌زنی در وسط لوله مناسب‌تر است.
- فشار اولیه پایین گاز نمی‌تواند باعث تغییر شکل پلاستیک لوله شود و فشارهای بالا نیز باعث ترکیدگی سریع در محل جرقه‌زنی می‌شوند. مقدار بهینه فشار اولیه برای شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی 12bar است.
- ترکیدگی لوله در راستای محور و از محل جرقه شروع می‌شود و در طول لوله گسترش می‌یابد.
- حداکثر نازک‌شدگی در محل گوشه‌های بالج شده لوله رخ می‌دهد که پس از انفجار آخرین موقعیت شکل گرفته لوله 10bar می‌باشد.

5- مراجع

[1] M. A. Tavoli, A. Darvizeh, A. A. Pashaee, R. Moghaddam, Conical Forming of Sheet Metals by Gas Mixture Explosion Metod, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 15-28, 2010. (in persian)

[2] A. Bhaduri, High-Energy Rate Forming. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys, Springer Series in Materials Science, vol 264. Springer, 2018.

[3] R. Zhang, H. Iyama, M. Fujita, T. Zhang, Optimum structure design method for non-die explosive forming of spherical vessel technology, *J. Mater. Process. Technol.*,Volume 85, No. 1–3, pp. 217-219, 1999.

[4] S. A. A. Akbari Mousavi, M. Riahi, A. Hagh Parast, Experimental and numerical analyses of explosive free forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187–188, 2007.

[5] Z. Tong, Z. Li, B. Cheng, R. Zhang, Precision control of explosive forming for metallic decorating sphere, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 203, No. 1–3, pp. 449-453, 2008.

[6] J. B. J. Hegeman, N. V. Luzginova, M. Jong, H. D. Groeneveld, A. Borsboom, M.E.C. Stuivinga, J.G. van der Laan, Tensile properties of explosively formed 316L(N)-IG stainless steel with and without an electron beam weld, *J. Nucl. Mater.*, Vol. 417, No. 1–3, pp. 870-873, 2011.

[7] H. Gharebabaei, Experimental investigation and model development and optimization of forming processes with impulse loading and high energy rate, PhD Thesis, Gilan University, Rasht, 2011. (in Persian فارسی)

[8] M. Zohoor, M. Rezvani, Experimental study of explosive forming of circular steep plates, *Aerospace Mechanic Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 25-32, 2011. (in Persian فارسی)

[9] S. Borji, Experimental development of explosive forming of flanged blanks using male die, *Journal of*

www.SID.ir

Archive of SID

*Energetic Material*s, Vol. 5. No. 1, (2010). (in Persian فارسی)

[10] A. Honda, M. Suzuki, I. Zador, A.K. Vortselas, L. Lukacs; Sheet metal forming by using gas imploding detonation, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 85, pp. 198-203, 1999.

[11] M. Yasar, Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol 150, No. 3, pp. 270-279, 2004.

[12] M. Yasar, H. I. Demirci, I. Kadi, Detonation forming of aluminum cylindrical cups experimental and theoretical modeling, *Materials & design*, Vol. 27, No. 5, pp. 397-404, 2006.

[13] M. Khaleghi, B. S. Aghazadeh, and H. Bisadi. "Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming." *Int. J. Mech. Mechatron. Eng* Vol. 7, pp. 1748-1754, 2013.

[14] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation, *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, 2015.

[15] H. Babaei, , T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process, *Exp. Tech.*, Vol. 40, No. 6, pp. 1485-1494, 2016.

[16] T. Mirzababayi Mostofi, *Experimental and theoretical investigation of deformation of large thin reinforces sheets under shock of explosion of gas mixture*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Gilan University, Rasht, 2018. (in Persian فارسی)

www.SID.ir