ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2023.402149.1794

مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ورق St12 با استفاده از قالب‌های منفی

علیرضا حاج فتحعلیان[۱]، محمدجواد میرنیا[۲*]، مجید الیاسی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* بابل، صندوق پستی: ۴۸۴، mirnia@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲ تیر ۱۴۰۲

داوری اولیه: ۷ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۷ مرداد ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای

قالب منفی

قطر ابزار

گام عمودی

روانکار

توزیع ضخامت

دقت ابعادی

چکیده

شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای به دودسته منفی و مثبت تقسیم‌بندی می‌شود که فرایند مورد بررسی در این پژوهش، شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای منفی می‌باشد. امروزه در صنعت شکل‌دهی، تولید قطعاتی با دقت ابعادی و توزیع ضخامت مناسب بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هدف این پژوهش بهبود دقت ابعادی و توزیع ضخامت نمونه تولیدشده توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای منفی می‌باشد. در راستای این هدف، توزیع ضخامت و دقت ابعادی قطعات مخروطی شکل با استفاده از ایجاد تغییراتی در پارامترهای فرایند مانند قطر ابزار، گام عمودی، نوع روانکار و راهبرد تغییر شکل بررسی شده است. برای انجام این پژوهش از یک دستگاه فرز کنترل عددی، یک مجموعه کامل قالب منفی، ورق فولادی St12 به ضخامت ۰/۹ میلی‌متر، ابزار سر کروی و روانکار روغن SAE 10W استفاده شده است. تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در اثر افزایش قطر ابزار در گام عمودی ثابت، ضخامت کمینه از ۰/۲۴ به ۰/۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد که سبب کاهش نازک‌شدگی و در نهایت احتمال پارگی در ورق شده است. کاهش قطر ابزار در گام عمودی ثابت باعث شکل‌دهی بهتر در گوشه‌های نوک‌تیز قطعات تولیدی شده و با به‌کارگیری راهبرد شکل‌دهی جدید و افزایش تعداد مراحل آن از یک مرحله به دو مرحله، ضخامت کمینه افزایش یافته است. این حالت، سبب بهبود توزیع ضخامت نمونه و کاهش احتمال پارگی در نمونه شده و باتوجه به بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، روانکار تأثیر چشم‌گیری در توزیع ضخامت و دقت ابعادی نمونه تولیدی نداشته و استفاده از روانکار در این پژوهش تنها سبب کاهش زبری سطح گردیده است.

Experimental study of two-point incremental forming of St12 sheet using negative dies

Alireza Hajfathalian, 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: 23 June 2023

First Decision: 29 July 2023

Accepted: 18 August 2023

Keywords:

Two-point Incremental Forming

Negative Die

Tool Diameter

Step Down

Lubricant

Thickness Distribution

Dimensional Accuracy

Abstract

Two points incremental forming is divided into two categories, negative and positive, and the process investigated in this research is Two points incremental forming. Today, in the forming industry, the production of parts with Dimensional accuracy and proper thickness distribution is very important. The aim of this research is to improve the dimensional accuracy and thickness distribution of the sample produced by the negative two-points incremental forming process. For this purpose, thickness distribution and dimensional accuracy of conical parts have been investigated by making changes in process parameters such as tool diameter, step down, type of lubricant and deformation strategy. To do this research, a numerically controlled milling machine, a complete set of negative die, St12 steel sheet with a thickness of 0.9 mm, spherical tool and SAE 10W oil lubricant were used The analysis of the results of the tests shows that due to the increase in the diameter of the tool at a constant step down, the minimum thickness increases from 0.24 to 0.5 mm, which has caused a decrease in thinning and ultimately the possibility of tearing in the sheet. Reducing the diameter of the tool in a constant step down has led to better shaping in the sharp corners of the production parts, and by applying a new shaping strategy and increasing the number of stages from one stage to two stages, the minimum thickness has increased. This state has improved the thickness distribution of the sample and reduced the possibility of tearing in the sample, and according to the investigations carried out in this research, the lubricant did not have a significant effect on the thickness distribution and dimensional accuracy of the production sample, and the use of the lubricant in this research only reduced the surface roughness.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Hajfathalian, M.J. Mirnia, M. Elyasi, Experimental study of two-point incremental forming of St12 sheet using negative dies, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 32- 42, 2023 (in Persian). https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.402149.1794

۱- مقدمه

به‌طورکلی روش‌های تولید به بخش‌های مختلفی شامل روش‌های کاهشی[1]، افزایشی[2]، ریخته‌گری[3] و شکل‌دهی[4] دسته‌بندی می‌شوند. از بین موارد گفته‌شده، شکل‌دهی فلزات با توجه به مزایایی اعم از کاهش دورریز ماده و خواص مکانیکی مطلوب، همواره انتخابی محبوب برای صنایع مختلف می‌باشد. ازآنجایی‌که در روش‌های مرسوم شکل‌دهی فلزات از روش سنتی سنبه و قالب استفاده می‌شود، این روش نیازمند ابزارها و قالب‌هایی مخصوص، دقیق و گران‌قیمت می‌باشد؛ لذا این روش‌ها تنها در مواردی با حجم تولیدی بالا[5] مورد استفاده قرار می‌گیرند تا برای صنعت‌گر صرفه اقتصادی داشته باشد [۱].

امروزه صنایع تولیدی مختلف، با توجه به افزایش چشم‌گیر سرعت تکنولوژی و گرایش بازار به سمت حجم تولید کم و کیفیت بهتر، نیازمند روش‌هایی منعطف برای تولیداتی با حجم متوسط هستند. نمونه‌سازی سریع اولین و بهترین قدم در این مسیر می‌باشد. در زمینهٔ نمونه‌سازی سریع محصولات ورق فلزی، فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق[6] انتخابی مناسب است. به این دلیل که فرایند شکل‌دهی تدریجی دارای مزایایی اعم از کاهش زمان و هزینه چرخه طراحی تا تولید، سریع‌تر شدن فرایند طراحی‌محصول، انجام سریع تغییرات و افزایش سرعت عرضه تولیدات در بازار می‌باشد و همچنین شکل‌دهی تدریجی فرایندی با انعطاف‌پذیری بالا و نیروی شکل‌دهی کم و حد شکل‌دهی زیاد می‌باشد [۲]. فرایندهای شکل‌دهی تدریجی ورق متشکل از فرایندهایی هستند که در آن یک ابزار سر کروی در مسیری که از قبل برای آن تعیین گردیده، ورق را به‌طور موضعی شکل می‌دهند تا به شکل نهایی محصول تولیدی برسند. همان‌طور که گفته شد این فرایندها برای تولید با تیراژ پایین و یا نمونه‌سازی سریع استفاده می‌شوند. یکی از مهم‌ترین مزایای این فرایند این است که نیاز به قالب و ابزارهای پیچیده و گران‌قیمت ندارد و با یک طراحی ساده و یک دستگاه فرز کنترل عددی قابلیت اجرا دارد. در این فرایند برای کم کردن میزان نیروی لازم برای شکل‌دهی و افزایش‌دادن محدوده شکل‌پذیری ورق، از ابزاری با ابعاد کوچک استفاده می‌گردد. این عمل سبب متمرکز شدن عملیات تغییر شکل مومسان در ناحیه کوچکی از ورق می‌گردد که با این کار بسیاری از آسیب‌های احتمالی در محصول تولیدی کاهش می‌یابد. ازآنجایی‌که در این فرایند، ورق به‌صورت تدریجی و موضعی شکل داده می‌شود و نیروی شکل‌دهی در ناحیهٔ تماس ابزار با ورق متمرکز است لذا این اتفاق سبب افزایش شکل‌پذیری ورق و انعطاف‌پذیری فرایند می‌شود. نازک‌شدگی یکی از معایب این فرایند می‌باشد که می‌تواند سبب کاهش استحکام محصول نهایی شود [۳]. فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق، به دو دسته کلی شکل‌دهی تدریجی منفی[7] یا تک نقطه‌ای[8] و شکل‌دهی تدریجی مثبت[9] یا دونقطه‌ای[10] تقسیم می‌شود [۴]. شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک فرایند بسیار ساده می‌باشد که به همین دلیل در این فرایند نیازی به تلرانس‌های پیچیده نمی‌باشد؛ همچنین در شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای از هیچ‌گونه قالب خاصی استفاده نمی‌شود؛ به همین دلیل است که نوع تک نقطه‌ای نسبت به نوع دو نقطه‌ای دارای انعطاف‌پذیری بیشتری می‌باشد [۵]. فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای برگشت فنری کمتری دارد که همین موضوع سبب افزایش دقت هندسی در آن می‌شود [۶]. قالب‌های مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای به دو دسته کلی جزئی و کامل تبدیل می‌شود. قالب‌های جزئی نسبت به قالب‌های کامل از انعطاف بیشتری در شکل‌دهی قطعاتی با هندسه‌های مختلف برخوردار هستند [۷]. در قالب‌های کامل و در طول فرایند شکل‌دهی، ورق با قالب در تماس می‌باشد و به همین خاطر است که قطعهٔ تولیدی با این قالب نسبت به قالب جزئی دارای دقت به‌مراتب بیشتری می‌باشد. از نواقصی که می‌توان به شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب کامل اشاره کرد، انعطاف‌پذیری اندک و زمان‌بر بودن این فرایند در این حالت به علت تولید دقیق قطعه می‌باشد؛ همچنین شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب کامل بسیار پرهزینه‌تر از با قالب جزئی می‌باشد [۸]. در زمینهٔ شکل‌دهی تدریجی، تحقیقاتی زیادی انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. نیک دوز و همکاران [۳] میزان شکل‌پذیری هرم ناقص آلومینیومی با زاویهٔ ۷۰ درجه را از طریق فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای به ترتیب در یک و دو مرحله مورد پژوهش قرار دادند. نتایج ثابت کرد که راهبرد دو مرحله‌ای سبب بهبود دو برابری ضخامت کمینه نسبت به حالت تک مرحله‌ای می‌باشد. کورا و رگالا [۹] به‌صورت تجربی و عددی میزان شکل‌پذیری ورق فولادی فوق‌کشش از طریق

[1] Subtractive
[2] Additive
[3] Casting
[4] Metal Forming
[5] Mass Production
[6] Incremental Sheet Forming (ISF)
[7] Negative Incremental Forming
[8] Single Point Incremental Forming (SPIF)
[9] Positive Incremental Forming
[10] Two Point Incremental Forming (TPIF)

فرایند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از مخروط با زاویهٔ جداره‌ی متغیر، تشکیل شده از مولدهای دایروی، سهموی، بیضوی و توانی استفاده شده است. در نهایت نتایج نشان داد که میانگین حداکثر زاویهٔ جداره به‌دست‌آمده در این پژوهش ۷۵/۲۷ درجه و حداکثر انحراف زاویهٔ شکست در استفاده از مولدهای گوناگون ۴/۶ درجه می‌باشد. سی ورا آجای و همکاران [۱۰] به پژوهش در مورد شکل‌دهی تدریجی ورق و انواع روش‌های آن پرداختند. آن‌ها به این نتایج دست یافتند که شکل‌دهی تدریجی ورق به دو دسته کلی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای و شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای تقسیم می‌شود و شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای انعطاف‌پذیری بیشتری در فرایند دارد و پتانسیل قابل توجهی برای کاهش هزینه‌های ساخت قالب در نمونه‌سازی و تولید حجم کم نسبت به شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای دارد و شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای دارای دقت پروفایل بهتری نسبت به شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای می‌باشد. پارک و شیم [۱۱] پژوهش‌هایی را در راستای نشان دادن چگونگی منحنی حد شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق انجام دادند و با تعیین و بررسی منحنی حد شکل‌دهی در آلومینیوم به این مهم دست یافتند که مقدار حد شکل‌دهی فرایند شکل‌دهی تدریجی از فرآیندهای شکل‌دهی مرسوم و سنتی بالاتر می‌باشد. به همین علت است که منحنی حد شکل‌دهی فرآیندهای مرسوم در مقایسه با فرایند شکل‌دهی تدریجی قابل قیاس و تعمیم نمی‌باشد. درزی و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای دما بالای آلیاژ آلومینیوم 6061 پرداختند. در این پژوهش میزان گرمایش به کار برده شده در طول فرایند بین ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با توزیع یکنواخت می‌باشد. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که گرمایش مورد استفاده در این پژوهش، سبب افزایش ۵۲۸ درصدی شکل‌پذیری در طول فرایند می‌باشد. آن‌ها دریافتند که از نظر میزان تأثیرگذاری پارامترها بر روی شکل‌پذیری، دما در اولویت است و بعد از آن روانکار و گام عمودی تأثیرگذار خواهند بود. موحدی‌نیا و همکاران [۱۳] اثر فلرینگ لوله‌ها را در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای بررسی کردند. آن‌ها در نهایت به این نتیجه رسیدند که با کاهش اصطکاک بین ابزار و ورق و کاهش سرعت پیشروی، میزان شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی تدریجی افزایش می‌یابد. هام و جسوایت [۱۴] به‌صورت تجربی، آزمایش‌های خود را بر روی ورق آلومینیوم ۳۰۰۳ انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌ها را با دو سرعت ۶۰۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه شکل‌پذیری بالاتر می‌رود و این افزایش شکل‌پذیری به دلیل تولید گرمای اصطکاکی بیشتر در منطقه تماس بین ابزار و ورق است. آن‌ها دریافتند که با کاهش نرخ پیشروی در شکل‌دهی تدریجی، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. وحدتی و همکاران [۱۵] برگشت فنری و اثرات آن بر هندسه و دقت ابعادی توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل تحلیلی با انتخاب یک روش مناسب برای پارامترهای فرایند و کاهش برگشت فنری به دست آوردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش قطر ابزار، نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و ضخامت ورق و با کاهش در گام عمودی ابزار، برگشت فنری کاهش پیدا می‌کند. طاهرخانی و همکاران [۱۶] بررسی‌هایی را در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای به انجام رساندند. آن‌ها میزان تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت ورق اولیه، قطر ابزار و سرعت پیشروی را بر روی دقت ابعادی و صافی سطح ورقی از جنس آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در نهایت به این نتایج دست یافتند که هر چه ضخامت ورق اولیه کمتر باشد و قطر ابزار مورد استفاده بیشتر باشد در نتیجه زبری سطحی قطعه کار کاهش می‌یابد و در نهایت قطعه نهایی، صافی‌سطح بیشتری خواهد داشت. سارن شفلر و همکاران [۱۷] بررسی کردند که به چه میزان می‌توان از شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای برای تولید پوسته بیرونی و برخی از قطعات خودروی سواری استفاده کرد. آن‌ها هدف خود را با استفاده از روش‌های عددی و تجربی دنبال کردند و در انتها به این نتایج رسیدند که استفاده از شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای برای تولید کل بدنه خودروی سواری منطقی نیست، زیرا فرایندهای شکل‌دهی ساده‌تر و مقرون به‌صرفه‌تری از لحاظ قیمت برای سطوح منحنی شکل، مانند نورد وجود دارد و علاوه بر آن با این فرایند فلنج‌های چندضلعی ۹۰ درجه در جلوی خودرو را نمی‌توان تولید کرد. فابیان و همکاران [۱۸] تأثیر شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای را به‌صورت تجربی و عددی بر روی خواص مکانیکی قطعهٔ تولید شده بررسی کردند؛ زیرا تنش‌های پسماند ناشی از فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای به‌طور قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی قطعه تولید شده تأثیر می‌گذارد. آن‌ها از یک پد پلیمری به‌عنوان قالب انعطاف‌پذیر در طول فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای استفاده کردند. نتایج عددی و تجربی حاصل از پژوهش آنان، تأثیر برهم‌نهی تنش فشاری بر قطعهٔ تولید شده را بیان می‌کند. اثر برهم‌نهی تنش فشاری در این فرایند بر نیروهای فرایند، ضخامت ورق و سختی مواد مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

درنتیجه آنان به این نتایج دست یافتند که نیروهای فرایند در جهات x، y و z به علت تغییر شکل الاستیک با قالب انعطاف‌پذیر، افزایش یافته است و شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب انعطاف‌پذیر، منجر به کاهش ضخامت ورق می‌شود. آمبروگیو و مانکو [۱۹] تأثیر قطر ابزار، زاویه دیواره، ضخامت ورق و گام عمودی را بر روی تغییرات ایجاد شده در ضخامت کمینه ورق در فرایند شکل‌دهی تدریجی یک مخروط از جنس آلومینیوم بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که تغییرات قطر ابزار تأثیرات محسوسی بر ضخامت کمینه ندارد اما با افزایش میزان گام عمودی در طول فرایند شکل‌دهی تدریجی، ضخامت کمینه افزایش می‌یابد.

همان‌طور که گفته شد، فرایند شکل‌دهی تدریجی نسبت به سایر فرایندهای شکل‌دهی دارای برتری‌های قابل‌توجهی می‌باشد مانند انعطاف‌پذیری، سادگی و ارزانی ولی این روش کماکان دارای نواقصی قابل‌توجه نیز می‌باشد؛ در نهایت می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که دقت ابعادی و چگونگی توزیع ضخامت ورق در حین شکل‌دهی از موضوعات اساسی در بررسی و بهبود فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای می‌باشد. لذا به همین منظور هدف این پژوهش این است که با تغییر در پارامترهایی همچون قطر ابزار، گام عمودی، روانکار و راهبرد تغییر شکل، سبب بهبود خروجی‌هایی همچون دقت ابعادی و توزیع ضخامت شود. لازم به ذکر است که بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای در قطعاتی دوار یا با زاویهٔ دیواره با شیب کم می‌باشد؛ اما در این پژوهش به مطالعهٔ تجربی شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای در قالب صلبی با زاویه دیواره ۴۷ درجه پرداخته می‌شود. نکته قابل‌ذکر دیگر این است که در پژوهش‌های گذشته به‌ندرت به بررسی شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای با قالب‌های صلب منفی با راهبرد تک و دو مرحله‌ای پرداخته شده است؛ اما در این پژوهش به بررسی تجربی شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای با قالب صلب منفی با استفاده از ورق فولادی St12 به همراه روانکار در دو راهبرد شکل‌دهی یک و دو مرحله‌ای پرداخته شده است.

۲- روش تجربی

در این پژوهش شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای در تولید یک مخروط ناقص مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این پژوهش در دمای محیط انجام‌گرفته است. در شکل ۱، هندسه و ابعاد قطعه نهایی نشان داده شده است. تمامی ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ بر حسب میلی‌متر می‌باشد. زاویه دیواره شیب‌دار قطعه نیز مقدار ثابت ۴۷ درجه در نظر گرفته شده است.

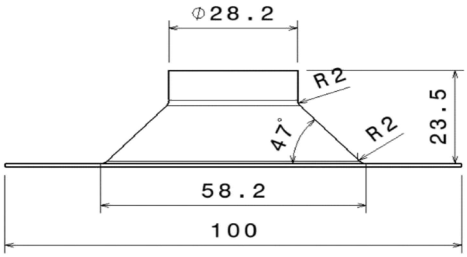


Fig. 1 View of the dimensions and shape of the final sample

شکل ۱ نمایی از ابعاد و شکل قطعه نهایی

با توجه به شکل ۲، ورق شکل داده شده در این فرایند یک ورق دایره‌ای شکل از جنس فولاد St12 و با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تجهیزات مورد نیاز در این پژوهش یک ابزار ساده سر کروی، قالب صلب کامل و یک دستگاه فرز کنترل عددی سه محور بود. شکل ۳، ابزار سر کروی نصب شده بر روی ابزارگیر را نشان می‌دهد. ابزار سر کروی مورد استفاده در فرایند از جنس کاربید تنگستن و به قطرهای ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد.

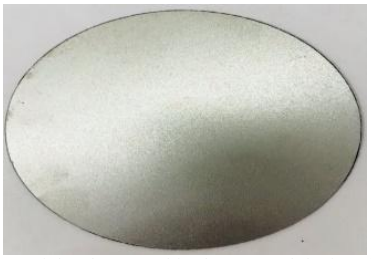


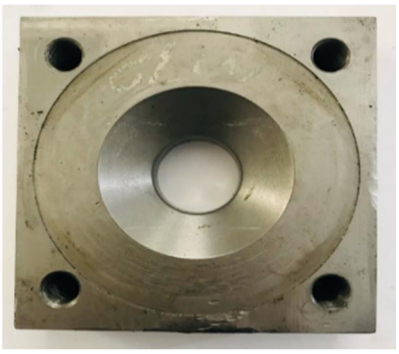
Fig. 2 The shape of the sheet used in the research before forming

شکل ۲ شکل ورق مورداستفاده در پژوهش قبل از شکل‌دهی

Fig. 3 The spherical head tool is placed on the tool holder and spindle of the machine

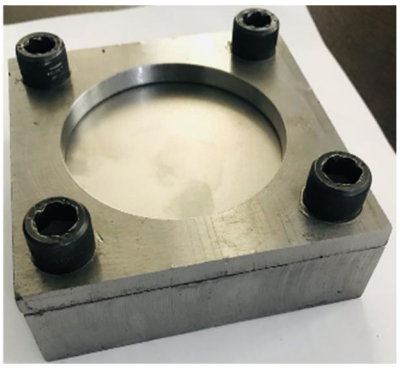
شکل ۳ ابزار سرکروی نصب شده بر روی ابزارگیر و اسپیندل دستگاه

مجموعه تجهیزات ساخته شده در این فرایند در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب دیده می‌شود، قالب مورد استفاده در این فرایند یک قالب صلب کامل بوده و مجموعه قالب دارای یک ورق گیر انتخاب شد تا درجه آزادی ورق، به‌جز محور Z در حین فرایند در سایر محورها صفر گردد. مجموعه قالب در مجموع شامل ورق، ورق‌گیر، قالب صلب کامل و ۴ عدد پیچ M12 بود. برای انجام فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای، ابتدا ورق به‌صورت دایره‌ای و به قطر ۱۰۰ میلی‌متر برش داده شد و سپس در قالب قرار گرفت. پس از قراردادن ورق در قالب و بستن ورق‌گیر به کمک پیچ‌ها بر روی قالب، فرایند شکل‌دهی به کمک دستگاه فرز کنترل عددی آغاز گردید. ابتدا به کمک نرم‌افزار کتیا قطعه نهایی، طراحی شد و سپس از نرم‌افزار پاورمیل جی‌کد[1] شکل نهایی طراحی‌شده استخراج گردید تا به کمک جی‌کد مسیر حرکت ابزار سر کروی در حین شکل‌دهی به دستگاه داده شود. مسیر حرکت ابزار در این پژوهش به‌صورت مارپیچ با گام‌های عمودی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر بود. نرخ پیشروی ابزار ۱۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دوران اسپیندل ۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، مجموعه قالب توسط گیره‌هایی بر روی میز دستگاه کنترل عددی بسته شد و سپس با دستگاه کنترل عددی، عملیات شکل‌دهی ورق انجام گردید.



(الف)

(ب)



(ج)

(د)

Fig. 4 a) The die used in this research is without a blank holder b) The blank holder used in this rasearch c) completed die d) The equipments used in this research

شکل ۴ الف) قالب استفاده شده در این پژوهش بدون ورق‌گیر ب) ورق‌گیر مورداستفاده در این پژوهش ج) قالب کامل د) تجهیزات استفاده شده در این پژوهش

۳- نتایج و بحث

با انجام آزمایش‌های متعدد و تکرارپذیری به این نکته پی برده شد که ورق مورد پژوهش در این آزمایش در ارتفاع ۲۴ میلی‌متر دچار پارگی می‌شود؛ لذا آزمایش‌ها مطابق شکل ۱ تا ارتفاع ۲۳/۵ میلی‌متر انجام گرفت. جدول ۱ نشان‌دهندهٔ آزمایش‌ها و پارامترهای مربوطه به هر آزمایش می‌باشد. در این آزمایش‌ها از استراتژی حرکت مارپیچ برای شکل‌دهی استفاده شد.

جدول ۱ آزمایش‌ها و پارامترهای متغیر در هر آزمایش

Table 1 Experiments and variable parameters in each experiment

آزمایش	گام عمودی (mm)	قطر ابزار (mm)	روانکار	استراتژی تغییر شکل
۱	۰/۵	۱۰	ندارد	۱ مرحله‌ای
۲	۰/۵	۱۵	ندارد	۱ مرحله‌ای
۳	۱	۱۵	ندارد	۱ مرحله‌ای
۴	۱/۵	۱۵	ندارد	۱ مرحله‌ای
۵	۰/۵	۲۰	ندارد	۱ مرحله‌ای
۶	۰/۵	۱۰	دارد	۱ مرحله‌ای
۷	۰/۵	۱۰	ندارد	۲ مرحله‌ای

[1] G-code

۳-۱- بررسی تأثیر قطر ابزار در گام عمودی ثابت بر روی توزیع ضخامت

در این مرحله از پژوهش به مقایسه توزیع ضخامت ورق در آزمایش‌های ۱، ۲ و ۵ پرداخته می‌شود که گام عمودی مقداری ثابت (۰/۵ میلی‌متر) و قطر ابزار به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

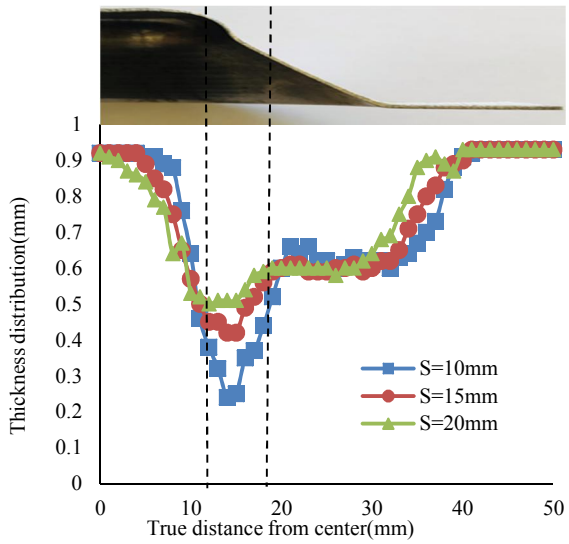


Fig. 5 The diagram of the effect of the tool diameter on the thickness distribution

شکل ۵ نمودار بررسی تأثیر قطر ابزار بر روی توزیع ضخامت

شکل ۵ نمودار توزیع ضخامت در سه نمونه آزمایش با قطر ابزارهای متفاوت را نشان می‌دهد. کمینه ضخامت سه نمونه تولید شده توسط قطر ابزار ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۴۲ و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. طبق مشاهدات و بررسی‌های انجام گرفته می‌توان به این نتایج دست یافت که با افزایش قطر ابزار، ناحیه تحت شکل‌دهی ورق که با ابزار در تماس است، افزایش می‌یابد که همین موضوع سبب می‌شود که نیروهای شکل‌دهی بر سطح بزرگ‌تری از ورق در هنگام شکل‌دهی توزیع شوند که درنتیجه آن فشار وارد از ابزار به ورق کاهش و ضخامت کمینه افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که هر چه قطر ابزار کمتر می‌شود، شکل‌دهی موضعی‌تر شده و کرنش‌های ضخامتی و طولی بیشتری به ورق اعمال می‌شود. درنتیجه در این پژوهش، شکل‌دهی با قطر ابزار ۲۰ میلی‌متر دارای بهترین توزیع ضخامت می‌باشد. لازم به ذکر است که توزیع ضخامت با کولیس ضخامت‌سنج اندازه‌گیری شده است.

۳-۲- بررسی تأثیر قطر ابزار در گام عمودی ثابت بر روی دقت ابعادی

در این مرحله از پژوهش به مقایسه دقت ابعادی نمونه تولیدی در آزمایش‌های ۱، ۲ و ۵ پرداخته می‌شود که گام عمودی مقداری ثابت (۰/۵ میلی‌متر) و قطر ابزار به ترتیب ۱۰،۱۵ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است، با کاهش قطر ابزار، گوشه‌های نمونه بهتر شکل داده می‌شوند و درنتیجه سبب دقت ابعادی بهتری در قطعه می‌شود. شکل ۹ به مقایسه نمونه‌های تولیدی با ابزارهایی با قطرهای متفاوت با نمونه طراحی شده پرداخته است. درنتیجه با کاهش قطر ابزار، ناحیه تماس بین ابزار و ورق کاهش می‌یابد و همین موضوع سبب بهبود دقت ابعادی در قطعاتی با گوشه‌های نوک‌تیز می‌باشد. لازم به ذکر است که دقت ابعادی نمونه‌های تولیدی توسط دستگاه پروفیل سنج انجام شده است.

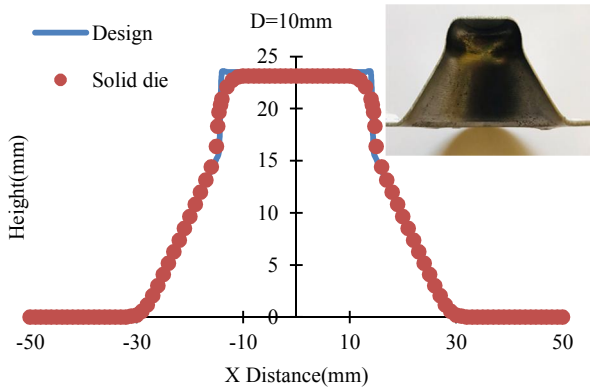


Fig. 6 Comparison diagram of the effect of tool diameter of 10 mm on the dimensional accuracy of the production sample with the designed sample

شکل ۶ نمودار مقایسه تأثیر قطر ابزار ۱۰ میلی‌متر در دقت ابعادی نمونه تولیدی با نمونه طراحی‌شده

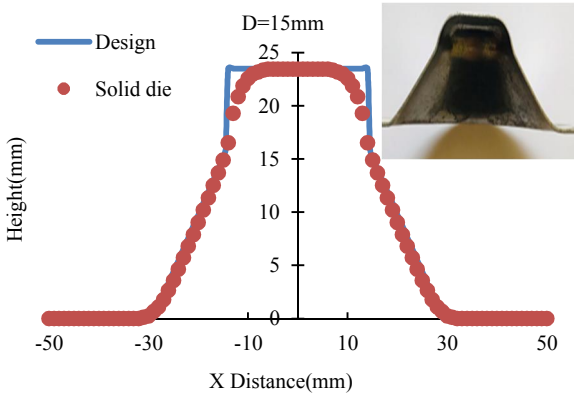


Fig. 7 Comparison diagram of the effect of tool diameter of 15 mm on the dimensional accuracy of the production sample with the designed sample

شکل ۷ نمودار مقایسه تأثیر قطر ابزار ۱۵ میلی‌متر در دقت ابعادی نمونه تولیدی با نمونه طراحی‌شده

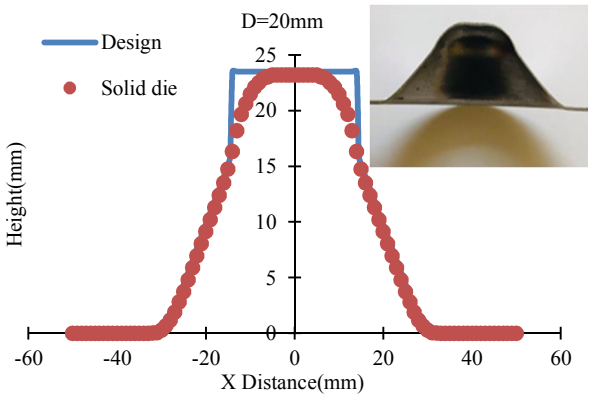


Fig. 8 Comparison diagram of the effect of tool diameter of 20 mm on the dimensional accuracy of the production sample with the designed sample

شکل ۸ نمودار مقایسه تأثیر قطر ابزار ۲۰ میلی‌متر در دقت ابعادی نمونه تولیدی با نمونه طراحی‌شده

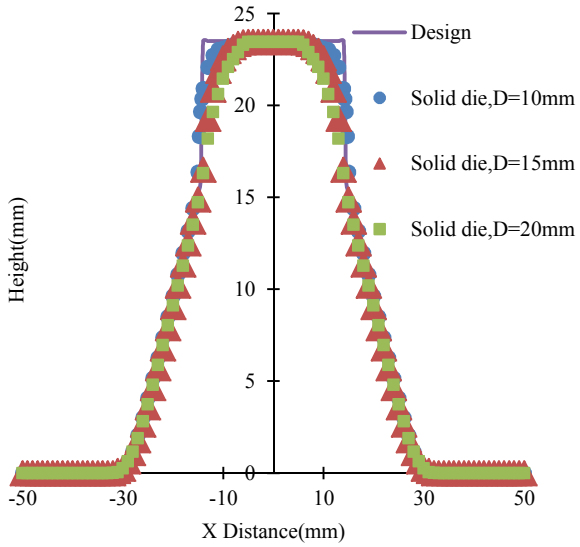


Fig. 9 The diagram of the effect of the tool diameter on the dimensional accuracy

شکل ۹ نمودار بررسی تأثیر قطر ابزار بر روی دقت ابعادی

۳-۳- بررسی تأثیر گام عمودی در قطر ابزار ثابت بر روی توزیع ضخامت

در این مرحله از پژوهش به مقایسه توزیع ضخامت ورق در آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ پرداخته می‌شود که قطر ابزار مقداری ثابت (۱۵ میلی‌متر) و گام عمودی به ترتیب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. در این آزمایش‌ها از راهبرد حرکت مارپیچ برای شکل‌دهی استفاده‌شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، به‌طورکلی می‌توان گفت که گام عمودی در بازه مورد بررسی این پژوهش تأثیر بسزایی بر توزیع ضخامت نمونه تحت شکل‌دهی ندارد؛ اما با نگاهی دقیق‌تر به ناحیه ضخامت کمینه، می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که با افزایش گام عمودی در ابتدا ضخامت کمینه، افزایش و سپس کاهش می‌یابد این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که در گام‌های عمودی بزرگ‌تر یک قسمت مشخص از ماده تعداد دفعات کمتری با ابزار در تماس قرار می‌گیرد. این موضوع سبب می‌شود که مناطق تغییر شکل نیافته (که به‌صورت زبری سطح قابل‌مشاهده است) بیشتر شود و سبب افزایش تأثیر خمش گردد. درنتیجه تغییر شکل در گام‌های کوچک‌تر نسبت به گام‌های بزرگ‌تر شدیدتر و نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی هرچند کم، ولی بیشتر می‌شود. علاوه‌برآن می‌توان به این نتیجه دست‌یافت که افزایش گام عمودی سبب افزایش زبری سطح نیز می‌گردد.

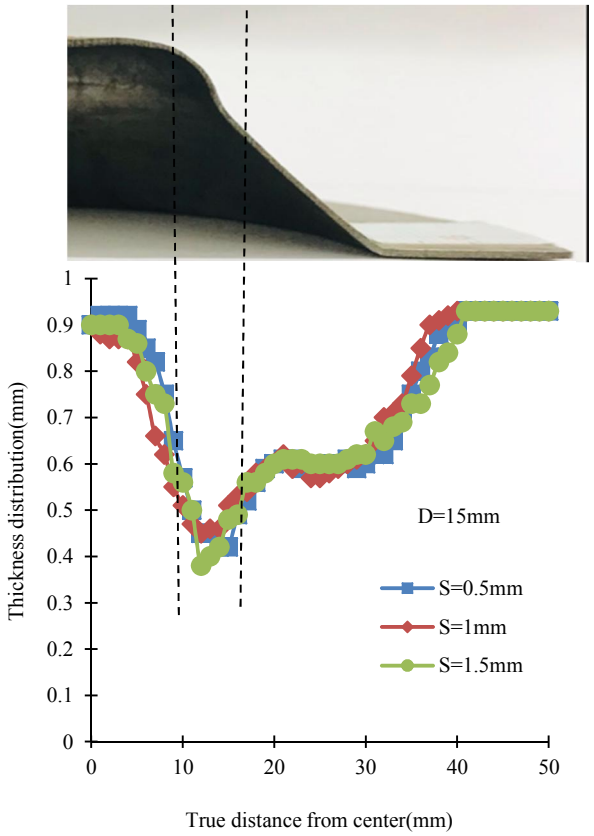


Fig. 10 The diagram of the effect of the Step down on the thickness distribution

شکل ۱۰ نمودار بررسی تأثیر گام عمودی بر روی توزیع ضخامت

درضمن این نکته نیز قابل‌توجه می‌باشد که با افزایش گام عمودی، نیروی وارد به ورق افزایش پیدا می‌کند. دلیل آن این موضوع می‌باشد که هرچه گام عمودی بیشتر شود، ابزار کرنش محلی بیشتری را به ورق اعمال می‌کند که این موضوع سبب این می‌شود که همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، بیشترین ضخامت کمینه در بیشترین گام عمودی (۱/۵ میلی‌متر) رخ دهد.

۳-۴- بررسی تأثیر گام عمودی در قطر ابزار ثابت بر روی دقت ابعادی

در این مرحله از پژوهش به مقایسه دقت ابعادی ورق در آزمایش‌های ۲، ۳ و ۴ پرداخته می‌شود که قطر ابزار مقداری ثابت (۱۵ میلی‌متر) و گام عمودی به ترتیب ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. در این آزمایش‌ها از راهبرد حرکت مارپیچ برای شکل‌دهی استفاده شده است.

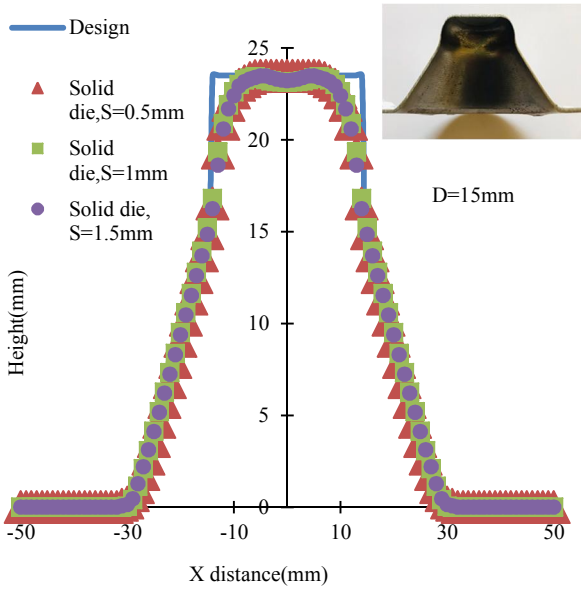


Fig. 11 The diagram of the effect of the Step down on the dimensional accuracy

شکل ۱۱ نمودار بررسی تأثیر گام عمودی بر روی دقت ابعادی

همان‌طور که در شکل ۱۱ قابل‌مشاهده می‌باشد. تغییرات در گام عمودی در قطر ثابت، تأثیر قابل‌توجهی در دقت ابعادی قطعه تولیدی ندارد.

۳-۵- بررسی تأثیر راهبرد تغییر شکل در قطر ابزار و گام عمودی ثابت بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت

در این مرحله از پژوهش به بررسی دقت ابعادی و توزیع ضخامت نمونه تولیدی در آزمایش‌های ۱ و ۷ پرداخته می‌شود که گام عمودی و قطر ابزار به ترتیب در هر دو آزمایش ۰/۵ و ۱۰ میلی‌متر و پارامتر متغیر در آن‌ها راهبرد تغییر شکل می‌باشد. راهبرد تغییر شکل آن‌ها به ترتیب تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای می‌باشد. در راهبرد تغییر شکل دو مرحله‌ای (آزمایش ۷)، مطابق شکل ۱۲ در مرحله اول، راهبرد تغییر شکل به این نحو می‌باشد که شکل‌دهی ورق در راستای زاویه ۴۷ درجه دیواره شیب‌دار قالب تا انتهای قالب ادامه می‌یابد و درنتیجه مشاهده می‌شود که ورق تا محل‌تقاطع با محور دوران مخروط (یعنی ارتفاع ۳۱/۲۱ میلی‌متر)، بدون پارگی شکل داده می‌شود و در مرحله دوم طبق راهبرد و ابعاد استفاده شده در مابقی آزمایش‌ها، ورق تا ارتفاع ۲۳/۵ میلی‌متر شکل داده می‌شود که شکل ۱۳ نشان‌دهنده نمونه تولیدی در مرحله اول راهبرد شکل‌دهی دو مرحله‌ای می‌باشد.

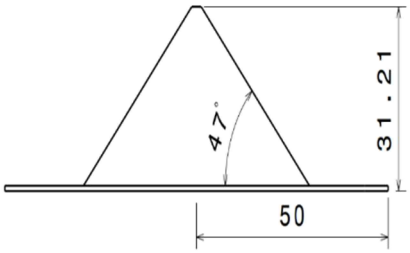


Fig. 12 A view of the dimensions of the sample in the formation of the first stage of the two-stage strategy

شکل ۱۲ نمایی از ابعاد نمونه در شکل‌دهی مرحله اول راهبرد دومرحله‌ای

Fig. 13 A view of the sample produced in the first stage of the two-stage strategy

شکل ۱۳ نمایی از نمونه تولیدشده در مرحله اول راهبرد دومرحله‌ای

همان‌طور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، در راهبرد شکل‌دهی دومرحله‌ای ضخامت کمینه ۰/۳۹ میلی‌متر ولی در راهبرد شکل‌دهی تک‌مرحله‌ای ۰/۲۴ میلی‌متر می‌باشد؛ درنتیجه قابل مشاهده است که با به‌کارگیری راهبرد شکل‌دهی جدید و افزایش تعداد مراحل آن از یک مرحله به دو مرحله، مقدار ضخامت کمینه افزایش یافت که سبب بهبود توزیع ضخامت نمونه و کاهش نازک‌شدگی و در نهایت احتمال پارگی در نمونه می‌شود. لازم به ذکر است که علت کاهش ضخامت بیشتر در مرکز نمونه در راهبرد دو مرحله‌ای نسبت به تک‌مرحله‌ای، افزایش عمق شکل‌دهی از ۲۳/۵ به ۳۱/۲۱ میلی‌متر می‌باشد.

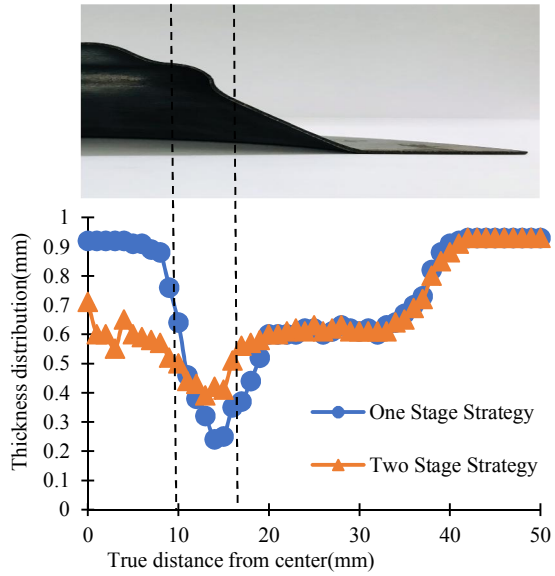


Fig. 14 The diagram to investigate of the the effect of shape change strategy on thickness distribution

شکل ۱۴ نمودار بررسی تأثیر راهبرد تغییر شکل بر روی توزیع ضخامت

همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل‌مشاهده است، تغییر راهبرد تغییر شکل تأثیر بسزایی در دقت ابعادی نمونه تولیدی ندارد.

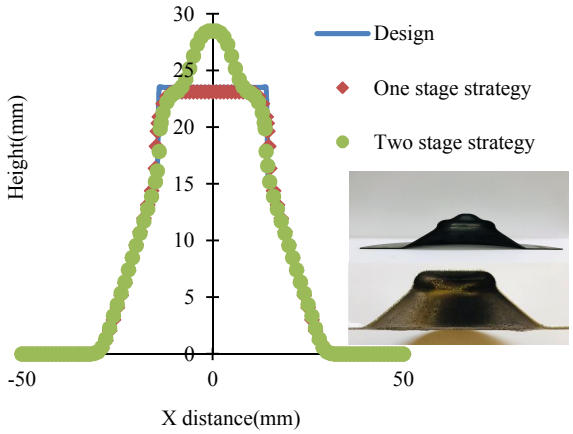


Fig. 15 The diagram to investigate of the the effect of shape change strategy on dimensional accuracy

شکل ۱۵ نمودار بررسی تأثیر راهبرد تغییر شکل بر روی دقت ابعادی

۳-۶- بررسی تأثیر روانکار در قطر ابزار و گام عمودی ثابت بر روی توزیع ضخامت و دقت ابعادی

در این مرحله از پژوهش به بررسی دقت ابعادی و توزیع ضخامت نمونه تولیدی در آزمایش‌های ۱ و ۶ پرداخته می‌شود که گام عمودی و قطر ابزار به ترتیب در هر دو آزمایش ۰/۵ و ۱۰ میلی‌متر و پارامتر متغیر در آن‌ها روانکار می‌باشد. استفاده از روانکار باعث کاهش اصطکاک بین سطح تماس ابزار و ورق می‌شود که این موضوع سبب کاهش میزان نازک‌شدگی و در نهایت کاهش احتمال پارگی می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷، در این پژوهش، روانکار تأثیر چشم‌گیری در توزیع ضخامت و دقت ابعادی نمونه تولیدی ندارد و فقط می‌توان به این نکته اشاره کرد که استفاده از روانکار در این پژوهش تنها سبب کاهش زبری سطح گردید.

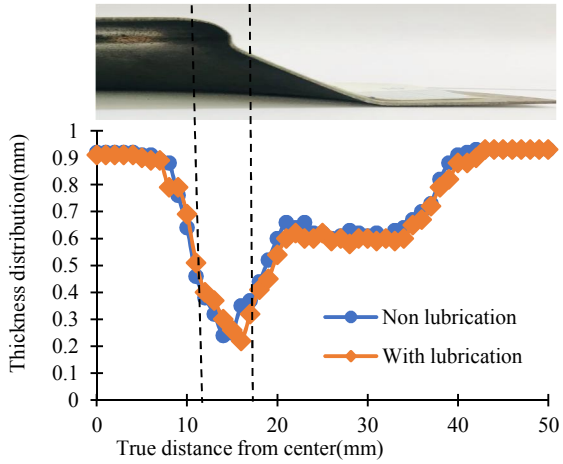


Fig. 16 The diagram of the effect of the lubrication on the thickness distribution

شکل ۱۶ نمودار بررسی تأثیر روانکار بر روی توزیع ضخامت

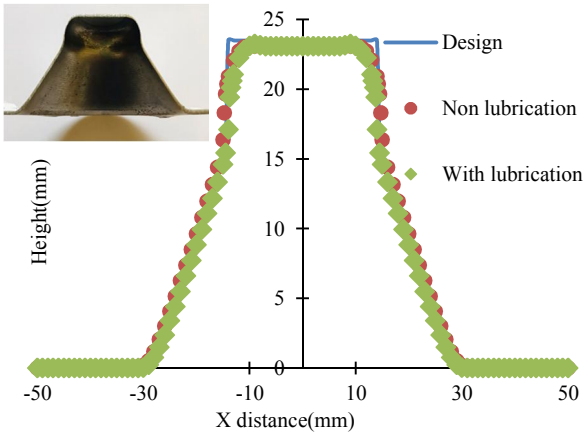


Fig. 17 The diagram of the effect of the lubrication on the dimensional accuracy

شکل ۱۷ نمودار بررسی تأثیر روانکار بر روی دقت ابعادی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ورق فولادی St12 توسط ابزار سر کروی با قطرهای مختلف، روانکار و گام‌های عمودی متفاوت به کمک یک قالب منفی انجام شد تا بتوان با انجام آزمایش‌های مختلف به بررسی پارامترهای توزیع ضخامت و دقت ابعادی به‌صورت تجربی پرداخت که در نهایت نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

۱. با افزایش قطر ابزار از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر در گام عمودی ثابت، ناحیه در تماس بین ورق و ابزار افزایش می‌یابد که این موضوع سبب توزیع نیروهای شکل‌دهی بر سطح بزرگ‌تری می‌شود که درنتیجه ضخامت کمینه از ۰/۲۴ به ۰/۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد که سبب کاهش نازک‌شدگی و در نهایت احتمال پارگی در ورق می‌شود.

۲. با کاهش قطر ابزار از ۲۰ به ۱۰ میلی‌متر در گام عمودی ثابت، گوشه‌های نوک‌تیز بهتر شکل داده می‌شوند که این موضوع سبب بهبود دقت ابعادی در نمونه تولیدی می‌شود.

۳. با افزایش گام عمودی از ۰/۵ به ۱/۵ میلی‌متر در قطر ابزار ۱۵ میلی‌متر، ضخامت کمینه در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این موضوع سبب افزایش زبری سطح و خمش در نمونه تولیدی می‌شود.

۴. تغییرات مقدار گام عمودی از ۰/۵ به ۱/۵ میلی‌متر در قطر ابزار ۱۵ میلی‌متر، تأثیر چندانی در دقت ابعادی نمونه تولیدی ندارد.

۵. در گام عمودی ۰/۵ و قطر ابزار ۱۰ میلی‌متر با به‌کارگیری راهبرد شکل‌دهی جدید و افزایش تعداد مراحل آن از یک مرحله به دو مرحله، مقدار ضخامت کمینه از ۰/۲۴ به ۰/۳۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد که سبب بهبود توزیع ضخامت نمونه و کاهش احتمال پارگی در نمونه می‌شود؛ همچنین لازم به ذکر است که تغییرات در راهبرد شکل‌دهی تأثیر چشم‌گیری در دقت ابعادی نمونه تولیدی ندارد.

۶. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، روانکار تأثیر چشم‌گیری در توزیع ضخامت و دقت ابعادی نمونه تولیدی ندارد و فقط می‌توان به این نکته اشاره کرد که استفاده از روانکار در این پژوهش تنها سبب کاهش زبری سطح گردید.

۵- مراجع

[1] S.Hajiahmadi, M .Elyasi, M. Shakeri, Development a new methodology for measuring deep drawing forces based on dimensionless evaluation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* Vol. 235, No. 19, pp. 4057-4069, 2021. https://doi.org/10.1177/0954406220969718

[2] R. Ghasemi, M. Elyasi, H. Baseri, M. J. Mirnia, Microstructural analysis of sheet hydroforming process assisted by radial ultrasonic punch vibration in a hydro-mechanical deep drawing die, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 125, No. 11-12, pp. 5359-5368, 2023. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11007-x

[3] A. H. Nikdooz, M. J. Mirnia, H. Baseri, Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 16, No. 5, pp. 210-220, 2016. (in Persian)

[4] K. Jackson, J. Allwood, The mechanics of incremental sheet forming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, No. 3, pp. 1158-1174, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025

[5] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, L. Mazzoni, Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization, *Journal of materials processing technology*, Vol. 197, No. 1-3, pp. 59-67, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053

[6] 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 Manufacturing Technology*, Vol. 102, pp. 2933-2952, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03307-y

[7] M. Silva, P. Martins, Two-point incremental forming with partial die: theory and experimentation, *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 22, pp. 1018-1027, 2013. https://doi.org/10.1007/s11665-012-0400-3

[8] V. Franzen, L. Kwiatkowski, G. Sebastiani, R. Shankar, A. Tekkaya, M. Kleiner, Dyna-die: towards full kinematic incremental forming, *International Journal of Material Forming,* vol. 1, pp. 1163-1166, 2008. https://doi.org/10.1007/s12289-008-0187-9

[9] S. Kurra, S. P. Regalla, Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming, *Journal of Materials Research and Technology,* Vol. 3, No. 2, pp. 158-171, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.03.009

[10] C. V. Ajay, C. Boopathi, P. Kavin, Incremental sheet metal forming (ISMF): A literature review, in *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2128, No. 1, pp. 030012: AIP Publishing LLC. https://doi.org/10.1063/1.5117955

[11] M.S. Shim, J.J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 113, No. 1-3, pp. 654-658, 2001. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00679-3

[12] S. Darzi, M. J. Mirnia, M. Elyasi, Single-point incremental forming of AA6061 aluminum alloy at elevated temperatures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 116, No. 3-4, pp. 1023-1039, 2021.

https://doi.org/10.1007/s00170-021-07494-5
[13] H. Movahedinia, M. J. Mirnia, M. Elyasi, H. Baseri, An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 94, pp. 867-880, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0971-0
[14] M. Ham, J. Jeswiet, Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003, *CIRP annals,* Vol. 55, No. 1, pp. 241-244, 2006. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7
[15] M. Vahdati, M. Sedighi, H. Khoshkish, An analytical model to reduce spring-back in incremental sheet metal forming (ISMF) process, in *Advanced materials research*, 2010, Vol. 83, pp. 1113-1120: Trans Tech Publ. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1113
[16] 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, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 233, No. 3, pp. 900-913, 2019. https://doi.org/10.1177/0954405418755822
[17] S. Scheffler, A. Pierer, P. Scholz, S. Melzer, D. Weise, Z. Rambousek, Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts, *Procedia Manufacturing,* Vol. 29, pp. 105-111, 2019. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.112
[18] F. Maaß, M. Hahn, A. E. Tekkaya, Adjusting residual stresses by flexible stress superposition in incremental sheet metal forming, *Archive of Applied Mechanics,* Vol. 91, pp. 3489-3499, 2021. https://doi.org/10.1007/s00419-021-01929-x
[19] G. Manco, G. Ambrogio, Influence of thickness on formability in 6082-T6, *International Journal of Material Forming,* Vol. 3, pp. 983-986, 2010. https://doi.org/10.1007/s12289-010-0934-6