



بررسی پارامترهای فرایند ترکیبی کشش عمیق و شکل دهی با گاز به روش تاگوچی جهت تولید قطعات مکعبی از آلیاژ AA5083

سیدمحمدابراهیم علینقی مداح¹، سیدجمال حسینی پور^{2*}، محمدبخشی جویباری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

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

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

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

چکیده

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ویژگی نسبت استحکام به چگالی بالا در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این آلیاژها در دمای محیط قابلیت شکل‌پذیری مناسبی ندارند و لذا در دماهای بالا شکل‌دهی آنها انجام می‌شود. از روش‌های شکل‌دهی گرم که برای آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود، می‌توان به کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز اشاره نمود. این دو روش هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. در این پژوهش یک فرایند شکل‌دهی ترکیبی شامل کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول با استفاده از فرایند کشش عمیق گرم پیش‌فرم ایجاد شده و در مرحله دوم به کمک شکل‌دهی داغ با گاز قطعه نهایی تولید می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای اصلی فرایند بر روی توزیع ضخامت برای شکل‌دهی قطعات مکعبی از جنس ورق آلیاژ آلومینیوم 5083 می‌باشد. این پارامترها شامل دما و نیروی ورقگیر در مرحله کشش عمیق و دما و فشار گاز اعمالی در مرحله شکل‌دهی با گاز می‌باشند. برای این منظور از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد در مرحله کشش عمیق در دمای 350 درجه سانتی‌گراد و نیروی ورقگیر 1000 نیوتن، و برای مرحله شکل‌دهی با گاز در دمای 485 درجه سانتی‌گراد و فشار گاز 0.6 مگاپاسکال می‌توان به کمترین میزان نازک شدن در قطعه نهایی دست یافت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 بهمن 1396
پذیرش: 22 فروردین 1397
ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
کشش عمیق گرم
شکل‌دهی داغ با گاز
آلومینیوم 5083
بهینه‌سازی
طراحی آزمایشات تاگوچی

Investigation of the combined process of deep-drawing and gas-forming by Taguchi method for producing cubic parts from AA5083 alloy

Seyed Mohammad Ebrahim Alinaghi-Maddah, Seyed Jamal Hosseinipour*, Mohammad Bakhshi-Jooybari

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 February 2018
Accepted 11 April 2018
Available Online 11 May 2018

Keywords:

Warm deep drawing
Hot metal gas forming
Aluminum alloy 5083
Optimization
Taguchi method

ABSTRACT

Aluminum alloys have become widespread in the various industries due to the characteristic of high strength-to-density ratio. These alloys do not have a suitable formability at ambient temperature so they formed at high temperatures. The main hot forming methods used for aluminum alloys include deep drawing and gas forming. Both of these methods have their own advantages and disadvantages. In this study, a combined process involving deep drawing and gas forming has been used. In this process, the first stage is to create a pre-form using deep drawing and in the second stage, the final part is produced by gas forming process. The aim of this study is to investigate the effect of the main process parameters on the thickness distribution for the shaping of cubic parts of aluminum sheet 5083 sheet. These parameters include the temperature and blank-holder force of deep drawing stage and the temperature and gas pressure at the gas forming stage. Taguchi experimental design method was used for this purpose. The results show that the temperature at 350 °C and the blank-holder force of 1000 N for deep drawing stage, as well as the temperature of 485 °C and the gas pressure of 0.6 MPa for the gas forming stage, can achieve with the least degree of thinning in the final part.

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم و فولادهای استحکام بالا در حال انجام است. چرا که این آلیاژها در دمای محیط شکل‌پذیری کمی دارند. از مزایای این فرایند افزایش شکل‌پذیری، برگشت فتری کم و هزینه‌های قالب پایین به دلیل کاهش نیروی شکل‌دهی است [1]. با این حال، در تجاری‌سازی آن محدودیت‌هایی وجود دارد. تغییر شکل در این روش بصورت کششی است

فرایند شکل‌دهی ورق به کمک دمش گاز (شکل‌دهی با گاز) از جمله فرایندهای شکل‌دهی داغ می‌باشد، که در آن ابتدا ورق در قالب گرم شده و به طور کامل مهار می‌شود. سپس بوسیله دمیدن گاز با فشار در داخل قالب شکل می‌گیرد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی این روش جهت شکل‌دهی

دما برای هر دو مرحله کشش عمیق و شکل‌دهی داغ با گاز 475 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. البته اشاره شده که با کاهش دما می‌توان به پروفیل ضخامت بهتری در مرحله کشش عمیق رسید.

لو و همکاران [11] در تحقیقی دیگر بکمک آزمایشات تجربی تایید کردند که روش ترکیبی کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز در مقایسه با فرایند شکل‌دهی با گاز یک مرحله‌ای، می‌تواند به نسبت ابعاد بالا دست یافت. زمان شکل‌دهی به طور قابل توجهی کاهش یافته و حداکثر نازک شدگی از بالای 50 درصد به حدود 30 درصد کاهش می‌یابد. آلیاژهای مورد استفاده AA5083، AA5182 و AZ31 بوده است و دمای شکل‌دهی برای هر دو مرحله شکل‌دهی 450 درجه در نظر گرفته شده است.

لیو و همکاران [12] شکل‌دهی قطعه پله‌ای از جنس AA5083 تجاری را به صورت تجربی بررسی نمودند. نشان داده شد که برای این نوع شکل‌دهی حتماً نیاز به طراحی پیش فرم‌های خاص به منظور رسیدن به توزیع ضخامت مطلوب می‌باشد. فرایند در محدوده دمایی 400، 475 و 525 درجه سانتی‌گراد انجام شد.

لیو و همکاران [13] در پژوهشی دیگر تحقیقات خود را بر روی آلیاژ AA5083 و فرایند دو مرحله‌ای با بهینه‌سازی منحنی فشار و استفاده از سنبه در دو مرحله ادامه دادند. در این پژوهش هدف بررسی تغییرات ریزساختاری و اندازه دانه بوده است. همچنین آنها [14] تحقیق خود را بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V تکرار کردند. قطعه تیتانیومی در دمای 800 درجه سانتی‌گراد به خوبی شکل گرفته است.

با وجود پارامترهای بسیار زیاد در این فرایند که شامل دو مرحله کاملاً متفاوت می‌باشد، در تحقیقات انجام شده تاکنون از هیچ روش نظام‌مندی برای بررسی تأثیر این پارامترها استفاده نشده است. هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای فرایند در نحوه‌ی شکل‌گیری و توزیع ضخامت یک قطعه مکعبی است. به همین منظور 4 پارامتر شامل دمای شکل‌دهی و نیروی ورغیر در مرحله کشش عمیق، و دمای شکل‌دهی و فشار گاز در مرحله شکل‌دهی با گاز به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده و تأثیر آنها با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- آزمایشات تجربی

به منظور شکل‌دهی قطعه مکعبی با ابعاد مورد نظر آلیاژ آلومینیوم 5083 تجاری به ضخامت 1 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد ورق اولیه 190 × 190 میلی‌متر می‌باشد. در شکل 2 نمایی از اجزای فرایند نشان داده

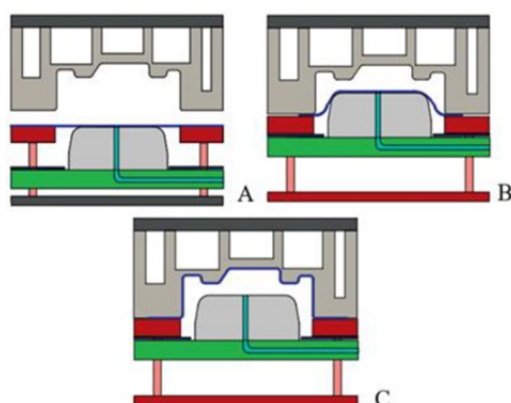


Fig. 1 Schematic of the hot HDMP_GF process

شکل 1 طرح شماتیک فرایند ترکیبی کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز [9]

بدون اینکه ماده در داخل حفره قالب در طول فرایند اضافه شود. این امر ممکن است منجر به نازک شدگی شدید و یا توزیع ضخامت غیریکنواخت شود، که توانایی برای شکل‌دهی قطعات پیچیده را محدود می‌نماید. به طور معمول نرخ کرنش در این روش پایین می‌باشد، و لذا زمان شکل‌دهی نسبتاً طولانی است. همچنین دلیل کرنش کششی ماده در دمای بالا و مدت زمان طولانی احتمال حفره‌دار شدن ماده در این فرایند افزایش می‌یابد [2].

یک راهکار ارائه شده برای کنترل توزیع ضخامت غیر یکنواخت در قطعه نهایی، استفاده از ورق اولیه با توزیع ضخامت متفاوت است. کیم و همکاران [3] توزیع ضخامت اولیه و بهینه ورق برای بالج ساده و شکل مخروطی از جنس آلیاژ سوپرال 150 را بررسی کردند. ابتدا ورق اولیه با ضخامت یکنواخت شبیه‌سازی شد، سپس اختلاف نتیجه با هدف اندازه‌گیری و به کمک خطای موجود، توزیع ضخامت ورق مجدداً تعیین گردید. این فرایند تا زمان رسیدن به هدف مورد نظر تکرار شد. هانگ و همکاران [4] با روش کنترل متناسب¹ توزیع ضخامت در بالج ساده، ورقی از جنس آلیاژ سرب-قلع را بهینه‌سازی کردند. شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس انجام شد.

راهکار دیگر ارائه شده برای کنترل توزیع ضخامت، روش شکل‌دهی با گاز دو مرحله‌ای² است. در این روش، از دو مرحله شکل‌دهی با گاز در داخل یک قالب استفاده می‌شود [5]. در مرحله اول شکل‌دهی، ماده با فشار وارد حفره پیش فرم می‌شود. سپس فشار گاز معکوس در مرحله دوم اعمال می‌شود، که ماده با فشار وارد حفره قطعه نهایی می‌گردد. این تکنولوژی بر مبنای کارهای ناکامورا و فیسچر است [6]. لاک و همکاران [7] بهینه‌سازی ضخامت را به کمک فرایند شکل‌دهی با گاز دو مرحله‌ای بررسی نمودند. قطعه مورد بررسی از جنس آلومینیوم 5083 بود. تولید این قطعه در یک مرحله با کاهش ضخامت در حدود 60 درصد و گلوئی موضعی در دهانه قالب همراه است. شمسی و همکاران [8] نیز به منظور شکل‌دهی قطعات مخروطی ناقص از فرایند دو مرحله‌ای استفاده نمودند. در این تحقیق از روش آنالیز حساسیت به منظور بهینه‌سازی پیش فرم استفاده گردید و نتایج نشان داد که روش آنالیز حساسیت برای طراحی قالب پیش فرم بسیار کارآمد است.

بکمک فرایند شکل‌دهی با گاز دو مرحله‌ای، مسئله کنترل توزیع ضخامت تا حدودی برطرف گردید. اما همچنان دو مشکل دیگر شامل زمان شکل‌دهی طولانی و احتمال حفره‌دار شدن وجود دارد. به منظور حل مشکلات باقی مانده یک فرایند ترکیبی جدید شامل کشش عمیق گرم و شکل‌دهی با گاز توسعه یافته است. این ایده اولین بار توسط فریدمن ارائه شد [9]. در فرایند جدید از دو مرحله برای شکل‌دهی قطعات استفاده می‌شود. در شکل 1 مراحل مربوط به این فرایند نشان داده شده است. در مرحله اول که مرحله پیش فرم‌دهی به حساب می‌آید، ورق با استفاده از کشش عمیق گرم شکل‌دهی می‌شود تا ماده بیشتری درون حفره قالب شده و مشکل کمبود ماده برطرف شود (شکل 1 A, B). در مرحله دوم قالب کاملاً بسته شده و فرایند دمش گاز انجام می‌شود. گاز از درون سنبه دمیده شده و ورق پس از چسبیدن به قالب شکل قطعه نهایی را به خود می‌گیرد (شکل 1 C).

لو و همکاران [10] تغییر شکل سه آلیاژ آلومینیوم AA5083 با خاصیت سوپرپلاستیک، آلومینیوم AA5183 تجاری و AZ31 تجاری را با استفاده از فرایند ترکیبی کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز³ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شکل‌دهی برای هر سه ماده موفقیت آمیز می‌باشد.

¹ Proportional control method

² Two stage gas forming (TSGF)

³ Hot Draw Mechanical Preform-Gas Forming (HDMP-GF)

(B) ایجاد شده که با اعمال نیروی پرس باعث جلوگیری از خروج گاز می شود. سپس لوله انتقال گاز به سنبه وصل شده و گاز با فشار معین و به مدت 8 دقیقه به درون قالب دمیده می شود تا قطعه نهایی شکل گیرد. پس از اتمام فرایند قالب باز شده و قطعه شکل داده شده از قالب خارج می شود. در شکل های 5 و 6 به ترتیب نمونه های از قطعات تولید شده در مراحل کشش عمیق گرم و شکل دهی با گاز نشان داده شده است.

به منظور اندازه گیری ضخامت، مطابق شکل 7 نمونه ها در دو جهت متفاوت بریده شدند. مقطع شماره 1 در راستای گوشه مکعب و مقطع شماره 2 در راستای وسط اضلاع مکعب می باشد. جهت بررسی توزیع ضخامت مطابق شکل 8 مقاطع اشاره شده به 4 منطقه تقسیم گردید. منطقه A محدوده کف نمونه، منطقه B محدوده گوشه، منطقه C محدوده دیواره، و منطقه D محدوده لبه نمونه می باشد. اندازه گیری با ضخامت سنج با دقت 5 هزارم میلی متر انجام شد.

3- طراحی آزمایش با روش تاگوچی

به منظور بررسی اثر پارامترها از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و نرم افزار مینی تب استفاده شده است. در طراحی این آزمایش چهار متغیر با 4 سطح مطابق با جدول 1 در نظر گرفته شده است و با توجه به جداول استاندارد روش تاگوچی ماتریس آزمایشات 4 متغیره، با 4 سطح انتخاب شد که در جدول 2 نشان داده شده است.



Fig. 4 The stage of gas forming process

شکل 4 مرحله شکل دهی نهایی با فرایند شکل دهی داغ با گاز



Fig. 5 A deformed part after deep drawing process

شکل 5 قطعه شکل داده شده پس از مرحله کشش عمیق گرم



Fig. 6 A deformed part after gas forming process

شکل 6 قطعه شکل داده شده پس از مرحله شکل دهی با گاز

شده است. سنبه (C) با ابعاد $80 \times 80 \times 40$ و حفره قالب نهایی (A) با ابعاد $90 \times 90 \times 50$ میلی متر ساخته شد. شعاع نوک سنبه 25 میلی متر، لبه قالب 12 میلی متر و انتهای قالب 20 میلی متر می باشد. سرعت حرکت سنبه 6 میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای اعمال نیروی ورقگیر (B) از 4 فنر استفاده شده و نیروی اعمالی از طریق اندازه گیری میزان فشردگی فنرها تعیین گردید.

گرمایش قالب با استفاده از هیترهای 1.5 کیلووات و 2 کیلووات در درون قالب انجام می گیرد، و یک کنترلر دمای تفاضلی وظیفه کنترل دما را بر عهده دارد. به منظور کاهش اتلاف حرارتی و تغییرات دما در هنگام آزمایش از پشم سنگ برای عایق بندی دیواره های قالب و از لایه های مخصوص از جنس الیاف نسوز برای عایق بندی کف استفاده شده است. مقدار تغییرات دما در طول فرایند در حدود ± 2 درجه سانتی گراد بوده است. همچنین جهت روان کاری قالب از گرافیت استفاده گردید.

نمایی از مرحله کشش عمیق گرم برای تولید پیش فرم در شکل 3 نشان داده شده است. در این مرحله ابتدا ورق بین قالب و ورقگیر قرار می گیرد و مجموعه توسط هیترها، گرم می شود تا ورق به دمای مطلوب برسد. سپس فنرها فشرده شده تا باعث ایجاد نیروی ورقگیر مناسب با توجه به سختی فنر گردد. با حرکت فک پرس سنبه به درون حفره قالب وارد شده و باعث شکل دهی ورق به شکل پیش فرم می شود. زمان انجام این مرحله در حدود 7 ثانیه می باشد.

مرحله شکل دهی با گاز برای تولید قطعه نهایی در شکل 4 نشان داده شده است. در این مرحله برای کنترل فشار گاز از یک رگلاتور با فشار ثابت استفاده شده است. جهت آبنندی کردن سه ردیف شیر در قسمت ورقگیر

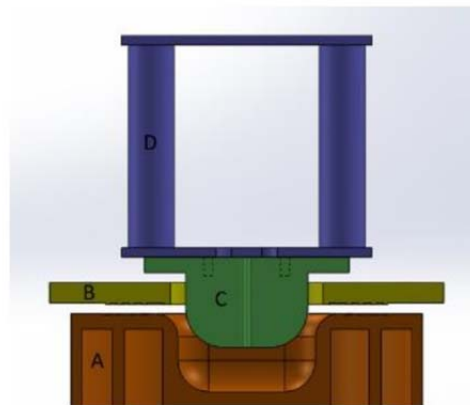


Fig. 2 Schematic of the HDMP_GF process equipment

شکل 2 نمایی از مجموعه قالب مورد استفاده در فرایند ترکیبی HDMP_GF



Fig. 3 The stage of deep drawing process

شکل 3 مرحله پیش فرم دهی با فرایند کشش عمیق گرم

مرحله کشش عمیق گرم به دلیل انتخاب نیروی ورقگیر و دمای شکل دهی پایین، دچار چروکیدگی شدید شد. به گونه ای که قابل کلمپ کردن و آب بندی جهت انجام مرحله شکل دهی با گاز نبود. لذا توزیع ضخامت آن اندازه گیری نگردید. همچنین در آزمایش شماره 16، نمونه در مرحله کشش عمیق گرم به دلیل انتخاب نیروی ورقگیر و دمای شکل دهی بالا، دچار پارگی شد و توزیع ضخامت آن اندازه گیری نگردید. در شکل 10 نمونه آزمایش شماره 16 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود پارگی در ناحیه شعاع گوشه قالب اتفاق افتاده است. در شکل های 11 و 12 به ترتیب منحنی توزیع ضخامت برای مسیرهای 1 و 2 حاصل از آزمایشات آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین نازک شدگی در دو ناحیه لبه نمونه (D) و گوشه نمونه (B) رخ داده است. با توجه به بحرانی تر بودن مسیر 1 نسبت به مسیر 2، در ادامه کلیه بررسی ها بر روی مسیر 1 انجام شده است.

4-1- بررسی اثر دمای کشش عمیق

برای مرحله کشش عمیق محدوده دمایی 300 درجه سانتی گراد تا 450 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. محدوده مورد نظر با توجه به تحقیقات انجام



Fig. 9 The wrinkled specimen from experiment No. 1

شکل 9 نمونه چروک خورده حاصل از آزمایش شماره 1



Fig. 10 The ruptured specimen from experiment No. 16

شکل 10 نمونه پاره شده حاصل از آزمایش شماره 16

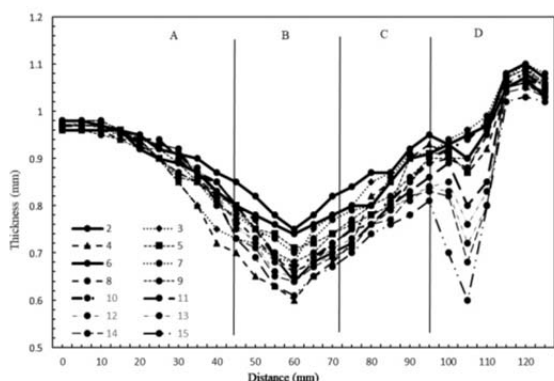


Fig. 11 The thickness distribution along path 1

شکل 11 منحنی توزیع ضخامت برای مسیر 1

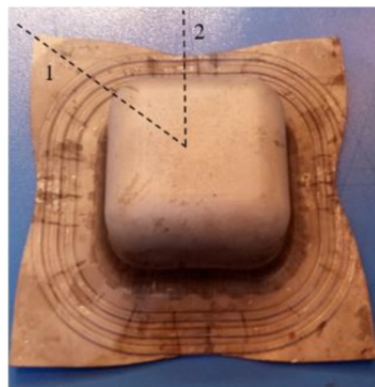


Fig. 7 the paths of thickness measurement

شکل 7 مقاطع اندازه گیری ضخامت

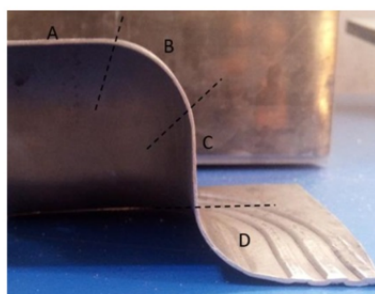


Fig. 8 The zones of thickness measurement

شکل 8 نواحی اندازه گیری توزیع ضخامت قطعه

جدول 1 متغیرهای فرایند

Table 1 The process parameters

نام پارامتر	1	2	3	4
دمای شکل دهی کشش عمیق (°C)	300	350	400	450
نیروی ورقگیر (N)	500	1000	1500	2000
دمای شکل دهی با گاز (°C)	450	485	510	550
فشار گاز (MPa)	0.3	0.6	0.9	1.2

جدول 2 ترکیب سطوح متغیرها براساس جداول استاندارد روش تاگوچی

Table 2 Parameters level based on Taguchi method

شماره آزمایش	دمای کشش عمیق (°C)	نیروی ورقگیر (N)	دمای شکل دهی با گاز (°C)	فشار گاز (MPa)
1	300	500	450	0.3
2	300	1000	485	0.6
3	300	1500	510	0.9
4	300	2000	550	1.2
5	350	500	485	0.9
6	350	1000	450	1.2
7	350	1500	550	0.3
8	350	2000	510	0.6
9	400	500	510	1.2
10	400	1000	550	0.9
11	400	1500	450	0.6
12	400	2000	485	0.3
13	450	500	550	0.6
14	450	1000	510	0.3
15	450	1500	485	1.2
16	450	2000	450	0.9

4- نتایج و بحث

تمامی آزمایشات با توجه به ترکیب سطوح و مطابق جدول 2 انجام گردیده است. همان طور که در شکل 9 مشاهده می شود در آزمایش شماره 1 نمونه در

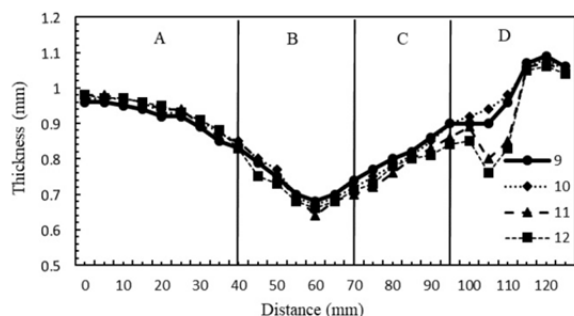


Fig. 15 Thickness distribution at drawing temp. of 400 °C

شکل 15 نمودار توزیع ضخامت در دمای کشش عمیق 400 درجه سانتی‌گراد

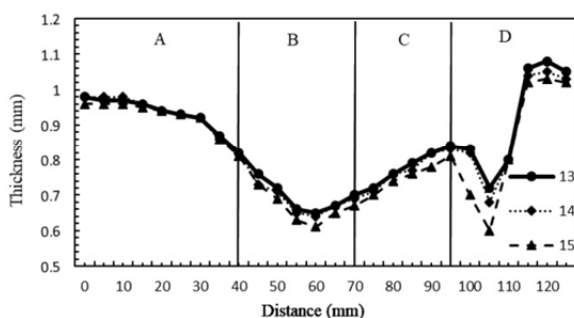


Fig. 16 Thickness distribution at deep drawing temp. of 450 °C

شکل 16 نمودار توزیع ضخامت در دمای کشش عمیق 450 درجه سانتی‌گراد

عمیق، استحکام ماده کاهش یافته و منجر به نازک شدن بیشتر می‌شود. اما با توجه به اینکه در این پژوهش از فرایند کشش عمیق غیر هم دما استفاده شده است، بدلیل سرد بودن سنبه از اثر تغییرات دما در ناحیه گوشه نمونه (B) کاسته شده و بیشترین تغییرات در ناحیه لبه نمونه (D) ایجاد شده است [15].

در جدول 3 نتایج حاصل از تحلیل آماری برای پارامتر دمای کشش عمیق آورده شده است. اطلاعات ارایه شده نشان می‌دهد که اگر پارامتر مورد نظر در هر یک از سطوح 1 تا 4 قرار گیرد به طور میانگین ضخامت قطعه حاصل برابر مقداری می‌شود که در ستون سمت چپ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده دمایی 350 و 400 درجه سانتی‌گراد باعث ایجاد نازک شدن در حدود 30 تا 35 درصد می‌گردد. با کاهش و یا افزایش دما از این محدوده نمونه دچار کاهش ضخامت می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها واریانس نشان می‌دهد که تأثیر دمای مرحله کشش عمیق گرم در توزیع ضخامت از درجه دوم اهمیت در کل فرایند برخوردار است. با توجه به نتایج فوق دمای 350 درجه سانتی‌گراد به عنوان سطح مناسب برای این پارامتر تعیین گردیده است.

جدول 3 نتایج تحلیل آماری برای اثر پارامتر دمای کشش عمیق در توزیع ضخامت میانگین

Table 3 The results of statistical analysis for the effect of the deep drawing temperature on the average thickness distribution

ضخامت میانگین (mm)	سطوح
0.5325	1
0.6975	2
0.6625	3
0.4975	4
2	درجه تأثیر بر فرایند

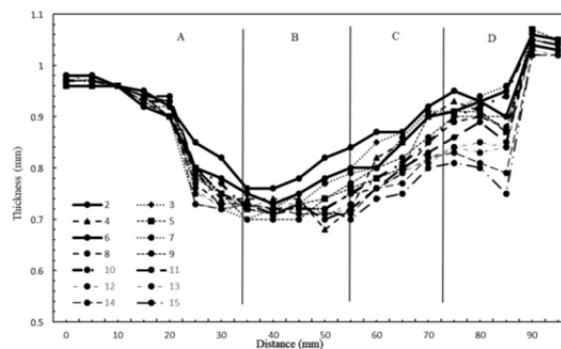


Fig. 12 The thickness distribution along path 2

شکل 12 منحنی توزیع ضخامت برای مسیر 2

شده در رابطه با کشش عمیق گرم آلومینیوم 5083 تعیین گردد [15]. بطور کلی در فرایند کشش عمیق گرم دمای مورد نظر باید در محدوده‌ای باشد تا با کاهش تنش سیلان ماده، ورق بتواند به بدون پارگی و با حداقل نازک شدن تغییر شکل پیدا نماید. از سوی دیگر دمای بسیار بالا باعث خواهد شد تا استحکام ماده آنقدر کاهش یابد که در لبه‌های سنبه یا قالب، ورق دچار نازک شدن شدید گردد. در شکل‌های 13 الی 16 به ترتیب نمودار مربوط به توزیع ضخامت در دمای کشش عمیق یکسان آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای کشش عمیق میزان نازک‌شدگی نمونه‌ها افزایش یافته است. بیشترین تغییرات ضخامت در ناحیه شعاع لبه نمونه (D) اتفاق افتاده، و به تدریج حداکثر نازک‌شدگی از ناحیه گوشه نمونه (B) به ناحیه لبه نمونه (D) منتقل شده است. بگونه‌ای که نمونه شماره 16 همان‌طور که اشاره شد (شکل 10) از ناحیه گوشه قالب دچار پارگی شده است. علت این تغییرات ناشی از آن است که با افزایش دمای کشش

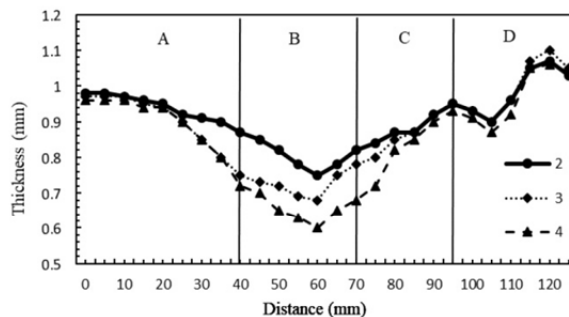


Fig. 13 Thickness distribution at drawing temp. of 300 °C

شکل 13 نمودار توزیع ضخامت در دمای کشش عمیق 300 درجه سانتی‌گراد

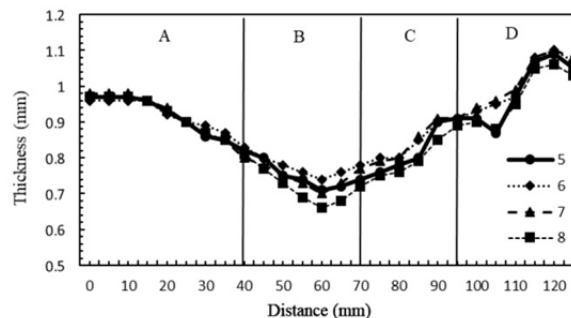


Fig. 14 Thickness distribution at drawing temp. of 350 °C

شکل 14 نمودار توزیع ضخامت در دمای کشش عمیق 350 درجه سانتی‌گراد

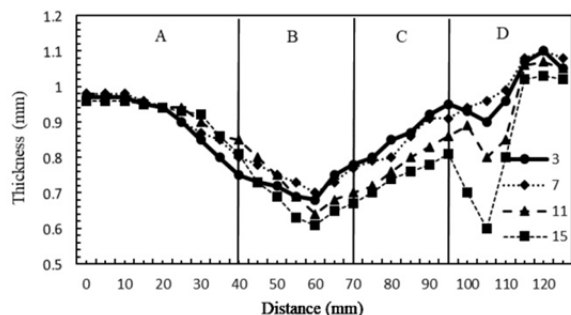


Fig. 19 Thickness distribution at blankholder load of 1500 N

شکل 19 نمودار توزیع ضخامت در نیروی ورقگیر 1500 نیوتن

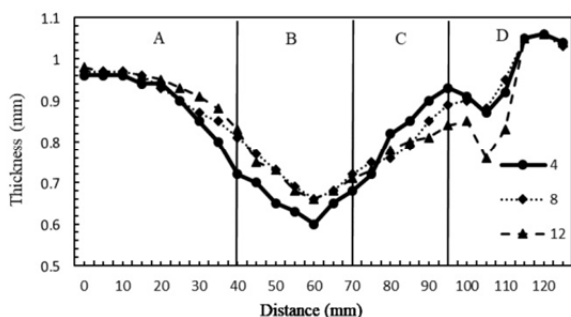


Fig. 20 Thickness distribution at blankholder load of 2000 N

شکل 20 نمودار توزیع ضخامت در نیروی ورقگیر 2000 نیوتن

جدول 4 نتایج تحلیل آماری برای اثر پارامتر نیروی ورقگیر در توزیع ضخامت میانگین

Table 4 The results of statistical analysis for the effect of the blank holder force on the average thickness distribution

ضخامت میانگین (mm)	سطوح
0.5300	1
0.6975	2
0.6575	3
0.5050	4
3	درجه تأثیر بر فرایند

3-4- بررسی اثر دمای شکل‌دهی با گاز

به منظور بررسی اثر دمای شکل‌دهی با گاز چهار سطح 450، 485، 510 و 550 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. این محدوده دمایی با توجه به نتایج کارهای دیگران انتخاب شده است [10-12]. علت افزایش دما در این مرحله کاهش استحکام ماده و امکان انجام شکل‌دهی با دمش گاز می‌باشد. در شکل‌های 21 الی 24 نمودار مربوط به توزیع ضخامت در دمای شکل‌دهی با گاز یکسان آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات در دو ناحیه کف نمونه (A) و گوشه نمونه (B) ایجاد شده است. از آنجاکه شکل پیش‌فرم بعد از مرحله کشش عمیق شبیه به هرم ناقص است (شکل 5)، فاصله پیش‌فرم تا دیواره‌های قالب کمتر از کف قالب می‌باشد. لذا دیواره نمونه پیش‌فرم شده در مرحله شکل‌دهی با گاز به سرعت به دیواره‌های قالب می‌چسبد، و عملاً ضخامت نمونه در نواحی لبه (D) و دیواره (C) تغییر قابل توجهی ندارد. این نشان می‌دهد که پارامتر دمای مرحله شکل‌دهی با گاز در کنترل ضخامت در نواحی که دیرتر به قالب می‌چسبند مانند ناحیه B تأثیر بسیار بیشتری دارد.

4-2- بررسی اثر نیروی ورقگیر

به منظور بررسی اثر نیروی ورقگیر از چهار سطح نیرو 500، 1000، 1500 و 2000 نیوتن استفاده شده است. بطور کلی نیروی زیاد ورقگیر باعث پارگی و نازک شدگی ورق در حین فرایند کشش عمیق می‌گردد. از سوی دیگر، نیروی کم ورقگیر باعث چروکیدگی ورق در ناحیه ورقگیر و دیواره‌ها می‌شود. نمونه‌های شماره 1 تا 4 در دمای کشش عمیق 300 درجه سانتی‌گراد شکل‌دهی شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد نمونه شماره 1 بدلیل نیروی کم ورقگیر دچار چروکیدگی شدید در ناحیه لبه (فلنج) شده و امکان کلمپ آن در مرحله بعد وجود نداشت. اما در نمونه‌های 2 تا 4 با افزایش نیروی ورقگیر از میزان چروکیدگی کاسته شده و آزمایش بطور کامل انجام گردید. در شکل‌های 17 الی 20 نمودار مربوط به توزیع ضخامت در نیروی ورقگیر یکسان آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به تدریج با افزایش نیروی ورقگیر نازک شدگی افزایش می‌یابد اما تغییرات در ناحیه لبه نمونه (D) بیشتر است. بگونه‌ای که حداکثر نازک شدگی به این ناحیه منتقل شده است. البته این تغییر رفتار نشان دهنده تأثیر متقابل دو پارامتر نیروی ورقگیر و دمای کشش عمیق بر یکدیگر می‌باشد.

پس از ورود اطلاعات مربوط به کمترین ضخامت قطعه برای نمونه‌های شکل داده شده و انجام تحلیل‌های آماری، داده‌های جدول 4 برای ضخامت میانگین سطوح مختلف پارامتر نیروی ورقگیر استخراج گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده نیروی ورقگیر 1000 و 1500 نیوتنی باعث تولید نازک شدگی در حدود 30 تا 35 درصد بطور میانگین می‌گردد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که درجه اهمیت پارامتر نیروی ورقگیر از جایگاه سوم برخوردار است. با توجه به نتایج فوق نیروی ورقگیر 1000 نیوتن به عنوان نیروی ورقگیر مناسب در نظر گرفته شد. این نیرو باعث ایجاد چروکیدگی جزئی در ناحیه ورقگیر می‌شود ولی در نهایت توزیع ضخامت بهتری را برای مرحله کشش عمیق ایجاد می‌کند.

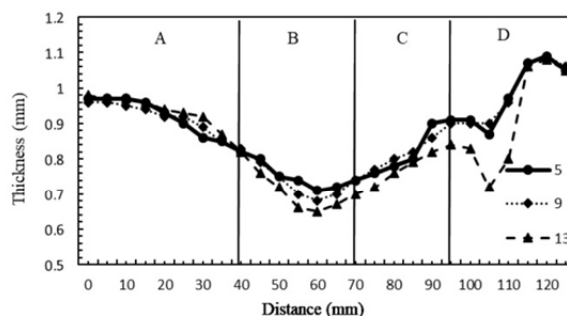


Fig. 17 Thickness distribution at blankholder load of 500 N

شکل 17 نمودار توزیع ضخامت در نیروی ورقگیر 500 نیوتن

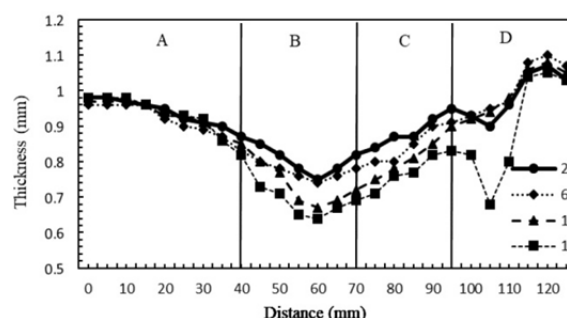


Fig. 18 Thickness distribution at blankholder load of 1000 N

شکل 18 نمودار توزیع ضخامت در نیروی ورقگیر 1000 نیوتن

در گوشه سنبه در مرحله کشش عمیق شکل می‌گیرد، و سپس در گوشه قالب پس از مرحله شکل‌دهی با گاز ایجاد می‌شود. لذا توزیع ضخامت در این ناحیه در هر دو مرحله تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در جدول 5 نتایج تحلیل آماری پارامتر دمای مرحله شکل‌دهی با گاز و پیش‌بینی میانگین ضخامت برای سطوح مختلف آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده تأثیرگذاری این پارامتر دارای درجه اول اهمیت می‌باشد. این موضوع نشان دهنده این است که با وجود اینکه در این فرایند ترکیبی بخش عمده‌ای از شکل‌دهی در مرحله کشش عمیق اتفاق می‌افتد، ولی به دلیل ماهیت کششی فرایند در مرحله شکل‌دهی با گاز و از سوی دیگر تماس ورق با قالب و اثر اصطکاک، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در توزیع ضخامت قطعه نهایی داشته باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدوده دمایی بالای 485 درجه سانتی‌گراد باعث تولید ضخامت بهتری در قطعه می‌گردد.

4-4- بررسی اثر فشار گاز

به منظور بررسی اثر فشار گاز چهار سطح 0.3، 0.6، 0.9 و 1.2 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در شکل‌های 25 تا 28 نمودار مربوط به توزیع ضخامت در فشار گاز یکسان نشان داده شده است. بیشترین تغییرات در ناحیه گوشه نمونه (B) مشاهده می‌شود. اما روند این تغییرات یکنواخت نمی‌باشد.

از یک طرف با افزایش فشار گاز، چسبندگی ورق به دیواره قالب افزایش یافته و جریان ماده جهت پرکردن گوشه قالب به سختی انجام شده و لذا می‌تواند منجر به نازک‌شدگی بیشتر در گوشه نمونه شود. از طرف دیگر افزایش دمای شکل‌دهی با گاز نیز می‌تواند منجر به افزایش اصطکاک و چسبندگی ورق به دیواره قالب شود. بنابراین این تغییرات نشان دهنده تأثیر متقابل دو پارامتر فشار گاز و دمای شکل‌دهی با گاز بر یکدیگر می‌باشد.

برای بررسی دقیق‌تر این پارامتر نتایج حاصل از تحلیل آماری در جدول 6 آورده شده است. تغییرات متناوب این پارامتر در سطوح مختلف تایید کننده این امر است که عملاً اثر فشار گاز در توزیع ضخامت تحت تأثیر سایر

جدول 5 نتایج تحلیل آماری اثر پارامتر دمای شکل‌دهی با گاز در توزیع ضخامت میانگین

Table 5 The results of statistical analysis for the effect of the Gas forming temperature on the average thickness distribution

سطوح	ضخامت میانگین (mm)
1	0.3925
2	0.6750
3	0.6650
4	0.6575
درجه تأثیر بر فرایند	1

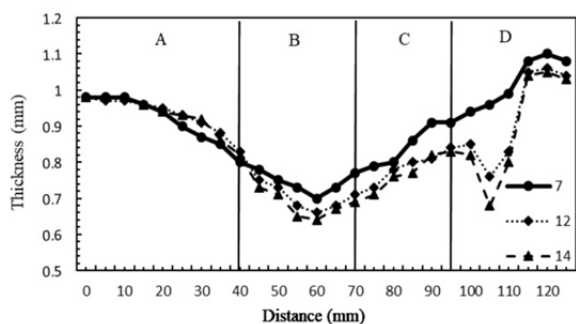


Fig. 25 Thickness distribution at gas pressure of 0.3 MPa

شکل 25 نمودار توزیع ضخامت در فشار گاز 0.3 مگاپاسکال

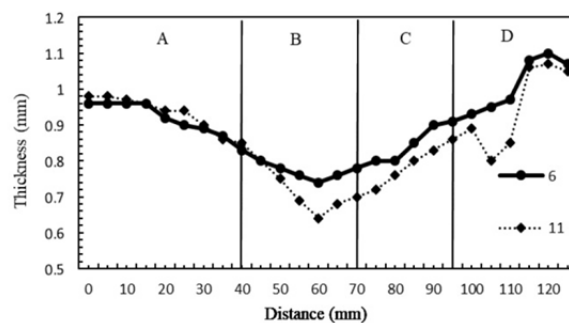


Fig. 21 Thickness distribution at forming temp. of 450 C°

شکل 21 نمودار توزیع ضخامت در دمای شکل‌دهی با گاز 450 درجه سانتی‌گراد

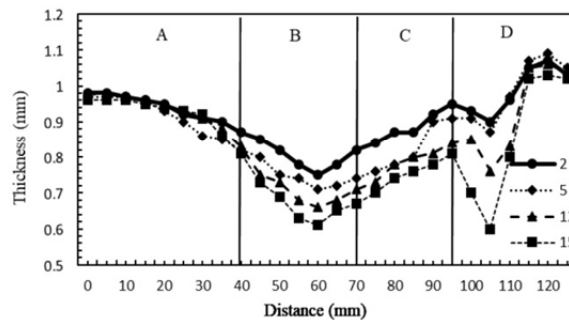


Fig. 22 Thickness distribution at forming temp. of 485 C°

شکل 22 نمودار توزیع ضخامت در دمای شکل‌دهی با گاز 485 درجه سانتی‌گراد

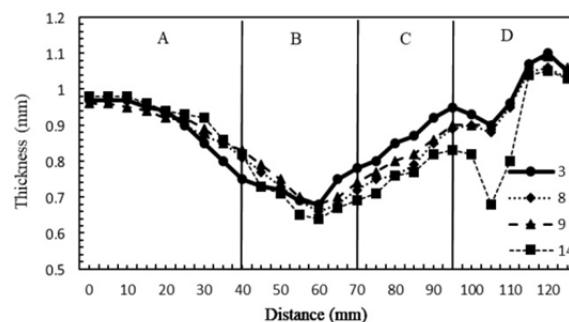


Fig. 23 Thickness distribution at forming temp. of 510 C°

شکل 23 نمودار توزیع ضخامت در دمای شکل‌دهی با گاز 510 درجه سانتی‌گراد

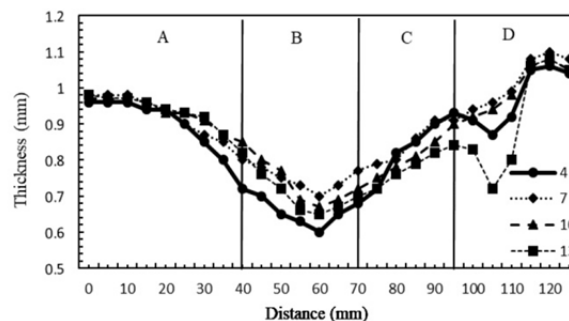


Fig. 24 Thickness distribution at forming temp. of 550 C°

شکل 24 نمودار توزیع ضخامت در دمای شکل‌دهی با گاز 550 درجه سانتی‌گراد

از آنجاکه قطعه در ناحیه لبه و دیواره به سرعت به قالب می‌چسبد عملاً توزیع ضخامت آن به رفتار مرحله کشش عمیق مربوط می‌شود. ولی ناحیه B ابتدا

درجه سانتی‌گراد، نیروی ورق‌گیر کشش عمیق 1000 نیوتن، دمای شکل‌دهی با گاز 485 درجه سانتی‌گراد و فشار شکل‌دهی با گاز 0.6 مگاپاسکال تعیین گردید. ترکیب بالا در هیچ کدام از آزمایش‌های انجام شده وجود نداشته است. به همین منظور یک آزمایش با این ترکیب سطوح پارامترها انجام شد که توزیع ضخامت نمونه حاصل در طول مسیر شماره 1 در شکل 29 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نازک شدگی تا 22 درصد بهبود پیدا کرده است. در شکل 30 تصویر قطعه شکل داده شده با استفاده از این سطوح پارامترها نشان داده شده است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک فرایند شکل‌دهی ترکیبی شامل کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با گاز برای تولید قطعات مکعبی از جنس ورق آلیاژ آلومینیوم 5083 مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرایند در مرحله اول با استفاده از کشش عمیق گرم پیش‌فرم ایجاد شده و در مرحله دوم به کمک شکل‌دهی داغ با گاز قطعه نهایی تولید می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای فرایند شامل دما و نیروی ورق‌گیر در مرحله کشش عمیق و دما و فشار گاز اعمالی در مرحله شکل‌دهی با گاز بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که در دمای 350 درجه سانتی‌گراد و نیروی ورق‌گیر 1000 نیوتن برای کشش عمیق و همچنین دمای 485 درجه سانتی‌گراد و فشار 0.6 مگاپاسکال برای مرحله شکل‌دهی با گاز می‌توان به کمترین میزان

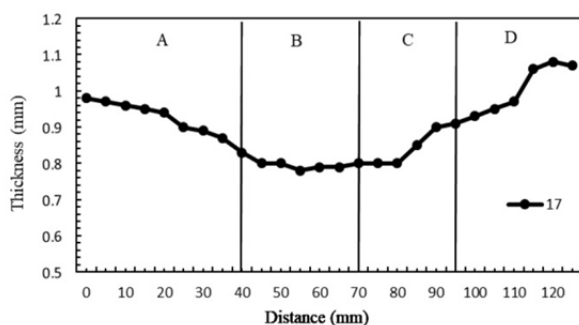


Fig. 29 Thickness distribution at optimal level of process parameters
شکل 29 نمودار توزیع ضخامت در حالت پارامترهای مناسب

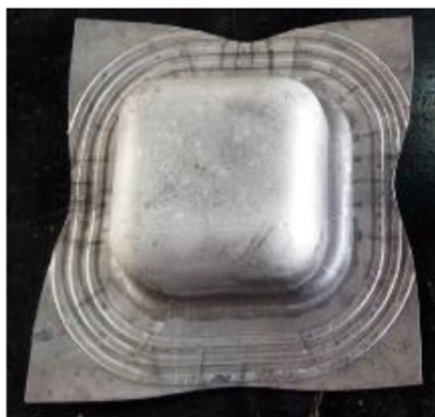


Fig. 30 Formed part by optimal level of process parameters
شکل 30 قطعه شکل داده شده با سطوح پارامترهای مناسب

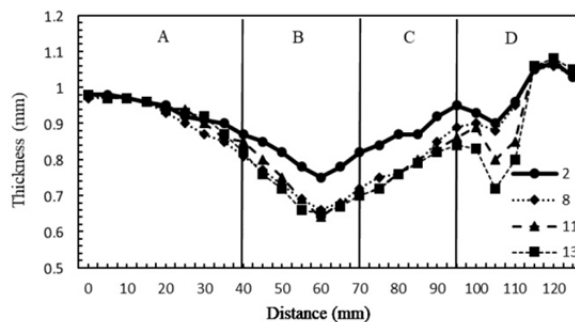


Fig. 26 Thickness distribution at gas pressure of 0.6 MPa
شکل 26 نمودار توزیع ضخامت در فشار گاز 0.6 مگاپاسکال

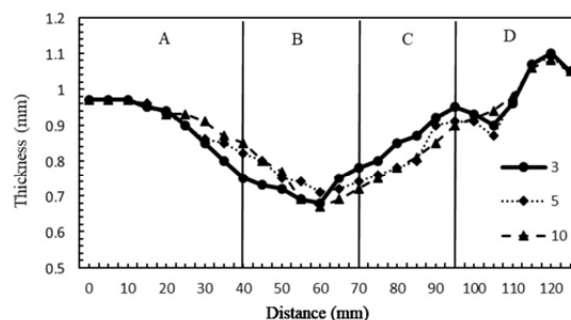


Fig. 27 Thickness distribution at gas pressure of 0.9 MPa
شکل 27 نمودار توزیع ضخامت در فشار گاز 0.9 مگاپاسکال

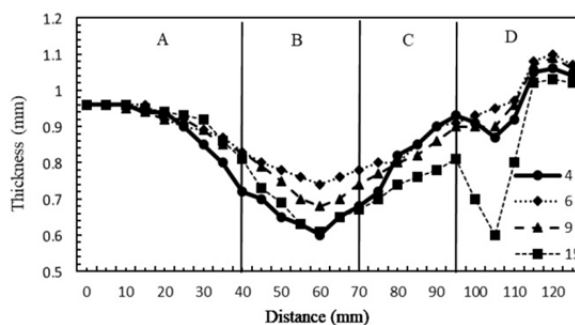


Fig. 28 Thickness distribution at gas pressure of 1.2 MPa
شکل 28 نمودار توزیع ضخامت در فشار گاز 1.2 مگاپاسکال

پارامترها می‌باشد. با توجه به نتایج تحلیل واریانس حاصل درجه اهمیت این پارامتر در رتبه چهارم می‌باشد. برای این پارامتر فشار 0.6 مگاپاسکال به عنوان فشار مناسب انتخاب گردیده است.

4-5 ترکیب مناسب پارامترها

با توجه به نتایج حاصل از بررسی پارامترها، ترکیب مناسب سطوح پارامترها برای رسیدن به توزیع ضخامت یکنواخت به ترتیب دمای کشش عمیق 350

جدول 6 نتایج تحلیل آماری برای اثر پارامتر فشار گاز در توزیع ضخامت میانگین
Table 6 The results of statistical analysis for the effect of the Gas pressure on the average thickness distribution

ضخامت میانگین (mm)	سطوح
0.5275	1
0.6750	2
0.5350	3
0.6525	4
4	درجه تأثیر بر فرایند

- [7] G. Luckey, P. Friedmana, K. Weinmann, Design and experimental validation of a two-stage superplastic forming die, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 2152–2160, 2009
- [8] A. Shamsi-Sarband, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi-Jooybari, M. Shakeri, The effect of geometric parameters of conical cups on the preform shape in Two-Stage Superplastic forming process, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 12, pp. 3601–3608, 2013
- [9] P. A. Friedman, Method and apparatus for Superplastic Forming, *U.S. Patent Number* 6,581,428, 2003
- [10] Y. Luo, S. G. Luckey, P. A. Friedman, Y. Peng, Development of an advanced superplastic forming process utilizing a mechanical pre-forming operation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 12, pp. 1509–1518, 2008
- [11] Y. Luo, S. G. Luckey, W. B. Copple, P. A. Friedman, Comparison of Advanced SPF die technologies in the forming of a production panel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 17, No. 2, pp. 142–152, 2008
- [12] J. Liu, M. J. Tan, Y. Aue-u-lan, A. W. Jarfors, et al, Superplastic-like forming of non-superplastic AA5083 combined with mechanical pre-forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 1, pp. 123–129, 2011
- [13] J. Liu, M. J. Tan, C. V. Lim, B. W. Chua, Process optimization and microstructural development during superplastic-like forming of AA5083, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 2415–2422, 2013.
- [14] J. Liu, M. J. Tan, Y. Aue-u-lan, M. Guo, et al, Superplastic-like forming of Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5, pp. 1097–1104, 2013
- [15] A. Barimani Varandi, S. J. Hosseinipour, Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 187–194, 2014. (in Persian)

نازک شدگی دست یافت. در این شرایط حداکثر نازک شدگی 22 درصد بدست آمده است.

با توجه به نتایج حاصل، فرایند ترکیبی کشش عمیق گرم و شکل‌دهی داغ با دمش گاز می‌تواند به عنوان یک فرایند تولید کارآمد جهت تولید قطعاتی که با استفاده از فرایند شکل‌دهی با گاز یا فرایند کشش عمیق به تنهایی قابل شکل‌دهی نیست، مورد استفاده قرار گیرد.

6- مراجع

- [1] C. H. Hamilton, A. K. Ghosh, Superplastic sheet forming, *Metals Handbook*, pp. 852–869, ASM International, 1988
- [2] L. D. Hefti, Commercial Airplane Applications of Superplastically Formed AA5083 Aluminum Sheet, *Symposium on Aluminum Applications, ASM Conference*, Pittsburgh, United States, October 13–15, 2003
- [3] Y. H. Kim, J. Lee, S. S. Hong, Optimal design of superplastic forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 3, pp. 166–173, 2001
- [4] A. Huang, A. Lowe, M. J. Cardew-Hall, Experimental validation of sheet thickness optimization for superplastic forming of engineering structures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 3, pp. 136–143, 2001
- [5] K. Nakamura, Manufacturing method of formed product having required wall thickness by Superplastic Blow Forming method, *Patent Abstract of Japan*, Vol. 4, No. 2, pp. 835–841, 1989
- [6] J. R. Fischer, Prethinning for Superplastic forming, *U.S. Patent Number* 5,823,032, 1998