



مطالعه تجربی و عددی بر روی توزیع ضخامت و دقت ابعادی AA6061 در فرآیند شکل دهی تدریجی دونقطه‌ای با استفاده از قالب انعطاف پذیر

محمد سلیمانی فر¹، محمدجواد میرنیا^{2*}، مجید الیاسی³

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- دانشیار، مهندسی مکانیک- ساخت تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی 484، mirnia@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 تیر 1399

داوری اولیه: 2 شهریور 1399

پذیرش: 10 مهر 1399

کلیدواژگان:

فرآیند شکل دهی تدریجی با استفاده

از قالب انعطاف پذیر

ضخامت لایه لاستیکی

سختی لایه لاستیکی

قالب با چیدمان جزئی

قالب با چیدمان کامل

امروزه در صنعت شکل دهی تولید قطعات با توزیع ضخامت و دقت هندسی مناسب، امری بسیار مهم و حائز اهمیت می باشد. در این تحقیق تمامی قطعات، بوسیله فرآیند نوینی بنام فرآیند شکل دهی تدریجی دو نقطه‌ای با استفاده از قالب انعطاف پذیر فرم داده می شوند. قالب انعطاف پذیر، قالبی بوده که از تعدادی پین سرکروی مجزا تشکیل شده که می توان ارتفاع هر یک از پینها را متناسب با هندسه مورد نظر تنظیم نمود. در ابتدا، تأثیر میزان ضخامت (0/5، 1/5، 3 و 6 میلی متر) و سختی (90 Shore A و 60) لایه های لاستیکی بر روی دو پارامتر توزیع ضخامت و دقت هندسی نمونه های فرم داده شده مطالعه شده است. سپس تأثیر چیدمان پین ها در قالب انعطاف پذیر با آرایش کامل و جزئی بر روی دو پارامتر ذکر شده مطالعه شده است. در انتها نیز به منظور فرم دادن هندسه ای کامل از یک قطعه، از استراتژی چند مرحله ای استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که دقت هندسی نمونه ای که بر روی لایه لاستیکی با ضخامت 0/5mm فرم داده می شود در مقایسه با ضخامت 6mm به میزان 78/3% بهبود یافته، اما میزان نازکشدگی این قطعه کار بیش از سایر قطعات می باشد. دقت هندسی قطعه کار نیز به هنگام استفاده از لایه های لاستیکی با سختی 90ShoreA در مقایسه با سختی 60Shore A، به میزان 61/77% بهبود یافته اما توزیع ضخامت قطعه بطور یکسان می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که پین ها با آرایش کامل نسبت به چیدمان جزئی در قالب های انعطاف پذیر دارای دقت هندسی و توزیع ضخامت مناسب تری در قطعات تولید شده هستند. استفاده از استراتژی چند مرحله ای در قالب انعطاف پذیر، عیب چروکیدگی را به همراه دارد.

Experimental and numerical study on the distribution of thickness and dimensional accuracy of AA 6061 in two-point incremental forming using flexible die

Mohammad Soleimanifar, Mohammad Javad Mirnia*, Majid Elyasi

Department of Mechanical engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 3 July 2020

First Decision: 23 August 2020

Accepted: 1 October 2020

Keywords:

Two point incremental forming

process with flexible die

thickness rubber layer

Hardness of the rubber layer

Die with partial arrangement

Die with full arrangement

Abstract

Nowadays, in metal forming industries, the production of parts with proper thickness distribution and geometric accuracy is very important and significant. In this research, all parts are formed by a new process called two-point incremental forming process using a flexible die. Flexible die, is a die that consists of a number of separate overhead pins that can be adjusted by the height of each pin according to the desired geometry. First, the effect of the thickness (0.5, 1.5, 3 and 6mm) and hardness (60 and 90Shore A) of rubber layers on the two parameters of thickness distribution and geometric accuracy of the formed samples has been studied. Then, the effect of the arrangement of the pins in a flexible die with full and partial layout on the two mentioned parameters has been studied. Finally, a multi-step strategy is used to form a complete geometry of a piece. The results show that the geometric accuracy of the sample formed on the rubber layer with a thickness of 0.5mm has been improved by 78.3% compared to the thickness of 6mm, but the degree of thickness of this workpiece is more than other parts. The geometric accuracy of the workpiece is also improved by 61.77% when using a rubber layer with a hardness of 90Shore A compared to a hardness of 60Shore A, but the thickness distribution of the workpiece is the same. The results also show that the pins with full arrangement have a better geometric accuracy and thickness distribution in the produced parts than the partial arrangement in a flexible die. Using a multi-step strategy in a flexible die has the disadvantage of wrinkling.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Soleimanifar, M. J. Mirnia, M. Elyasi, Experimental and numerical study on the distribution of thickness and dimensional accuracy of AA 6061 in two-point incremental forming using flexible die, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 11, pp. 9- 20, 2020 (in Persian)

1- مقدمه

همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای، فرآیندی می‌باشد که در آن ورق شکل‌دهی بوسیله یک ابزار، بر روی یک قالبی که بطور معمول از نوع صلب می‌باشد، شکل داده می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای می‌توان بر حسب نیاز از دو نوع قالب جزئی⁶ و یا کامل⁷ استفاده نمود. قالب‌های جزئی دارای انعطاف‌پذیری به نسبت بالاتری در شکل دادن هندسه‌های گوناگون در مقایسه با قالب‌های کامل می‌باشند [6].

از مهم‌ترین مزیت قالب‌های انعطاف‌پذیر که در این مقاله از آن استفاده شده است، می‌توان به آرایش پین‌ها در حالت‌های کامل و یا جزئی که بر حسب نیاز انتخاب می‌شوند اشاره کرد. شکل 2 نمایی از دو قالب کامل و جزئی را نشان می‌دهد.

لسنون و نایت [7] در زمینه فرآیند شکل‌دهی تدریجی، با استفاده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی مقایسه‌ای را میان دو فرآیند تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای انجام داده و به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری ورق در فرآیند دونقطه‌ای در مقایسه با نوع تک‌نقطه‌ای بهتر بوده و بیشترین نازک‌شدگی در فرآیند تک‌نقطه‌ای در لبه‌های قطعه و در فرآیند دونقطه‌ای نیز در دیواره‌های آن اتفاق می‌افتد.

میرنیا و داریانی [8] با فرم دادن یک مخروط ناقص در سه مرحله به این نتیجه رسیدند که هرچه تعداد مراحل شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی افزایش یابد میزان نازک‌شدگی در کف قطعه کار کاهش می‌یابد.

فرمیسانو و همکاران [9] در زمینه فرآیند شکل‌دهی تدریجی تحقیقاتی را انجام دادند. آنها به این نتیجه دست یافتند که بدلیل وجود عیب برگشت فنری زیاد در نوع تک‌نقطه‌ای در مقایسه با نوع دونقطه‌ای، دقت هندسی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای افزایش می‌یابد.

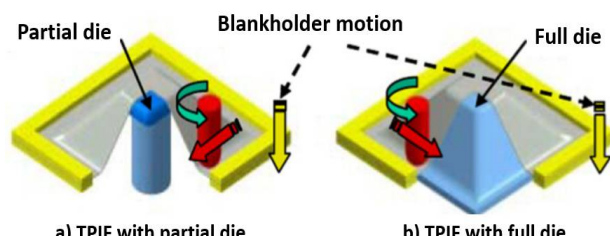


Fig. 2 Types of dies used in the two-point incremental forming process [1]

شکل 2 انواع قالب‌های مورد استفاده در فرآیند شکل‌دهی دونقطه‌ای

[1]

امروزه صنعتگران، فرآیند شکل‌دهی تدریجی¹ را به عنوان یک روش نوین در صنعت شکل‌دهی می‌شناسند و پژوهش‌های انجام شده نیز در این خصوص، چشم اندازه‌های تازه‌ای را گشوده است. بکار بردن این روش در صنعت برای تولیدات انبوه مقرون به صرفه نبوده و از این فرآیند بیشتر برای نمونه‌سازی‌های اولیه و یا تولیدات تکی استفاده می‌شود [1]. فرآیند شکل‌دهی تدریجی را می‌توان در صنایع گوناگونی مانند صنعت خودروسازی و پزشکی بکار برد [2، 3]. شکل 1 نمونه‌ای از کاربردهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی را نشان می‌دهد.

یکی از مزیت‌های مهم فرآیند شکل‌دهی تدریجی آنست که برخلاف بسیاری از فرآیندهایی که امروزه در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند نیازی به تجهیزات گران نداشتن و می‌توان با استفاده از دستگاه فرز کنترل عددی² نیز عملیات شکل‌دهی را انجام داده که این موضوع موجب سهولت و افزایش دقت هندسی قطعات تولیدی می‌شود. در این روش، یک ابزار شکل‌دهی که به طور معمول دارای سر کروی می‌باشد بر روی یک مسیر مشخصی که تابع هندسه بوده، حرکت کرده و بصورت تدریجی با حرکت موضعی خود ورق را شکل می‌دهد. فرآیند شکل‌دهی تدریجی به دو فرآیند شکل‌دهی تک‌نقطه‌ای³ و دونقطه‌ای⁴ تقسیم می‌شود [4].

فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در مقایسه با فرآیند دونقطه‌ای، بدلیل ایجاد عیب برگشت فنری⁵ زیاد در نمونه‌های تولید شده، دارای دقت هندسی پایینی می‌باشد [5].

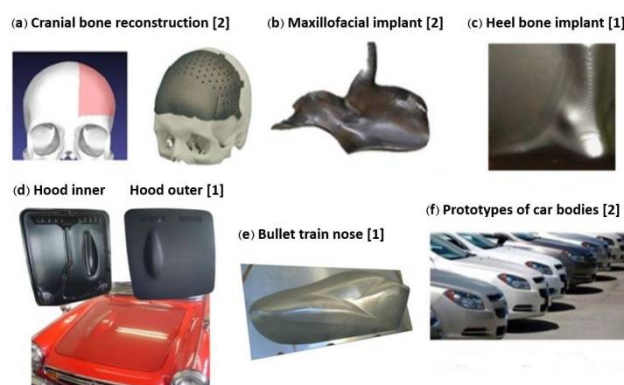


Fig. 1 Applications of the incremental forming process in automotive and medical industries

شکل 1 کاربردهای فرآیند شکل‌دهی تدریجی در دو صنعت خودروسازی و پزشکی

¹ Incremental Forming (IF)

² CNC

³ Single Point Incremental Forming (SPIF)

⁴ Two Point Incremental Forming (TPIF)

⁵ Spring back

⁶ Partial die

⁷ Full die

که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است بصورت تجربی و عددی بررسی می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

شکل 3 شماتیکی از قالب انعطاف‌پذیر مورد استفاده را نشان می‌دهد. بدنه این قالب از جنس فولاد ساختمانی¹ در نظر گرفته شده است.

مطابق با شکل 3 مکانیزم قالب ساخته شده بدین صورت است که در ابتدا، ورق (1) بر روی کفشک بالایی (2) قرار گرفته و لبه‌های آن با استفاده از ورق‌گیرهایی (7) بطور کامل مهار شده است. در اثر اعمال فشار از سوی ابزار شکل‌دهی به ورق، کفشک بالایی در راستای میله‌های راهنما (5) به سمت پایین حرکت کرده و وجود فنر (3) در داخل میله‌های راهنما نیز موجب شده تا علاوه بر آنکه حرکت کفشک بالایی به سمت پایین (8) کنترل شده‌تر باشد، تقارن در هندسه‌ای که بوسیله حرکت ابزار بر روی ورق ایجاد می‌شود نیز محفوظ بماند. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، پین‌های سرکروی بر روی صفحه سوراخدار (4) قرار داده شده و از فاصله اندازه‌ها (6) نیز به منظور جلوگیری از برخورد انتهای رزوه شده پین سرکروی با کفشک پایینی (9) استفاده شده است. کفشک پایینی (9) صرفاً به منظور جلوگیری از انحراف میله‌راهنماها در قالب استفاده شده است.

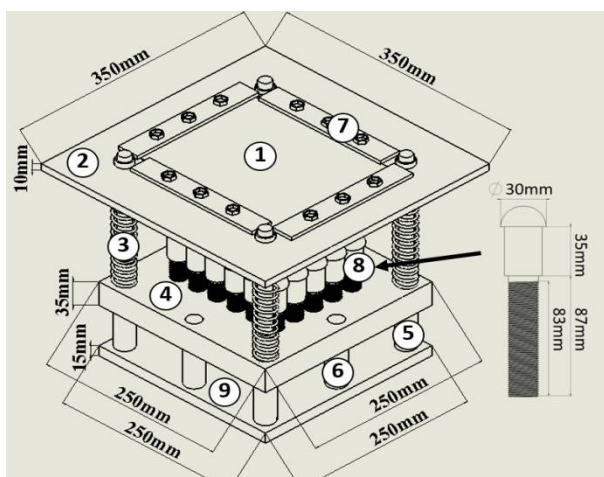


Fig. 3 Schematic of flexible die setup

شکل 3 شماتیکی اجزای قالب انعطاف‌پذیر

به منظور جلوگیری از ایجاد عیب تورفتگی بر سطوح ورق، از دو نوع لایه لاستیکی سیلیکون و پلی‌اورتان که به ترتیب دارای سختی 60ShoreA و 90ShoreA می‌باشند، در آزمون‌ها استفاده

مین و همکاران [10] نیز به این نتیجه دست یافتند که بکار بردن فوم فلزی به جای استفاده از قالب‌های صلب در فرآیند دونقطه‌ای، می‌تواند دقت هندسی را بهبود بخشد.

طاهرخوانی و همکاران [11] در زمینه فرآیند تک‌نقطه‌ای پژوهشهایی را انجام دادند. آنها تأثیر سرعت پیشروی، قطر ابزار و ضخامت ماده اولیه را بر روی دقت ابعادی و زبری سطح ورق آلومینیومی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه دست یافتند که هرچه از ورق آلومینیومی با ضخامت اولیه کمتر و همچنین از ابزار شکل‌دهی با قطر بیشتر استفاده شود زبری سطح قطعه‌کار کاهش یافته و در نتیجه کیفیت سطح آن نیز افزایش می‌یابد.

لی و همکاران [12] پس از انجام تحقیقاتی در زمینه فرآیند شکل‌دهی تدریجی، به این نتیجه رسیدند که هرچه میزان گام عمودی مرتبط با مسیر حرکت ابزار افزایش و همچنین قطر سرکروی ابزار کاهش یابد نرخ نازک‌شدگی در نمونه‌ای که شکل می‌گیرد نیز کاهش می‌یابد.

زارع و همکاران [13] به این نتیجه دست یافتند که قطر پین‌های بکار رفته در قالب‌های انعطاف‌پذیر بر روی کیفیت سطح و دقت ابعادی قطعه تولید شده نقش داشته و عدم بکار بردن لایه لاستیکی در هنگام شکل گرفتن ورق عیب تورفتگی را نیز در سطوح قطعه‌کار به همراه دارد.

تالیپاو و همکاران [14] با مطالعه بر قالب‌های انعطاف‌پذیر به این نتیجه رسیدند که بکار بردن لایه لاستیکی با سختی و ضخامت مناسب مانع از ایجاد عیب چروکیدگی و تورفتگی در سطح قطعه‌کار شده و دقت هندسی نیز افزایش می‌یابد.

جیا و وانگ [15] تأثیر میزان ضخامت ورق را بر روی دقت هندسی نمونه‌ای که بر روی قالب انعطاف‌پذیر شکل می‌گیرد را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که هرچه از ورق با ضخامت کمتری بر روی قالب انعطاف‌پذیر استفاده شود، دقت هندسی قطعاتی که بر روی این قالب شکل می‌گیرند نیز افزایش می‌یابد.

بودهایو و همکاران [16] با مطالعه بر روی قالب‌های انعطاف‌پذیر در فرآیند دونقطه‌ای و مقایسه آن با قالب‌های صلب به این نتیجه رسیدند که قطعاتی که بر روی قالب‌های انعطاف‌پذیر شکل می‌گیرد در مقایسه با قالب‌های صلب دارای توزیع ضخامت و دقت هندسی مناسب‌تری می‌باشد.

با توجه به مرور انجام شده، فرآیند TPIF با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر یکی از فرایندهای نوظهور شکل‌دهی ورق‌های فلزی می‌باشد که نیازمند مطالعه بیشتر است. در این مقاله بمنظور توسعه و بهبود فرایند، تأثیر لایه لاستیکی، چیدمان پین‌ها و تعداد مراحل شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت و دقت هندسی

¹ St37

جدول 2 خواص مکانیکی را برای ورق آلومینیومی استفاده شده نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی ورق آلومینیومی، ماده بصورت همگن در نظر گرفته شد. به منظور بررسی رفتار ماده بعد از ناحیه گلویی از رابطه سویفت مطابق رابطه (1) استفاده شد.

گردید. همان‌طوری که در شکل 3 نشان داده شده است، پین‌هایی که در این قالب بکار برده شده است نیز دارای قطر 30mm و ارتفاع 137mm می‌باشند. شکل 4 آرایش پین‌ها را با توجه به هندسه تعیین شده در قالب انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد.

$$\bar{\sigma} =$$

(1)

جدول 3 ضرایب سختی معادله را که در رابطه (1) مورد استفاده قرار داده می‌شود را نشان می‌دهد. به منظور تعریف خصوصیات مکانیکی لایه لاستیکی از مدل مونی-ریولین¹ استفاده شد. جدول 4 خواص مکانیک لایه‌های لاستیکی را نشان می‌دهد.

جدول 1 اجزای مدل‌شده و نوع آن در نرم‌افزار آباکوس

Table. 1 Components and their types modeled in Abaqus software

TPIF process	Model components	Model type
With flexible die	AA 6061	Formable 3D shell
With flexible die	Rubber layers	Formable 3D hyperplastic shell
With flexible die	Forming tool	Analytical rigid 3D shell
With flexible die	Overhead pins	Analytical rigid 3D shell

جدول 2 خواص مکانیکی AA 6061-T6 [17]

Table. 2 Mechanical properties of AA 6061 [17]

Properties	Symbols	Value
Density (kg/m ³)	ρ	2700
Young's modulus (GPa)	E	72/01
Yield strength (MPa)	σ_y	335/61
Poisson's ratio	ν	0/34

جدول 3 ضرایب سختی ماده [17]

Table. 3 Material hardness coefficients [17]

A (MPa)	n	Q	ϵ_0	$\epsilon_{necking}^n$	$\bar{\sigma}_{UTS}$ (MPa)
528/3	0/127	0/96	0/03	0/97	404/96

Table. 4 Mechanical properties of rubber layers

جدول 4 خواص مکانیکی لایه‌های لاستیکی

With 60 Shore A hardening [19]		With 90 Shore A hardening [18]	
C10 (MPa)	C01 (MPa)	C10 (MPa)	C01 (MPa)
0/474	0/118	0/861	0/354

به منظور انجام شبیه‌سازی از حل‌گر Dynamic/Explicit

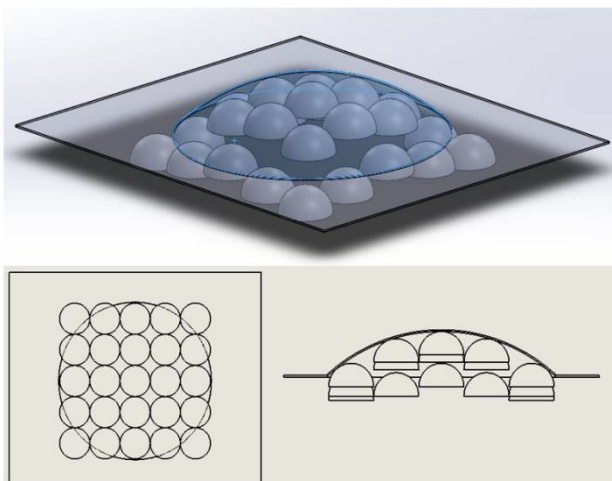


Fig. 4 Arrangement of pins in flexible die

شکل 4 آرایش پین‌ها در قالب انعطاف‌پذیر

هندسه انتخاب شده جهت شکل‌دهی، بصورت بخشی از یک کره به قطر 142/96mm می‌باشد. ابزاری که در این فرآیند بکار برده شد دارای قطر 20mm می‌باشد. سرعت پیشروی برابر با 1000 mm/min و بدون چرخش اسپیندل تنظیم گردید. مسیر ابزار بصورت مارپیچ با گام عمودی 0/5mm بکار گرفته شد. به منظور جلوگیری از اصطکاک میان نوک ابزار با سطوح ورق در هنگام شکل‌دهی، از روغن هیدرولیکی جهت روانکاری استفاده شد.

پس از انجام آزمون‌های تجربی، دو پارامتر توزیع ضخامت و دقت ابعادی تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. به منظور انجام این امر نخست تمامی نمونه‌ها در راستای نورد برش خورده و سپس توزیع ضخامت آن در 172 نقطه (در راستای خط برش) با استفاده از یک ضخامت‌سنج با دقت 0/01mm اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری دقت ابعادی تمامی نمونه‌های برش‌خورده از دستگاه پروفیل سنج نوری استفاده شد.

3- شبیه‌سازی عددی

به منظور مطالعه دقیق رفتار ماده در هنگام تغییر شکل ورق و بررسی رفتار مکانیکی ورق، شبیه‌سازی عددی آن نیز در نرم‌افزار آباکوس نسخه 2017 انجام شد. جدول 1 اجزای مدل‌شده و نوع آن را در این پژوهش نشان می‌دهد.

¹ Mooney-Rivlin

ورق $d=$).

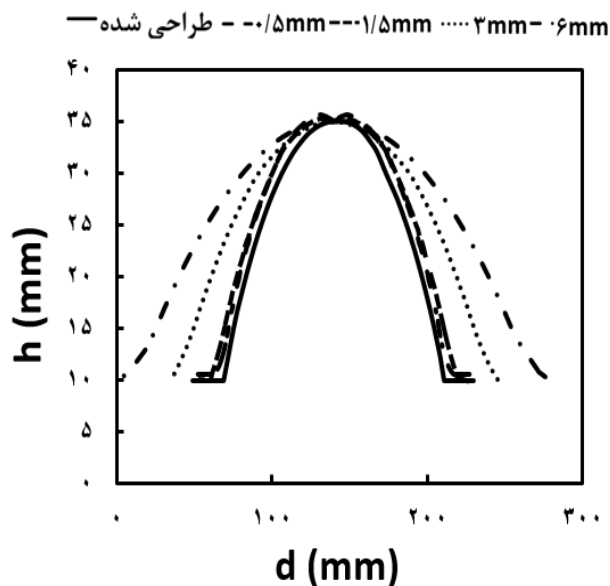


Fig. 5 Geometric profile measured from the experiment

شکل 5 پروفیل بدست آمده از آزمون تجربی

همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، با افزایش ضخامت لایه‌های لاستیکی از 0/5mm به 6mm دقت هندسی قطعات تولید شده کاهش می‌یابد. میزان خطای هندسی قطعات تولید شده به ترتیب برای لایه‌های لاستیکی پلی‌اورتان با ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر به ترتیب برابر با 2/9، 8/7، 37/69 و 81/2% می‌باشد. بنابراین دقت هندسی قطعه‌ای که بر روی لایه لاستیکی پلی‌اورتان با ضخامت 0/5mm شکل می‌گیرد در مقایسه با سایر قطعات دیگر به میزان 78/3% بهبود می‌یابد.

شکل 6 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی را بر روی عیب تورفتگی ناشی از پین‌ها بر سطح قطعه‌کار، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 6 دیده می‌شود افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش عیب تورفتگی ناشی از پین‌ها در قطعه‌کار می‌شود. بنابراین عیب تورفتگی در نمونه‌ای که بر روی 6mm لاستیک پلی‌اورتان شکل داده می‌شود در مقایسه با سایر قطعات دیگر ایجاد نمی‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده، بکار بردن لایه لاستیکی با ضخامت 0/5mm دارای بالاترین دقت هندسی و بیشترین میزان تورفتگی می‌باشد.

شکل 7 اعتبارسنجی دو نمودار توزیع ضخامت حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی را در هنگامی که نمونه مورد نظر بر روی 6mm لایه لاستیکی پلی‌اورتان فرم داده می‌شود را نشان می‌دهد (توزیع ضخامت قطعه‌کار $t=$ و فاصله از لبه ورق $d=$).

استفاده شد. اعمال شرایط مرزی برای اجزای مدل‌شده بدین صورت است که برای پینهای سرکروی تمامی درجات آزادی بدلیل ثابت بودن آن در آزمونهای تجربی برابر با صفر تعیین شده و همچنین تمامی درجات آزادی لبه ورق شکل‌دهی به غیر از محور عمود بر سطح آن (محور z) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. برای لایه‌های لاستیکی هیچ شرط مرزی تعیین نشده چرا که لایه‌های لاستیکی در آزمونهای تجربی میان ورق و پینها قرار داده می‌شوند، از این‌رو نیازی به اعمال شرط مرزی ندارند.

به منظور تعریف شرایط مرزی برای ابزار شکل‌دهی، ابتدا مسیر حرکت ابزار، متناسب با هندسه تعیین شده بصورت فایل G-Code از نرم افزار Solidworks استخراج شده و سپس با کدنویسی نرم‌افزار متلب، مسیر حرکتی بدست آمده، در نرم‌افزار آباکوس بصورت یک دامنه (مختصات مکان ابزار در هر لحظه بر حسب زمان) تعریف می‌گردد. تمامی محورهای چرخشی برای ابزار برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند.

تعداد نقاط انتگرالی برای ورق آلومینیومی در راستای ضخامت برابر با 5 و برای لایه لاستیکی نیز برابر با 2 تعیین شد. اعمال شرط تماس میان اجزاء، از نوع سطح به سطح بوده و ضریب اصطکاک نیز با بکار بردن حلگر پنالتی تعریف شد. میزان ضریب اصطکاک با توجه به مطالعات محققان پیشین در نظر گرفته شده است [5].

المان تعیین شده برای ورق و لایه لاستیکی از نوع المان پوسته چهار گره‌ای¹ می‌باشد. اندازه دانه برای ورق و لایه لاستیکی به ترتیب برابر با 1mm و 2mm بوده که تعداد مش آنها نیز به ترتیب برابر با 52500 و 13125 بوده است.

4- بحث و نتیجه‌گیری

1-4- بررسی تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر روی دقت هندسی

و توزیع ضخامت قطعه‌کار

یکی از پارامترهای مورد مطالعه در این مقاله، ضخامت لایه‌های لاستیکی بوده که تأثیر آن بر روی دو پارامتر توزیع ضخامت و دقت هندسی نمونه‌های فرم داده شده مطالعه می‌شود. از این‌رو در این مقاله از چهار لایه لاستیکی پلی‌اورتان در ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر استفاده شده است. در تمامی آزمون‌ها، قالب انعطاف‌پذیر همراه با آرایشی کامل تنظیم شد. شکل 5، دقت هندسی قطعات تولید شده را بر روی لایه‌های لاستیکی ذکر شده نشان می‌دهد (ارتفاع شکل‌دهی $h=$ ، فاصله از لبه

¹ S4R

همان‌طور که از نمودار شکل 7 مشاهده می‌شود، دو نمودار نسبت به یکدیگر از انطباق مناسبی برخوردار بوده و بیشترین درصد خطا برای این دو نمودار برای کمترین ضخامت بدست آمده برابر با 1% می‌باشد.

مقدار ضخامت قطعه در هنگامی که از لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر استفاده شود، در مرکز قطعه کار پل‌اورتان با ضخامت 6mm در شکل دادن قطعات، موجب شده تا در مرکز قطعه عیب نازک‌شدگی ایجاد نشود. در این نتایج دیده می‌شود هنگامی که از ضخامت 6mm برای لایه‌های لاستیکی استفاده می‌شود نازک‌شدگی در مرکز قطعه 5/26% بهبود می‌یابد. روند توزیع ضخامت در دیواره قطعات مطابق با نمودار شکل 8 برای لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر می‌باشد. اما مانع از ایجاد عیب تورفتگی شده و قطعه‌کار با توزیع ضخامت مناسبی شکل داده می‌شود.

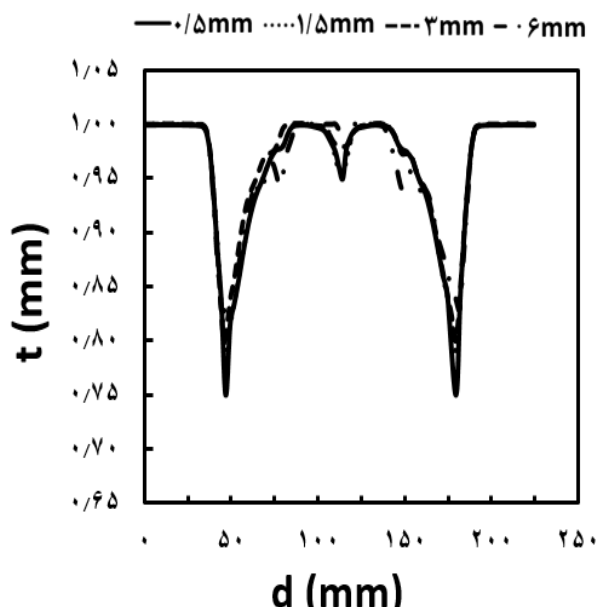


Fig. 8 Thickness distribution obtained from the numerical simulation for rubber layers with different thicknesses

شکل 8 نمودار توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی عددی برای لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های متفاوت

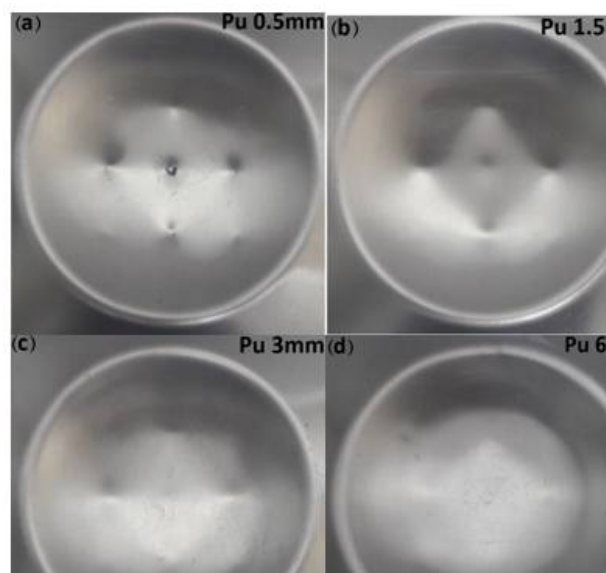


Fig. 6 The effect of the rubber thickness on the indentation defect

شکل 6 تأثیر ضخامت لاستیک بر عیب تورفتگی

مقدار ضخامت قطعه در هنگامی که از لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر استفاده شود، در مرکز قطعه بطور تقریبی به ترتیب برابر با 0/96، 0/95، 0/98 و 1 میلی‌متر می‌باشد. بنابراین بکار بردن لایه لاستیکی پلی‌اورتان با ضخامت 6mm در شکل دادن قطعات، موجب شده تا در مرکز قطعه عیب نازک‌شدگی ایجاد نشود. در این نتایج دیده می‌شود هنگامی که از ضخامت 6mm برای لایه‌های لاستیکی استفاده می‌شود نازک‌شدگی در مرکز قطعه 5/26% بهبود می‌یابد. روند توزیع ضخامت در دیواره قطعات مطابق با نمودار شکل 8 برای لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر می‌باشد. اما مانع از ایجاد عیب تورفتگی شده و قطعه‌کار با توزیع ضخامت مناسبی شکل داده می‌شود.

به منظور بررسی رفتار ماده در هنگام تغییر شکل نمودار کرنش پلاستیک معادل آن مورد بررسی قرار داده می‌شود. شکل 9 نمودار کرنش پلاستیک معادل را نشان می‌دهد.

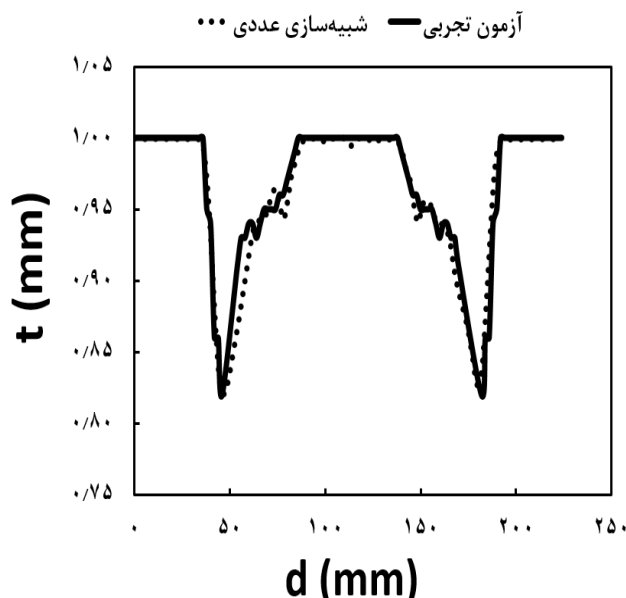


Fig. 7 Validation of two thickness distribution diagrams obtained from the experimental test and the numerical simulation

شکل 7 اعتبارسنجی دو نمودار توزیع ضخامت بدست آمده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی

شکل 8 نمودارهای توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی عددی قطعاتی را که بر روی لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های مختلف فرم داده می‌شوند را نشان می‌دهد (توزیع ضخامت

سختی آنها می‌باشد. در این آزمون از دو لایه لاستیکی پلی‌اورتان و سیلیکون در ضخامت 6mm که به ترتیب دارای سختی 90 و 60Shore A بودند استفاده شد و قالب انعطاف‌پذیر نیز همراه با آرایشی کامل تنظیم شد. شکل 10 دقت هندسی دو لایه لاستیکی را نسبت به هندسه طراحی شده نشان می‌دهد (ارتفاع شکل‌دهی h و فاصله از لبه ورق d). نمودار شکل 10 نشان می‌دهد که استفاده از لاستیک سیلیکون با سختی 60Shore A موجب کاهش دقت هندسی قطعه در مقایسه با لاستیک پلی‌اورتان با سختی 90Shore A می‌شود.

دقت هندسی در هنگامی که از لایه لاستیکی پلی‌اورتان استفاده می‌شود، در مقایسه با لاستیک سیلیکون به مقدار 61/77% بهبود می‌یابد. بنابراین از نتیجه فوق، این نکته برداشت می‌شود که افزایش سختی لایه‌های لاستیکی منجر به افزایش دقت هندسی قطعات تولیدی می‌شوند.

شکل 11 تأثیر سختی دو لایه لاستیک پلی‌اورتان و سیلیکون را بر ایجاد عیب تورفتگی بر سطوح قطعه کار نشان می‌دهد.

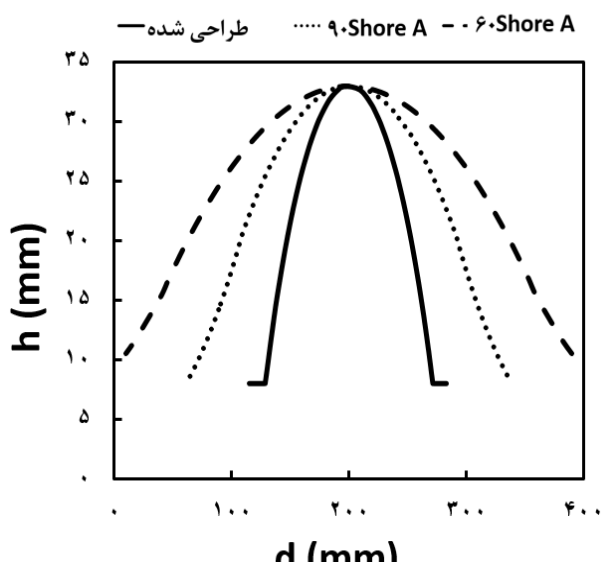


Fig. 10 Geometric accuracy obtained from the experiment

شکل 10 دقت هندسی بدست آمده از آزمون تجربی

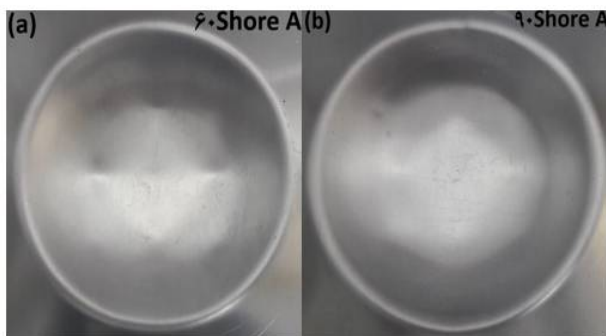


Fig. 11 The effect of rubber hardness on the indentation defect

شکل 11 تأثیر سختی لاستیک بر عیب تورفتگی

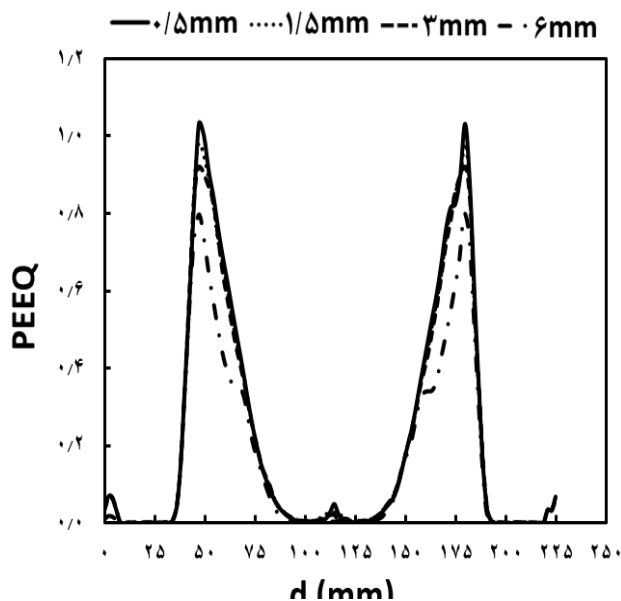


Fig. 9 Equivalent plastic strain distribution obtained from numerical simulation for rubber layers with different thicknesses

شکل 9 نمودار کرنش پلاستیک حاصل از شبیه‌سازی عددی برای لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های متفاوت

همان‌طور که از شکل 9 پیداست، به غیر از نمونه‌ای که بر روی لایه لاستیکی با ضخامت 6mm شکل داده می‌شود، میزان جریان ماده در مرکز قطعه (فاصله 102 تا 128 میلی‌متر)، برای لایه‌های لاستیکی با ضخامت‌های 0/5، 1/5 و 3 میلی‌متر به ترتیب برابر است با 0/05، 0/03 و 0/02 می‌باشد که این افزایش جریان، حاکی از ایجاد عیب تورفتگی در مرکز قطعات تولیدی می‌باشند. جریان ماده در مرکز نمونه‌ای که بر روی لایه لاستیکی با ضخامت 6mm شکل داده می‌شود بطور تقریبی برابر با صفر می‌باشد. در دیواره قطعات تولیدی میزان جریان ماده برای لایه‌های لاستیک، در ضخامت‌های 0/5، 1/5، 3 و 6 میلی‌متر به ترتیب برابر با 1/03، 0/98، 0/92 و 0/8 می‌باشد.

به طور کلی این نتایج نشان می‌دهد هنگامی که از لایه لاستیکی در ضخامت بالا استفاده شود بدلیل آنکه جریان ماده در مرکز و دیواره قطعه کار کم می‌باشد از این رو نرخ نازک‌شدگی کاهش یافته و عیب تورفتگی ناشی از پین‌ها در سطوح قطعه کار ایجاد نمی‌گردد اما دقت هندسی به شدت کاهش می‌یابد. در این پژوهش، بدلیل آنکه فرم دادن نمونه‌ای با کیفیت سطح مطلوب در مقایسه با دقت هندسی در اولویت بوده، از این رو ضخامت 6mm برای لایه‌های لاستیکی در سایر آزمون‌ها در نظر گرفته شد.

2-4- بررسی تأثیر سختی لایه لاستیکی بر روی دقت هندسی و توزیع ضخامت قطعه‌کار

یکی دیگر از پارامترهای مهم مربوط به لایه‌های لاستیکی، میزان

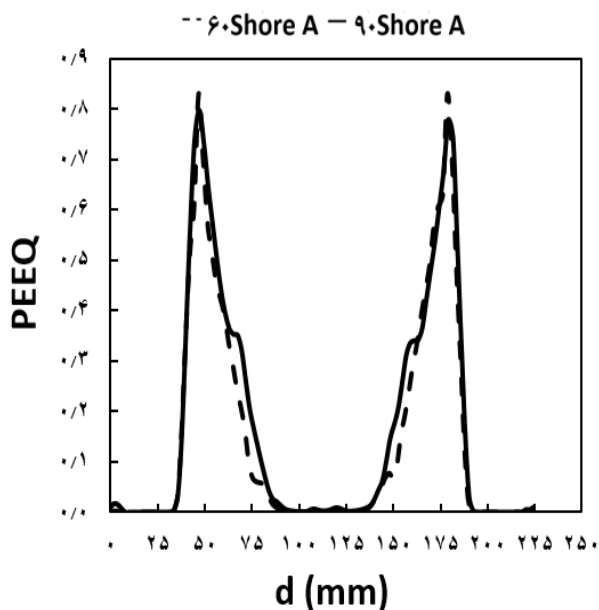


Fig. 13 The effect of the hardness of the rubber layer on the equivalent plastic strain of the parts

شکل 13 تأثیر سختی لایه لاستیکی در کرنش پلاستیک معادل قطعات

مقدار کرنش معادل مطابق با این نمودار در مرکز دو قطعه (فاصله 90 تا 136mm) بطور تقریبی برابر با صفر بوده و در دیواره آنها، بیشترین مقدار کرنش برای دو لایه لاستیکی با سختی 60 و 90Shore A به ترتیب برابر با 0/82 و 0/83 می‌باشد.

بنابر آنچه که در مورد سختی لایه‌های لاستیکی ذکر شده است، به دلیل آنکه لایه لاستیکی با سختی 90Shore A برخلاف لاستیک با سختی 60Shore A، عاری از عیب تورفتگی بوده و دارای دقت هندسی مناسب‌تری در مقایسه با لاستیک سیلیکون می‌باشد. از این‌رو، از لایه لاستیکی با این سختی در سایر آزمون‌ها استفاده شد.

3-4- تأثیر آرایش پین‌ها بر توزیع ضخامت و دقت هندسی قطعات تولید شده با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر

با توجه به آنکه می‌توان، پین‌ها را در قالب انعطاف‌پذیر با دو آرایش کامل و جزئی تنظیم نمود، از این‌رو در مقاله حاضر تأثیر نوع آرایش پین‌ها بر دقت هندسی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده، مورد مطالعه قرار گرفت. در آزمون تجربی هنگامی که از قالب انعطاف‌پذیر با آرایشی کامل استفاده شد، میان سطح تماس پین‌ها با ورق از 6mm لاستیک پلی‌اورتان استفاده شد و در چیدمان جزئی نیز تنها از یک پین در مرکز ورق (با توجه به ابعاد قالب) استفاده می‌شود که ورق شکل‌دهی از مرکز با آن، بوسیله یک پیچ متصل شده و میان سطح تماس پین با ورق از هیچ گونه لایه لاستیکی استفاده نمی‌شود.

همان‌طور که از شکل 11 ملاحظه می‌شود اثر پین‌ها در سطح نمونه‌ای که بر روی 6mm لایه لاستیکی با سختی 60Shore A شکل می‌گیرد باقی مانده و این در حالی است که عیوب تورفتگی در سطح قطعه‌ای که بر روی 6mm لایه لاستیکی با سختی 90Shore A، شکل داده می‌شود ایجاد نمی‌گردد.

شکل 12 نمودار توزیع ضخامت بدست آمده از آزمون تجربی را برای قطعاتی که بر روی دو لایه لاستیکی با سختی‌های متفاوتی شکل داده می‌شود را نشان می‌دهد (توزیع ضخامت قطعه t و فاصله از لبه ورق d).

میزان ضخامت هر دو قطعه در مرکز (فاصله 90 تا 136mm) به طور تقریبی برابر با 1mm بوده و در دیواره قطعات نیز بیشترین مقدار نازک‌شدگی به طور تقریبی برای لایه‌های لاستیکی با سختی‌های 60 و 90Shore A به ترتیب برابر با 0/82 و 0/83 mm می‌باشد. بنابراین نتیجه‌ای که از نمودار شکل 12 بدست می‌آید، بیانگر این نکته است که سختی لایه‌های لاستیکی تأثیری بر روی توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده، نداشته است.

شکل 13 نمودار کرنش پلاستیک معادل را برای قطعاتی که بر روی دو لایه لاستیکی با سختی‌های متفاوتی شکل داده می‌شوند را نشان می‌دهد (کرنش پلاستیک معادل $PEEQ$ و فاصله از لبه ورق d). همان‌طور که در این شکل پیدا است، بطور کلی جریان ماده در هنگام شکل گرفتن ورق برای دو قطعه بطور تقریبی مشابه یکدیگر می‌باشند.

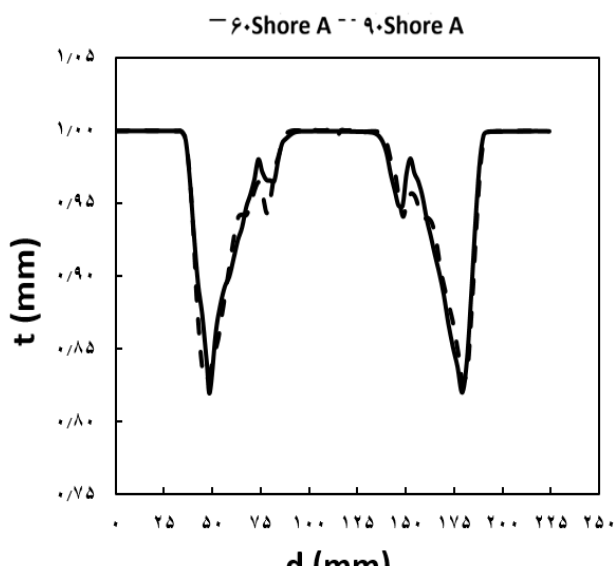


Fig. 12 The effect of hardness of the rubber layer on the thickness of the parts

شکل 12 تأثیر سختی لایه لاستیکی بر ضخامت قطعات

بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، دلیل آنکه بکار بردن چیدمان جزئی موجب شده تا توزیع ضخامت بصورت غیر یکنواخت باشد از این رو بکار بردن این آرایش در قالب فرم دادن قطعات پیشنهاد نمی‌شود.

شکل 16 مقایسه‌ای را میان دقت هندسی قطعات تولید شده با بکار بردن دو چیدمان کامل و جزئی، بر روی قالب مورد نظر نشان می‌دهد (ارتفاع شکل‌دهی h و فاصله از لبه ورق d). همان‌طور که در نمودار ذکر شده نشان داده شده است، دقت هندسی نمونه‌ای که بر روی قالب با چیدمانی کامل فرم داده می‌شود، در مقایسه با قالب با چیدمان جزئی مناسب‌تر می‌باشد.

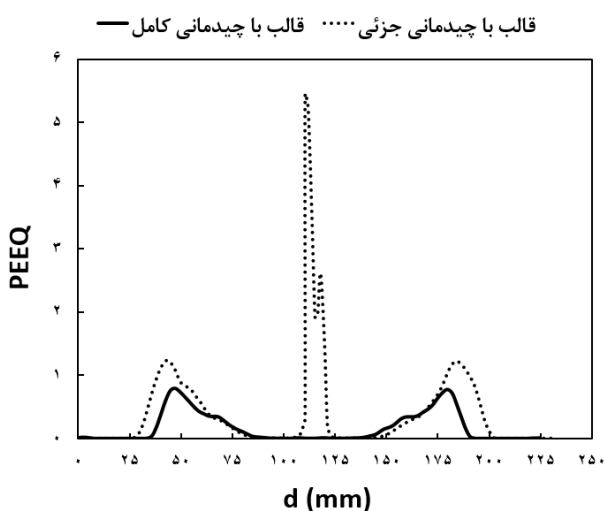


Fig. 15 Equivalent Plastic strain of parts in flexible die with full and partial arrangements

شکل 15 نمودار کرنش پلاستیک معادل قطعات در قالب انعطاف‌پذیر با دو آرایش کامل و جزئی

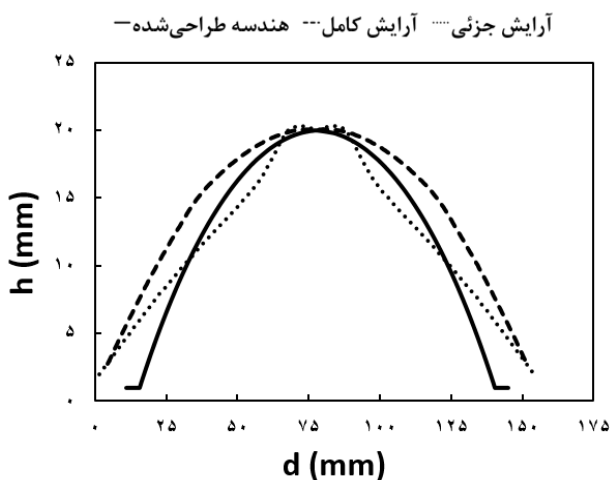


Fig. 16 Geometric accuracy of the parts formed using the full and partial die

شکل 16 دقت هندسی نمونه‌های شکل‌داده شده با استفاده از قالب کامل و جزئی

شکل 14 توزیع ضخامت بدست آمده از آزمون تجربی قطعاتی که بوسیله قالب انعطاف‌پذیر با دو چیدمان کامل و جزئی شکل داده شده را نشان می‌دهد (توزیع ضخامت t و فاصله از لبه ورق d). مطابق با نمودار شکل 14 مشاهده می‌شود هنگامی که از چیدمان کامل برای قالب انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود، ضخامت قطعه بصورت یکنواخت کاهش یافته بطوری که کمترین میزان ضخامت در بیشترین ارتفاع شکل‌دهی اتفاق می‌افتد. از شکل 14 نیز مشاهده می‌شود هنگامی که از قالب با چیدمان جزئی استفاده می‌شود توزیع ضخامت نمونه بطور یکنواخت نبوده و بیشترین نازک‌شدگی در مرکز قطعه ایجاد می‌شود.

شکل 15 نمودار کرنش پلاستیک معادل را برای دو چیدمان کامل و جزئی نشان می‌دهد (کرنش پلاستیک معادل $PEEQ$ و فاصله از لبه ورق d). همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است، بکار بردن چیدمان جزئی در این نوع از قالب‌ها موجب شده تا میزان جریان ماده در مرکز قطعه به میزان چشم‌گیری در مقایسه با چیدمان کامل افزایش یابد. حداکثر مقدار کرنش در مرکز قطعه برای چیدمان جزئی برابر با $5/44$ بوده در حالی که مقدار جریان ماده برای چیدمان کامل نیز در این ناحیه به طور تقریبی برابر با 0 می‌باشد. افزایش جریان ماده در مرکز قطعه در هنگامی که از چیدمان جزئی استفاده می‌شود، به منظور حفظ تقارن هندسی، مرکز ورق بوسیله یک پیچ به پین مرکزی متصل شده که این عامل موجب می‌شود تا با پیشروی ابزار بر سطح ورق، فشار بسیار زیادی به این ناحیه اعمال شود و در نتیجه جریان ماده در این ناحیه بشدت افزایش یابد که بدنبال آن مطابق با شکل 14 نازک‌شدگی شدیدی در مرکز قطعه ایجاد می‌شود.

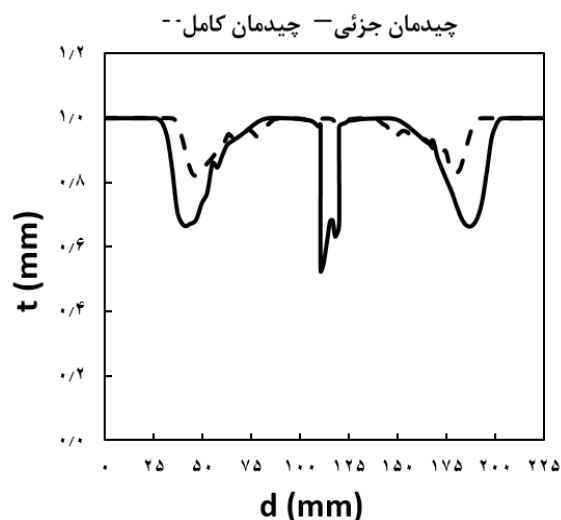


Fig. 14 The comparison of the thickness of the parts formed using the flexible die with full and partial arrangements

شکل 14 مقایسه ضخامت قطعات شکل‌داده شده بر روی قالب انعطاف‌پذیر با دو چیدمان کامل و جزئی

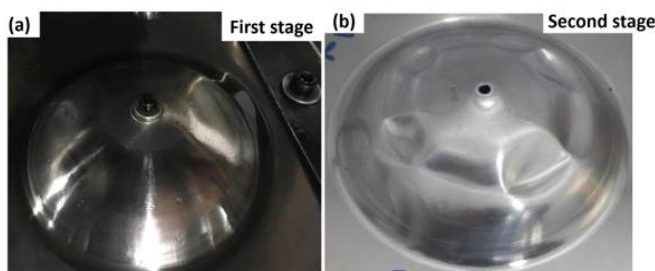


Fig. 17 Using a multi-step strategy in the flexible die

شکل 17 بکار بردن استراتژی چندمرحله‌ای در قالب انعطاف‌پذیر

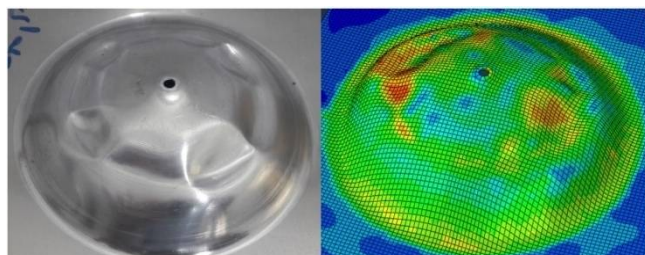


Fig. 18 Using a multi-step strategy in flexible die

شکل 18 بکار بردن استراتژی چندمرحله‌ای در قالب انعطاف‌پذیر

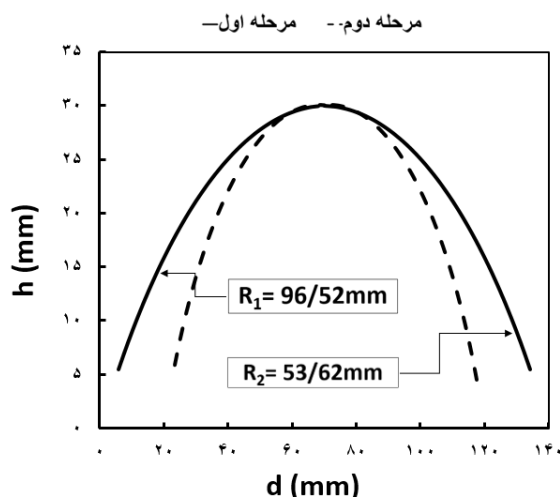


Fig. 19 The curvature radius of the hemisphere in the first and second stages

شکل 19 شعاع انحنا نیمکره در مرحله اول و دوم

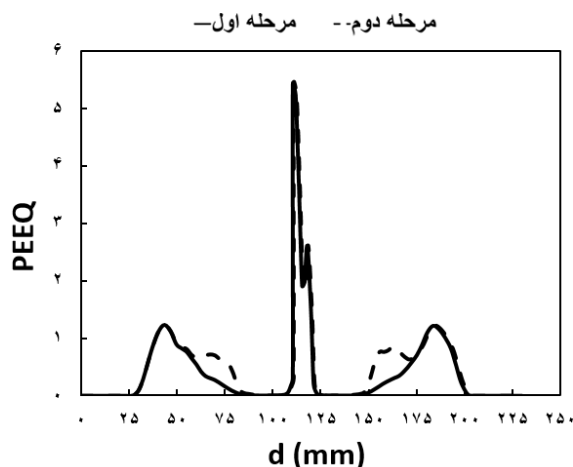


Fig. 20 Equivalent Plastic strain obtained from numerical simulation

شکل 20 نمودار کرنش پلاستیک معادل بدست آمده از شبیه‌سازی عددی

بنابر مطالب بیان شده، استفاده از آرایش کامل برای پین‌ها بجای آرایش جزئی، در قالب انعطاف‌پذیر به‌منظور تولید قطعات با توزیع ضخامت و دقت هندسی مناسب پیشنهاد می‌شود.

4-4- بکار بردن استراتژی چند مرحله‌ای در فرآیند TPIF با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر

در این مرحله، هدف فرم دادن یک نیم‌کره‌ی کامل، تا ارتفاع شکل‌دهی 31mm و قطر 62mm می‌باشد. به منظور شکل دادن هندسه مورد نظر از استراتژی چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد قالب و هندسه ذکر شده از چیدمان جزئی (بکار بردن تنها یک پین در مرکز قالب) در قالب انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. در آزمون تجربی نیز میان سطح تماس پین با ورق از هیچ نوع لایه لاستیکی استفاده نشده و ورق نیز از ناحیه مرکزی بوسیله یک پین با استفاده از یک پیچ، متصل شده است. در این آزمون قطعه‌کار پس از آنکه در مرحله اول تا ارتفاع 25mm شکل داده شد، در مرحله دوم در ارتفاع 15mm دچار عیب چروکیدگی می‌شود. شکل 17 نمونه شکل داده شده را در دو مرحله اول و دوم نشان می‌دهد.

به منظور بررسی علت این امر، شبیه‌سازی عددی آن نیز انجام شد. شکل 18 شبیه‌سازی عددی را به همراه آزمون تجربی نشان می‌دهد.

یکی از پارامترهای بسیار مهم در فرآیند TPIF با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر، شعاع انحنای هندسه مورد نظر می‌باشد. فرم دادن هندسه با شعاع انحنای کوچکتر در قالب‌های انعطاف‌پذیر، احتمال ایجاد عیب چروکیدگی را در قطعه‌کار افزایش می‌دهد [18]. شکل 19 شعاع انحنای هندسه را در مرحله اول و دوم نشان می‌دهد (ارتفاع شکل‌دهی h و فاصله از لبه ورق d).

از آنجایی که زاویه دیواره هندسه در هنگام انجام فرآیند شکل‌دهی تغییر می‌کند از این‌رو، سطح تماس ابزار با ورق نیز تغییر کرده، بنابراین شدت جریان ماده نیز در طول مسیر بصورت یکسان نمی‌باشد. شکل 20 نمودار کرنش پلاستیک معادل را در مرحله اول و دوم نشان می‌دهد (کرنش پلاستیک معادل $PEEQ$ و فاصله از لبه ورق d). همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است، در مرحله دوم، تا زمانی که شعاع انحنای دو مرحله یکسان باشد (فاصله 87 تا 107mm و 125 تا 148mm) جریان ماده نیز بصورت یکسان بوده و از نقاطی که دو شعاع انحنا شروع به تغییر کند (ناحیه 58 تا 87mm و 148 تا 171mm) جریان ماده در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته که موجب ایجاد عیب چروکیدگی در قطعه‌کار می‌شود.

این‌رو، بکار بردن استراتژی چند مرحله‌ای در فرآیند TPIF با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر موجب ایجاد عیب چروکیدگی در ورق می‌شود چرا که بطور معمول شعاع انحنا به تدریج در مراحل بعدی کاهش یافته که موجب غیر یکنواختی سطح تماس ابزار با ورق و بدنبال آن غیر یکنواختی میزان جریان ماده در مراحل بعدی شده که این موضوع موجب ایجاد عیب چروکیدگی در قطعه می‌شود.

6- مراجع

- [1] M. Vahdani, M. J. Mirnia, M. Bakhsi-Jooybari, H. Gorji, Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, and DC01 steel sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 103, pp. 1199-1209, 2019.
- [2] H. Lu, H. Liu, Ch. Wang, Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, pp. 3381-3417, 2019.
- [3] H. K. Nirala, A. Agrawal, A Novel Electromagnetic Fixture for Incremental Sheet Metal Forming, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 141, pp. 10 pages, 2019.
- [4] K. Jackson, J. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1158-1174. 2009.
- [5] A. A. Nourmohammadi, M. Elyasi, M. J. Mirnia, Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die, *The International Journal of Advanced*, Vol. 102, No. 1, pp. 2933-2952. 2019.
- [6] M. B. Silva, P. A. F. Martins, Two-Point Incremental Forming with Partial Die: Theory and Experimentation, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 1018-1027, 2012.
- [7] O. Lasunon, W. A. Knight, Comparative investigation of single-point and double-point incremental sheet metal forming processes. *Journal of Engineering Manufacturing. Part B: Journal of Engineering manufacturing*, Vol. 32, No. 12, pp. 1725-1732, 2007.
- [8] M. J. Mirnia, B. M. Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*. Vol. 14, No. 14, pp. 262-270. 2015.
- [9] A. Formisano, L. Boccarusso, F. Capece-Minutolo, L. Carrino, M. Durante, A. Langella, Negative and positive incremental forming: Comparison by geometrical, experimental, and FEM considerations, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32, pp. 530-536, 2016.
- [10] J. Min, B. Kuhlenkötter, Ch. Shu, D. Störkle, L. Thyssen, Experimental and numerical investigation

علت ایجاد عیب چروکیدگی در مرحله دوم، آنست که به دلیل کاهش شعاع انحنا، سطح تماس ابزار شکل‌دهی با دیواره قطعه‌کار نسبت به مرحله افزایش می‌یابد. بدلیل آنکه ماده در مرحله اول شکل یافته است و شدت جریان آن نیز در قسمت‌های مختلف دیواره بصورت یکنواخت نبوده، در هنگامی که ابزار در مرحله دوم به قسمتی از دیواره قطعه‌کار رسد که در مرحله اول، ماده با شدت بیشتری جریان یافته است. از این‌رو، سطح تماس ابزار با قطعه‌کار کاهش یافته که بدنبال آن جریان ماده نیز کاهش می‌یابد. در مقابل، سطح تماس ابزار نیز در قسمتی از دیواره که در مرحله قبل با شدت کمتری جریان یافته است، در مرحله دوم افزایش یافته و بدین صورت جریان ماده نیز افزایش می‌یابد که نتیجه این کاهش و یا افزایش جریان ماده، ایجاد عیب چروکیدگی در قطعه‌کار می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو پارامتر توزیع ضخامت و دقت هندسی قطعات در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر، به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار داده می‌شوند. نخست به منظور انجام این پژوهش، قالبی ساخته شده که در مقایسه با نوع سنتی خود دارای انعطاف‌پذیری بالایی بوده است. این قالب از تعدادی پین سرکروی تشکیل شده، که می‌توان ارتفاع تمامی آنها را متناسب با هندسه تعیین شده تنظیم نمود. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- بکار بردن لایه‌های لاستیکی در ضخامت‌های بالا، در امر شکل‌دهی، موجب شده تا جریان ماده و بدنبال آن تغییرات ضخامت قطعه‌کار با کنترل و یکنواختی بیشتری در مقایسه با ضخامت‌های کم لایه‌های لاستیکی جریان یابد که این امر مانع از ایجاد عیب تورفتگی در سطوح قطعه‌کار می‌شود. هرچه ضخامت لایه‌های لاستیکی افزایش یابد، دقت هندسی نمونه تولید شده نیز کاهش می‌یابد.

- هرچه میزان سختی لایه لاستیکی در فرآیند شکل‌دهی افزایش یابد، دقت هندسی قطعات کاهش می‌یابد. میزان سختی لایه‌های لاستیکی، تأثیری بر روی جریان ماده و توزیع ضخامت قطعات نداشته است.

- استفاده از قالب انعطاف‌پذیر با چیدمانی جزئی در مقایسه با چیدمان کامل، در این تحقیق توصیه نمی‌شود، چرا که قطعات با دقت هندسی و توزیع ضخامت نامناسبی شکل می‌گیرند.

- هرچه ارتفاع شکل‌دهی کاهش و شعاع انحنای هندسه نیز افزایش یابد، سطح قطعه‌کار با کیفیت مطلوبی شکل می‌گیرد. از

- [15] B. B. Jia, W. W. Wang, Shape accuracy analysis of multi-point forming process for sheet metal under normal full constrained conditions, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 491-501, 2017.
- [16] S. Boudhaouia, M. Amen-Gahbich, Y. Ayed, E. Giraud, W. Ben-Salem, Ph. Dal-Santo, Experimental and numerical study of a new hybrid process: multi-point incremental forming (MPIF), *International Journal of Material Forming*, Vol. 11, No. 1, pp. 815-827, 2017.
- [17] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi-Naeini, M. J. Mirnia, M. A. Mirzai, S. Alexandrov, H. Gorji, Experimental and numerical investigation of failure during bending of AA6061 aluminum alloy sheet using the modified Mohr-Coulomb fracture criterion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 5217-5237, 2019.
- [18] M. Abosaf, Kh. Essa, A. Alghawail, A. Tolipov, Sh. Su, D. Pham, Optimisation of multi-point forming process parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, No. 1, pp. 1849-1859, 2017.
- [19] D. F. Lalo, M. Greco, Rubber bushing hyperelastic behavior based on shore hardness and uniaxial extension, *Proceedings of the 24th ABCM International Congress*, 2017.
- on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 31, No. 1, pp. 605-612, 2018.
- [11] A. Taherkhani, A. Basti, N. Nariman-Zadeh, A. Jamali, achieving maximum dimensional accuracy and surface quality at the shortest possible time in single-point incremental forming via multi-objective optimization, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, Vol. 233, No. 3, pp. 900-913, 2018.
- [12] Y. Li, X. Chen, W. Zhai, L. Wang, J. Li, Zh. Guoqun, Effects of process parameters on thickness thinning and mechanical properties of the formed parts in incremental sheet forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 3071-3080, 2018.
- [13] B. Zareh, A. Vafaei-Sefat, V. Rikhtergar-Nezami, Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Forming Using Multi point Forming Process, *Aerospace Mech. J.*, Vol. 8, No. 4, pp. 75-87, 2012. (in Persian فارسی)
- [14] A. A. Tolipov, A. Elghawail, S. Shushing, D. Pham, K. Essa, Experimental research and numerical optimisation of multipoint sheet metal forming implementation using a solid elastic cushion system, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 896, No. 36, pp. 2-6, 2017.