



بررسی تجربی استراتژی تغییر شکل ورق فلزی AA6061 به منظور فلنج‌زنی لبه با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای

کیوان مریدی^۱، محمد جواد میرنیا^{۲*}، مجید الیاسی^۳

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

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

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mirnia@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۰ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۷ مهر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

شکل‌دهی تدریجی ورق

فلنج زنی لبه

شکل‌دهی چند مرحله‌ای

دقت ابعادی

در این مقاله، به بررسی دو استراتژی تغییر شکل مختلف شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای برای تولید فلنج دایره‌ای از ورق آلومینیوم AA6061 با ضخامت ۱ میلی‌متر پرداخته شد. تاثیر پارامترهایی همچون گام عمودی، قطر ابزار، ارتفاع اولیه لبه آزاد فلنج و استراتژی تغییر شکل بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از استراتژی مسیر ابزار S2 که این استراتژی در طی چند مرحله فرایند شکل‌دهی را انجام می‌دهد. دقت ابعادی را در فلنج زنی لبه آزاد ۵ میلی‌متر، نسبت به استراتژی مسیر ابزار S1 که استراتژی است که در طی یک مرحله انجام می‌شود، بهبود بخشید و ارتفاع اولیه لبه آزاد فلنج قابل شکل‌دهی در استراتژی چند مرحله ای S2 بیشتر بود. توزیع ضخامت استراتژی S1 نسبت به استراتژی S2 برای لبه آزاد ۵ میلی‌متر با ۱۰،۲٪ بهبود و برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر، استراتژی S2 نسبت به استراتژی S1 با ۲،۱۵٪ بهبود داشت. همچنین مشاهده شد که با افزایش قطر و گام عمودی، دقت ابعادی افزایش یافته و ضخامت قطعه با افزایش قطر و گام عمودی کاهش داشته است.

Experimental investigation of AA6061 sheet metal deformation strategy for flange edge forming using single point incremental forming process

Keivan Moridi¹, Mohammad Javad Mirnia^{2*}, Majid Elyasi³

1- PhD Student, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding Author's Email: mirnia@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 June 2024

Accepted: 8 October 2024

Keywords:

Incremental Sheet Forming

Edge Flanging

Multi-stage Forming

Dimensional Accuracy

Abstract

In this article, two different deformation strategies of single point incremental forming were investigated for producing a circular flange from AA6061 aluminum sheet with a thickness of 1mm. The effect of parameters such as step increment, tool diameter, initial height of the flange free edge, and deformation strategy on dimensional accuracy and thickness distribution was investigated. Results revealed that employing the 2S tool path strategy, which involves a multi-stage forming process, significantly enhanced dimensional accuracy in flanging for a 5mm free edge compared to the 1S tool path strategy, a single-stage process. Additionally, the initial height of the flange free edge that could be formed was greater in the multi-stage 2S strategy. The thickness distribution of the 1S strategy exhibited a 1.02% improvement over the 2S strategy for a 5mm free edge, whereas for a 10mm free edge, the 2S strategy showed a 2.15% improvement compared to the 1S strategy. It was also observed that with increasing tool diameter and step increment, dimensional accuracy increased and part thickness decreased with increasing tool diameter and step increment.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Moridi K, Mirnia MJ, Elyasi M. Experimental investigation of AA6061 sheet metal deformation strategy for flange edge forming using single point incremental forming process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Aug 22;11(6):66-77. doi: 10.22034/IJME.2024.465287.1979 [In Persian]

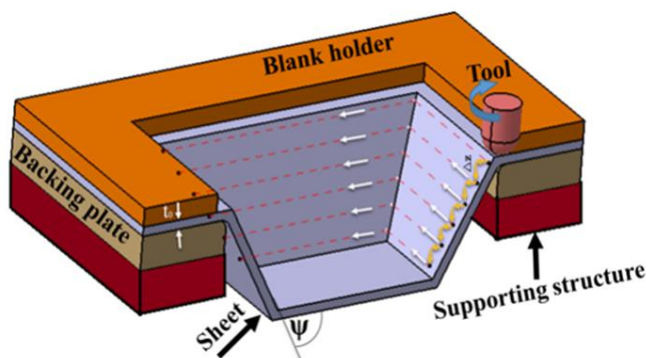
۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، صنایع مرتبط با شکل‌دهی ورق‌های فلزی برای تولید محصولات کوچک‌تر، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش انعطاف‌پذیری فرایند برای ساخت هندسه‌های پیچیده، وارد عرصه رقابتی شده‌اند. به همین دلیل، فرایندهای سنتی شکل‌دهی ورق فلزی بخاطر هزینه بالای تجهیزات و افزایش زمان موردنیاز برای تنظیمات و ساخت قالب، برای نمونه‌سازی سریع و همچنین تولید نمونه‌های با هندسه پیچیده، اقتصادی نخواهند بود. به این منظور، فرایند تدریجی شکل‌دهی ورق فلزی به عنوان یک روش نوین برای نمونه‌سازی سریع و تولید محصولات از ورق فلزی در حجم کوچک، معرفی شد [۱].

ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی در کشور آمریکا توسط روثاس [۲] در سال ۱۹۶۰ و لیزاک [۳] در سال ۱۹۶۷ به صورت اختراع ثبت شد. به دلیل محدودیت‌های ماشین‌های کنترل عددی در آن دوره، این روش در آغاز مورد استقبال قرار نگرفت، اما در اوایل دهه ۱۹۹۰ و به ویژه در ژاپن مورد توجه قرار گرفت. ماتسویارا [۴] در سال ۱۹۹۴ از این روش برای شکل‌دهی و تولید قطعات با ورق فلزی استفاده کرد. با پیشرفت ماشین‌های کنترل عددی، سرعت توسعه و استفاده از این روش شکل‌دهی افزایش یافت و اخیراً در اروپا و کانادا نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است.

شکل‌دهی تدریجی ورق، فرایند انعطاف‌پذیری است که در آن ورق فلزی به تدریج با حرکت ابزار در فضای آزاد شکل می‌گیرد. منظور از فضای آزاد، عدم حضور قالب مادگی است که خود همین امر باعث انعطاف‌پذیری فرایند برای تولید شکل‌هایی با هندسه پیچیده می‌شود. با توجه به این که ورق به صورت موضعی شکل‌دهی می‌شود و نیروها متمرکز بر منطقه تماس ابزار با ورق هستند، شکل‌پذیری ورق در این فرایند افزایش می‌یابد. شکل‌دهی تدریجی را می‌توان بر اساس روش شکل‌دهی، به دو دسته اصلی تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای تقسیم و همچنین بر اساس دمای کاری به سرد و گرم تقسیم نمود.

شکل‌دهی تدریجی به علت میزان شکل‌پذیری خوبی که دارد قابل رقابت با دیگر فرایندها مانند استمپینگ، هیدروفرمینگ و کشش عمیق است [۵]. شکل ۱ شماتیکی از فرایند شکل‌دهی تدریجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای [۶]

با توجه به کاربرد این فرایند، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. میرنیا و همکاران [۷] به بررسی اثر قطر ابزار و گام عمودی بر توزیع ضخامت در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای یک مخروط ناقص پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش قطر ابزار، میزان کشش ورق افزایش می‌یابد. این افزایش کشش، منجر به کاهش ضخامت ورق در ناحیه تحت کشش می‌شود و با افزایش گام عمودی تا یک حد مشخص، سبب بهبود نازک شدن ورق در فرایند SPIF می‌شود؛ به عبارت دیگر، با افزایش گام عمودی، ضخامت ورق به‌طور یکنواخت‌تر در سطح مخروط ناقص توزیع می‌شود.

وسوینکل و همکاران [۸] قابلیت‌ها و محدودیت‌های عملیات لبه‌زنی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی ورق مورد بررسی قرار دادند. عملیات لبه‌زنی صاف، لبه‌زنی انقباضی و لبه‌زنی کششی در نظر گرفته شد و تأثیر استراتژی ساخت و همچنین طول لبه و شعاع لبه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای لبه‌هایی با طول ۲۰ میلی‌متر و کمتر، مسیر ابزار تک مرحله‌ای به دلیل سادگی مسیر ابزار کافی و مطلوب است. در حالی که عملیات لبه‌زنی صاف حساسیت قابل توجهی به این متغیرها نشان نمی‌دهد، عملیات لبه‌زنی کششی و انقباضی وابستگی قابل توجهی به طول و شعاع لبه نشان می‌دهند.

ون و همکاران [۹] یک روش انعطاف‌پذیر فلنج‌زنی با فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای که از ابزارهای نواری ساده با شانه‌های مخروطی در یک استراتژی دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فلنج‌زنی لبه‌های باز و حاشیه‌های سوراخ مختلف ورق با استفاده از این روش بدون قالب امکان‌پذیر است. فلنج‌زنی تدریجی بدون قالب، حالت‌های خاصی از نیرو و تغییر شکل را ایجاد می‌کند و ممکن است به ایجاد عیوب مختلف از جمله انحراف صفحه و تاشوندگی در شروع فلنج‌زنی منجر شود. زاویه شیب بیشتر شانه ابزار باعث کاهش تمایل به تاشوندگی می‌شود اما ممکن است باعث افزایش انحراف صفحه شود. مقدار توصیه شده برای فلنج‌زنی سوراخ‌های دایره‌ای بین ۲۰ تا ۳۰ درجه بود. ورق‌های منحنی کمترین انحراف صفحه را در مقایسه با ورق‌های صاف دارند زیرا منحنی، سختی ساختاری را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استراتژی‌های کنترل عیوب رایج از طریق بهینه‌سازی مسیر و اصلاح هندسه ابزارها ارائه شد.

کریستینو و همکاران [۱۰] آزمایش تجربی تولید فلنج‌های مربعی در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای را بررسی کردند و به بررسی پارامترهای موثر بر آن پرداختند. اثرات هندسی برش اولیه مانند طول اضلاع مربع، شعاع فیلت گوشه‌های حفره و نمودارهای حد شکل‌دهی در نواحی مختلف فلنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داده است که با افزایش شعاع فیلت و اضلاع حفره اولیه، پارگی در نمونه به تاخیر می‌افتد.

حسین و همکاران [۱۱] تاثیر اندازه سوراخ اولیه بر شکل‌پذیری لبه‌دار کردن استوانه‌ای شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. لبه در چهار مرحله از 40° تا 90° و با استفاده از آلومینیوم به‌عنوان ماده آزمایش ساخته شده است. نتایج نشان داد که اندازه سوراخ بر توزیع تنش/کرنش روی لبه استوانه‌ای تاثیر قابل توجهی دارد. با افزایش اندازه سوراخ، بزرگی کرنش حلقوی و ضخامت لبه افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش اندازه سوراخ از مقدار آستانه، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. در نهایت، این نتیجه حاصل شد که ۸۰ میلی‌متر اندازه آستانه سوراخ برای به حداکثر رساندن شکل‌پذیری ورق آلومینیوم در لبه‌دار کردن تک نقطه‌ای است. گنزالز و همکاران [۱۲] با استفاده از تکنیک همبستگی تصویر دیجیتال، دقت هندسی و توزیع ضخامت را در فرایند فرم‌دهی چند مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مخروط‌های ناقص را با استفاده از استراتژی چند مرحله‌ای شکل‌دهی کرده و نتایج را با روش تک مرحله‌ای مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استراتژی چند مرحله‌ای تاثیر قابل توجهی بر دقت هندسی قطعه‌ی نهایی دارد. همچنین، دریافتند که کاهش ضخامت در استراتژی چند مرحله‌ای یکنواخت نبوده و در ناحیه شکل‌دهی شده، روندی پارابولیک را نشان می‌دهد.

بامباخ و همکاران [۱۳] روش جدیدی برای سوراخ‌زنی با استفاده از ابزار پارویی شکل بررسی کردند. نتایج نشان داد شکل‌دهی تدریجی با استفاده از ابزار پارویی شکل، شکل‌دهی بالاتری نسبت به سوراخ‌زنی SPIF چند مرحله‌ای و سوراخ‌زنی معمولی دارد. علاوه بر این گرمای تولید شده به دلیل اصطکاک بین ابزار و قطعه منجر به افزایش دما شد که شکل‌دهی را افزایش داد.

لی و همکاران [۱۴] سه استراتژی مسیر چند مرحله‌ای با استفاده از شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای (استراتژی خط موازی، استراتژی زاویه متغیر و استراتژی به کمک خمش) برای بررسی تاثیر مسیرهای ابزار بر توزیع ضخامت، استفاده کردند. جریان و خطای هندسی در مرحله اول، توزیع ضخامت تجربی اهرام تشکیل شده با سه استراتژی مسیر و استراتژی TPIF تک مرحله‌ای مقایسه شد. در مقایسه با استراتژی TPIF تک مرحله‌ای، استراتژی‌های مسیر MTPIF مورد بررسی در این مقاله بهبود توزیع ضخامت اهرام ناقص هم در دیواره و هم در گوشه مشاهده شد. از طریق تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده مشخص شد که توزیع ضخامت در دیوار را می‌توان با تنظیم زوایای شکل‌دهی میانی کنترل کرد که شکل‌دهی میانی در جهت محیطی تاثیر قابل توجهی بر توزیع ضخامت برای قطعات پیچیده دارد. همچنین جریان مواد سه استراتژی در مراحل مختلف شکل‌دهی تحلیل شد. مشخص شد که مواد در فلنج و همچنین قوس‌های انتقال به دیوار تغییر شکل می‌دهند تا توزیع ضخامت را افزایش دهند. در نهایت، با در نظر گرفتن هر دو توزیع ضخامت و خطاهای هندسی، استراتژی زاویه متغیر به عنوان استراتژی موثر برای فرایند مورد بررسی انتخاب شد.

سلیمانی‌فر و همکاران [۱۵] استراتژی چند مرحله‌ای در فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر که از تعدادی پین سرکروی مجزا تشکیل شده که می‌توان ارتفاع هر یک از پین‌ها را متناسب با هندسه مورد نظر تنظیم نمود را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که دقت هندسی نمونه‌ای که بر روی لایه لاستیکی با ضخامت ۰٫۵ میلی‌متر فرم داده می‌شود در مقایسه با ضخامت ۶ میلی‌متر به میزان ۷۸٫۳٪ بهبود یافت، اما میزان نازک‌شدگی این قطعه کار بیش از سایر قطعات بود. همچنین

نتایج نشان داد که پین‌ها با آرایش کامل نسبت به چیدمان جزئی در قالب‌های انعطاف‌پذیر دارای دقت هندسی و توزیع ضخامت مناسب‌تری در قطعات تولید شده بودند. استفاده از استراتژی چند مرحله‌ای در قالب انعطاف‌پذیر، عیب چروکیدگی را به همراه داشت. چن و همکاران [۱۶] فلنج‌زنی ورق‌های آلومینیوم AA6۰۶۱ و ورق‌های استیل ضدزنگ SUS ۳۰۴ با ضخامت ۱ میلی‌متر و ۰٫۳ میلی‌متر با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی، تغییرات ضخامت از ناحیه شروع تا لبه فلنج به سمت نازک شدن است، اما میزان شدت کاهش ضخامت در نواحی شروع فلنج و لبه فلنج یکسان به ست نیامده است. این اختلاف با افزایش زاویه خم فلنج، بیشتر شده و حداکثر برگشت فنی با افزایش قطر ابزار و زاویه شیب افزایش داشته است.

هاشمی [۱۷] فلنج‌زنی توسط یک ابزار جدید را مورد بررسی قرار داد. شکل‌دهی دیواره فلنج با یک ابزار جدید که شامل دو سنبه شکل‌دهی است انجام شد. حرکت ابزار در حال دوران، ساده و با گام مشخص رو به پایین در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با استفاده از این روش می‌توان فلنج با قطرهای مشخص را با سرعت بالا روی ورق‌های آلومینیومی شکل داد. با افزایش قطر سوراخ اولیه ایجاد شده روی ورق، ارتفاع فلنج بیشتری قابل دستیابی بوده اما نازک‌شدگی هم افزایش یافت. افزایش سرعت دورانی ابزار منجر به شکل‌دهی فلنج‌هایی با ارتفاع بیشتر شد اما با بیشتر شدن سرعت پیشروی عمودی ابزار ارتفاع کمتری شکل داده شد.

سیدی و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی و عددی مکانیک تغییر شکل در فرایند فلنج‌کاری سوراخ‌های AA6۰۶۱-T6 از طریق شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای پرداختند. در این مقاله با هدف ارزیابی آسیب و مکانیزم تغییر شکل در فرایند فلنج‌کاری سوراخ از طریق شکل‌دهی تدریجی تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای بر روی ورق‌ها انجام شد، با در نظر گرفتن چندین پارامتر مؤثر بر آسیب و شکست، از جمله کرنش پلاستیک معادل، سه محوری بودن تنش و پارامتر زاویه لود. نتایج نشان داد که حالت‌های تنش و کرنش در مناطق مختلف دیواره فلنج متفاوت است، به طوری که حالت کرنش در پایین دیواره در تماس با قسمت شکل‌نداده ورق به صورت کرنش صفحه‌ای، در وسط دیواره به صورت تنش کششی دو محوری و در بالای دیواره بر روی لبه فلنج به صورت تنش کششی یک محوری است. بیشترین آسیب در لبه‌های فلنج مشاهده شد و شکست در مقادیر کم سه محوری بودن تنش در این ناحیه رخ داد که نشان‌دهنده شکست برشی در فلنج‌کاری سوراخ ورق‌ها در حین شکل‌دهی تدریجی است. در نهایت، افزایش اندکی در حد شکل‌پذیری با استفاده از استراتژی چند مرحله‌ای به جای استراتژی تک مرحله‌ای مشاهده شد، اگرچه کرنش پلاستیک معادل به طور قابل توجهی افزایش یافت.

گاندلا و همکاران [۱۹] برای ایجاد شکل گنبدی، زوایای دیواره مختلفی از جمله 45° ، 60° ، 75° و 90° را بررسی کردند. آن‌ها از نرم‌افزار MasterCam برای ایجاد مسیر ابزار مارپیچی استفاده کردند که به شکل‌گیری اشکال مختلف کمک می‌کند. آزمایش‌ها با پارامترهای فرایند ثابت با سرعت اسپیندل ثابت ۲۵۰ دور در دقیقه انجام شد. مطالعه آن‌ها بر اساس یک تحلیل نظری پیشنهادی و شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی تغییر ضخامت در طول فرایند شکل‌دهی است. نتایج نشان داد که توزیع ضخامت، نیروهای شکل‌دهی و دقت هندسی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

حاج فتحعلیان و همکاران [۲۰] ایجاد تغییراتی در پارامترهای فرایند مانند قطر ابزار، گام عمودی، نوع روانکار و راهبرد تغییر شکل توزیع ضخامت و دقت ابعادی قطعات مخروطی شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که در اثر افزایش قطر ابزار در گام عمودی ثابت، ضخامت کمینه از ۰٫۲۴ به ۰٫۵ میلی‌متر افزایش یافت که سبب کاهش نازک‌شدگی و در نهایت احتمال پارگی در ورق شد. کاهش قطر ابزار در گام عمودی ثابت باعث شکل‌دهی بهتر در گوشه‌های نوک تیز قطعات تولیدی شد و با به‌کارگیری راهبرد شکل‌دهی جدید و افزایش تعداد مراحل آن از یک مرحله به دو مرحله، ضخامت کمینه افزایش یافت. روانکار تأثیر چشم‌گیری در توزیع ضخامت و دقت ابعادی نمونه تولیدی نداشت و استفاده از روانکار در این مقاله تنها سبب کاهش زبری سطح گردید.

زاهدی و همکاران [۲۱] شکل‌دهی ورق‌های دولایه آلومینیوم-مس در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای تا رسیدن به حد شکل‌دهی ورق در چند هندسه بررسی کردند. آزمایش‌های تجربی نشان داد که نوع هندسه، به دلیل اعمال شرایط متفاوت تنش و کرنش در ورق، بر روی حد ارتفاع شکل‌دهی مؤثر است. پیش‌بینی مدل عددی از حد ارتفاع شکل‌دهی به طور میانگین برای هندسه‌های مختلف با اختلاف ۰٫۸٪ نسبت به آزمایش‌های تجربی انجام شده، همراه است که نشان‌دهنده اعتبار مدل عددی بود. به این ترتیب، با استفاده از مدل عددی اثر تغییرات کرنش پلاستیک معادل و تنش سه محوری به عنوان متغیرهای کلیدی بر توزیع

کرنش‌های صفحه‌ای و آسیب در این فرایند تحلیل شد. همچنین نحوه بارگذاری سیکلی و غیرخطی در این فرایند با ترسیم مسیر کرنش برای هندسه‌های مختلف نشان داده شد.

در بررسی پژوهش‌های پیشین، مشاهده شد که فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای برای فلنج‌زنی سوراخ و شکل‌دهی تک لبه استفاده شده و به بررسی فلنج‌زنی محیطی قطعه با لبه آزاد پرداخته نشده است. در این مقاله، فلنج‌زنی محیطی قطعه با لبه آزاد برای ورق آلیاژ آلومینیوم AA6۰۶۱ مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا استراتژی‌های مختلف برای دستیابی به یک فلنج سالم بررسی شدند و سپس تأثیر پارامترهای دیگر در استراتژی مناسب مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، معیارهای دقت ابعادی و توزیع ضخامت نیز از جمله عوامل مورد توجه در فلنج‌زنی محیطی قطعه با لبه آزاد بودند و تأثیر پارامترهای فرایندی مانند گام عمودی و قطر ابزار بر این معیارها مورد بررسی قرار گرفت.

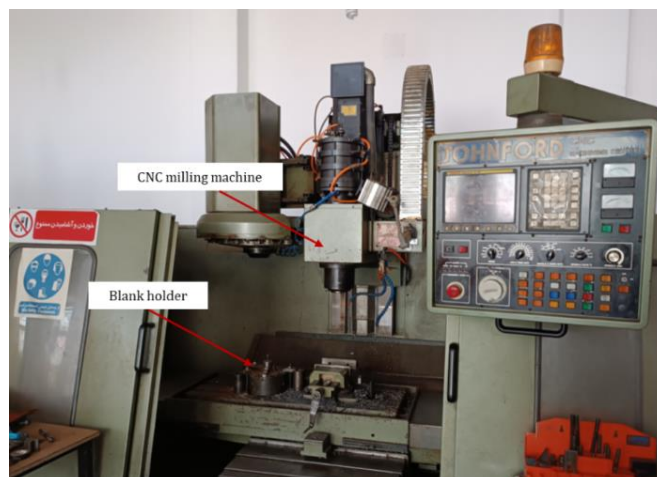
۲- آزمون تجربی

خواص مکانیکی ورق که از تست کشش استخراج شد به ترتیب در جدول ۱ آورده شده است. در این مقاله، از ورق‌های آلومینیومی AA6۰۶۱ با ضخامت ۱ میلی‌متر در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای استفاده شد.

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق AA6۰۶۱

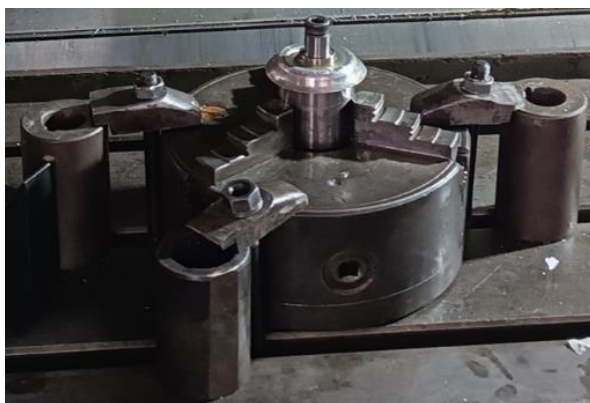
توضیحات	پارامتر
AA6۰۶۱	جنس ورق
۷۴,۲	ضریب یانگ (GPa)
۳۴۹,۲	تنش تسلیم (MPa)
۳۸۱,۱	تنش نهایی (MPa)
۰,۳۴	ضریب پواسون
۵,۴۷	تغییر شکل
۶,۹۷	ازدیاد طول (%) شکست

به منظور بررسی فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و پارامترهای موثر بر آن، فلنج دایره‌ای به‌عنوان شکل هدف در نظر گرفته شد و متغیرهای ثابت فرایند شامل سرعت پیشروی، ضخامت ورق و دما بودند. ابزار سرکروی با قطرهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ میلی‌متر در تمامی آزمایش‌ها استفاده شد و سرعت دورانی ابزار به صفر در نظر گرفته شد. پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده در این مقاله گام عمودی ابزار، قطر ابزار، ارتفاع اولیه لبه، و مسیر ابزار بودند. تجهیزات موردنیاز شامل ابزار سرکروی ساده، مجموعه تکیه‌گاهی برای نگهداری ورق، و یک فرز سی ان سی سه محوره بود که در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور کاهش اصطکاک بین ابزار و ورق و دستیابی به صافی سطح بهتر، از روانکار روغن هیدرولیک استفاده شد.



شکل ۲ دستگاه فرز CNC استفاده شده جهت فلنج‌زنی لبه آزاد

در این مقاله، ورق از مرکز توسط ورق گیر با استفاده از پیچ محکم مقید می‌شود و مجموعه ورق گیر به‌طور کلی در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای جلوگیری از پارگی ورق لبه تیز محل تماس ورق گیر با ورق به شعاع ۴ میلی‌متر گرد شد. مسیر حرکت ابزار با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل به‌صورت مارپیچ با گام‌های عمودی ۰٫۲، ۰٫۵، ۱، ۱٫۵، ۱٫۷ و ۲ میلی‌متر تهیه شده و نرخ پیشروی ابزار به ۱۰۰۰ mm/m و سرعت دوران اسپیندل به صفر در نظر گرفته شد.



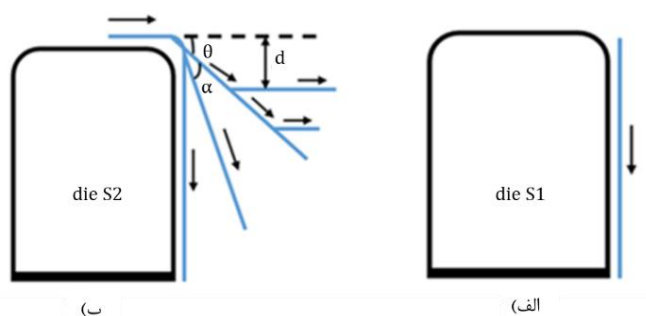
شکل ۳ مجموعه ورق گیر نصب شده بر روی دستگاه شکل‌دهی

۲-۱- استراتژی‌های تغییر شکل

با بررسی آزمون‌های اولیه که با استراتژی مسیر ابزار S1 برای لبه‌های آزاد ۵ و ۱۰ میلی‌متر انجام شد، مشخص شد که اعمال نیرو به لبه آزاد ورق با چروکیدگی یا پارگی همراه است زیرا هیچ‌گونه نیروی نگهدارنده‌ای این ناحیه را تحت کشش یا فشار قرار نمی‌دهد؛ بنابراین این موضوع بسیار حائز اهمیت است که چگونه ابزار حرکت کند تا لبه آزاد بدون عیب تغییر شکل یابد و فلنج ایجاد گردد. لذا دو استراتژی تغییر شکل ب منظور فلنج‌زنی بررسی شد.

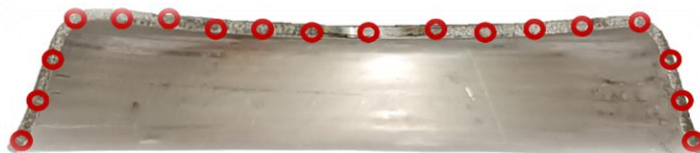
شکل ۴-الف شماتیکی از استراتژی S1 را نشان می‌دهد. در این استراتژی، از حرکت مسیر پله‌ای برای فلنج‌زنی با لبه آزاد ۵ میلی‌متر و حرکت مارپیچ برای فلنج‌زنی با لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر به کار گرفته شده است. این فرایند به‌صورت تک‌مرحله‌ای و با زاویه 90° انجام شد. در این استراتژی گام عمودی ۰٫۲ میلی‌متر برای لبه آزاد ۵ میلی‌متر و گام عمودی ۱٫۷ میلی‌متر برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در بخش نتایج دیده شد که زاویه 90° در این استراتژی برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر باعث بروز پارگی در ورق می‌شود.

شکل ۴-ب نمایانگر شماتیکی از استراتژی S2 است. این استراتژی شامل حرکت اولیه ابزار روی سطح قالب بود. خم‌کاری اولیه با زاویه θ به ارتفاع d و سپس حرکت افقی ابزار بر روی لبه باقی‌مانده ورق با زاویه مشخص، سپس خم‌کاری ثانویه با زاویه $\alpha + \theta$ به اندازه d و خم‌کاری نهایی با زاویه 90° انجام شد. در طول این مراحل، ابزار به‌صورت مارپیچ حرکت کرد. آزمایش برای فلنج‌زنی با لبه آزاد با ارتفاع ۵ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر انجام شد.



شکل ۴ شماتیک استراتژی مختلف حرکت ابزار، الف) استراتژی S1، ب) استراتژی S2

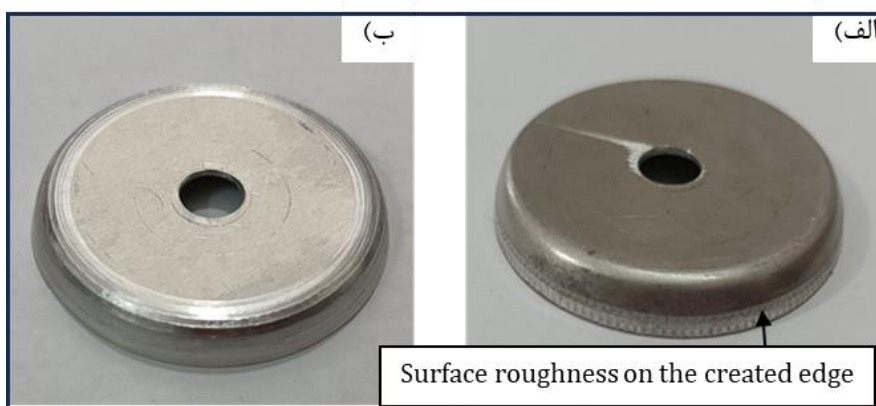
پس از انجام آزمون‌های تجربی، دو پارامتر توزیع ضخامت و دقت ابعادی تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور افزایش دقت برش، از دستگاه وایرکات استفاده و برش نمونه‌ها از ناحیه مرکزی انجام گردید. سطوح برش خورده با استفاده از سنباده‌های ریز صیقل داده شدند تا با حذف اعوجاج‌های ریز سطحی، برای بررسی با دستگاه پروفیل سنج نوری^۱ مناسب گردند. همچنین، توزیع ضخامت در امتداد مسیر برش که به بازه‌های ۵ میلی‌متر تقسیم شده بود، با دقت ۰,۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل ۵ شماتیک از نقاط اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵ شماتیک نقاط اندازه‌گیری شده به منظور بررسی توزیع ضخامت

۳- نتایج و بحث

استراتژی S1 برای فلنج زنی با لبه آزاد ۵ میلی‌متر با موفقیت انجام شد، و نمونه تولید شده، همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، از صافی سطح و دقت ابعادی بالایی برخوردار نبود. از سوی دیگر، قطعه تولید شده با استراتژی S2 از صافی سطح و دقت ابعادی بالاتری برخوردار بود. شکل ۷-الف، نمونه تولید شده با استراتژی S1 برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد که در مراحل آغازین شکل‌دهی، دچار پارگی شده است. با توجه به شکل ۷-ب، نمونه تولید شده با استراتژی S2 برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر، سالم مانده و با موفقیت انجام شد.



شکل ۶ الف) نمونه تولید شده با استراتژی S1 ب) نمونه تولید شده با استراتژی S2



شکل ۷ الف) نمونه تولید شده با استراتژی S1 ب) نمونه تولید شده با استراتژی S2

^۱ Baty R14

نتیجه نهایی آزمایش‌های انجام شده با دو استراتژی تغییر شکل ذکر شده در جدول ۲ مشخص شده است.

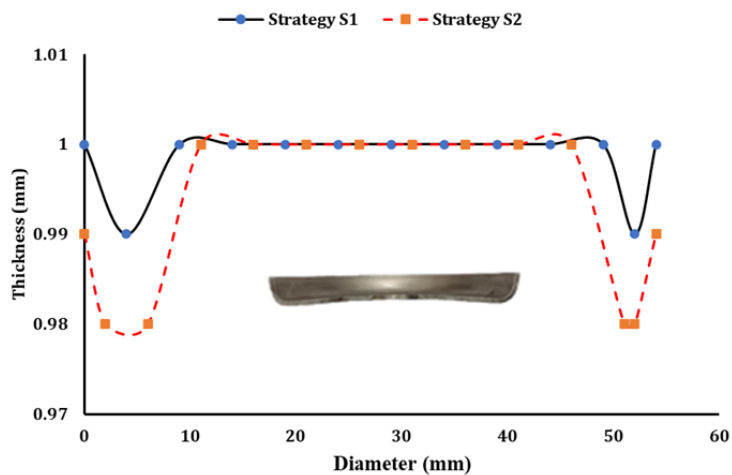
جدول ۱ نتایج آزمایش استراتژی‌ها

نتیجه	لبه آزاد ورق (mm)	قطر (mm)	استراتژی
موفق	۵	۱۰	S1
موفق	۵	۱۵	
موفق	۵	۲۰	
شکست	۱۰	۱۰	
موفق	۱۰	۱۰	S2
موفق	۱۰	۱۵	
شکست	۱۰	۲۰	
موفق	۵	۱۰	

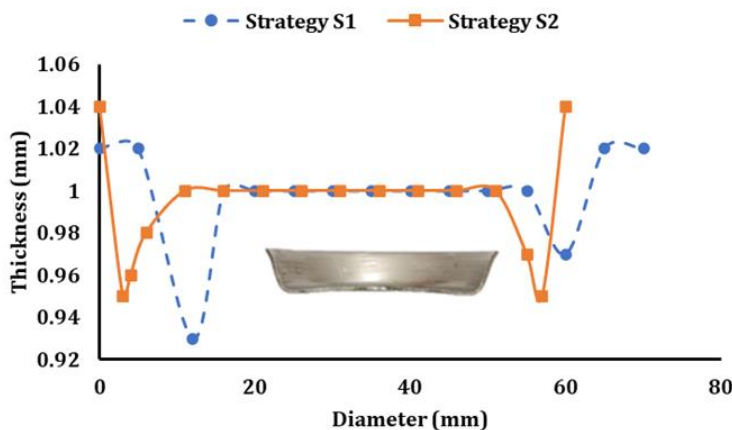
۱-۳- توزیع ضخامت

۱-۱-۳- بررسی توزیع ضخامت استراتژی‌ها

آزمایش برای دو استراتژی S1 و S2 با پارامترهای یکسان و لبه آزاد ۵ و ۱۰ میلی‌متر انجام شد و همان‌طور که در شکل ۸ و شکل ۹ مشاهده می‌شود، استراتژی S1 برای لبه آزاد ۵ میلی‌متر توزیع ضخامت را نسبت به استراتژی S2 به مقدار ۱,۰۲% بهبود بخشید. اما استراتژی S2 برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر توزیع ضخامت را نسبت به استراتژی S1 به مقدار ۲,۱۵% بهبود بخشید.



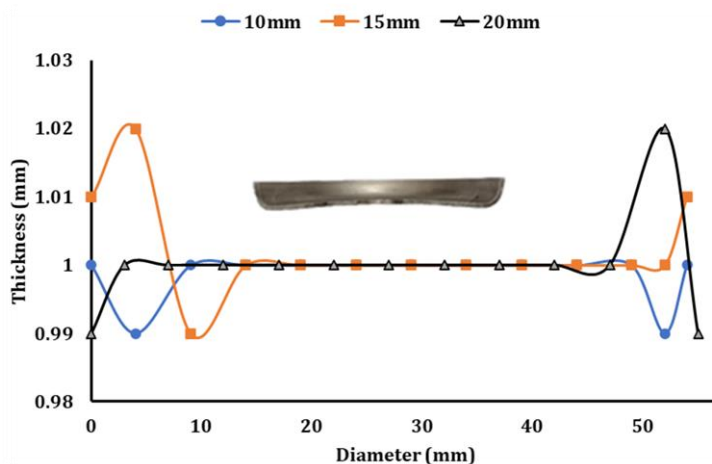
شکل ۸ مقایسه توزیع ضخامت استراتژی S1 و S2 با لبه آزاد ۵ میلی‌متر



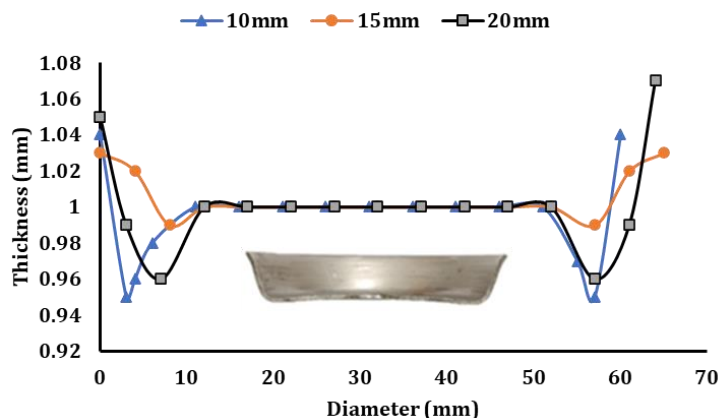
شکل ۹ مقایسه توزیع ضخامت استراتژی S1 و S2 با لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر

۳-۱-۲- اثر قطر ابزار بر توزیع ضخامت

به منظور بررسی تأثیر پارامتر قطر ابزار بر توزیع ضخامت، آزمایش‌های تجربی برای سه قطر مختلف ابزار ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از هر دو استراتژی تولید شد. برای استراتژی S1 با گام عمودی ۰,۲ میلی‌متر و لبه آزاد ۵ میلی‌متر با استفاده از روانکار و برای استراتژی S2 با گام عمودی ۱,۷ میلی‌متر و لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر با استفاده از روانکار تولید شد. نتایج در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شده است. کمترین نازک‌شدگی برای ابزار با قطر ۱۵ میلی‌متر بود و نسبت به قطر ۱۰ میلی‌متر که بیشترین نازک‌شدگی داشت، مقدار ۴,۲۱% توزیع ضخامت را بهبود بخشید. این بهبود نازک‌شدگی ناشی از بازگشت فنری بیشتر است که باعث می‌شود قطعه تحت تنش کمتر و در نتیجه کشش کمتر قرار بگیرد.



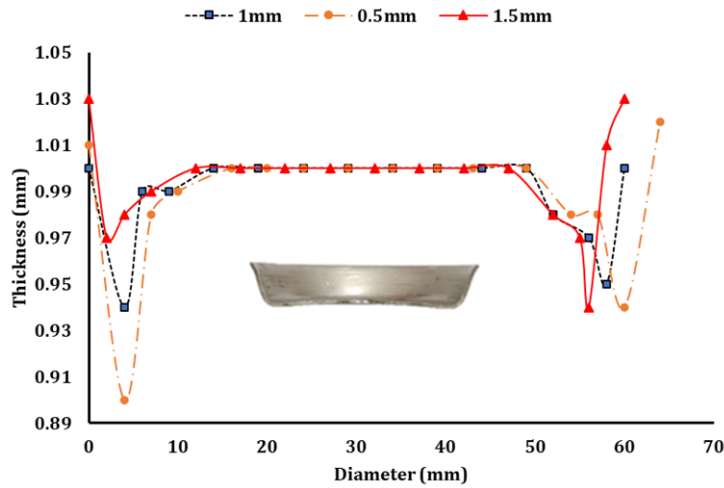
شکل ۱۰ نمودار اثر قطر بر توزیع ضخامت با لبه آزاد ۵ میلی‌متر با استراتژی S1



شکل ۱۱ نمودار اثر قطر بر توزیع ضخامت با لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر با استراتژی S2

۳-۱-۳- اثر گام عمودی بر توزیع ضخامت

گام عمودی یکی از پارامترهای فرآیندی در این روش شکل‌دهی محسوب می‌شود. نمونه‌های تولید شده با سه گام مختلف ۰,۵، ۱ و ۱,۵ میلی‌متر برای بررسی تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفت و فلنج‌ها با استفاده از استراتژی S2 تولید شد. در این سه نمونه قطر ابزار ۱۰ میلی‌متر و لبه آزاد ورق ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته و با استفاده از روانکار تولید شد. نتایج در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گام عمودی در ناحیه خم نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش گام عمودی، نیروهای شکل‌دهی در ناحیه خم فلنج افزایش می‌یابد، تنش وارده شده افزایش یافته و کاهش ضخامت بیشتری در آخرین گام مشاهده می‌شود.

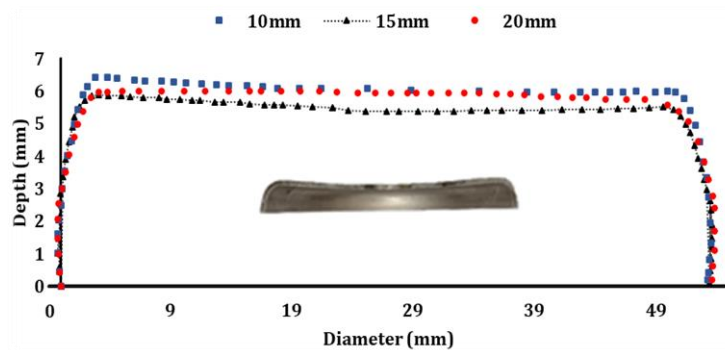


شکل ۱۲ نمودار اثر گام عمودی بر توزیع ضخامت

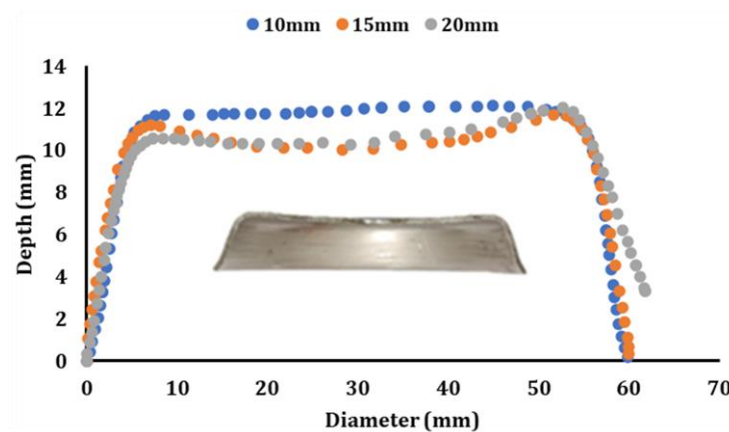
۲-۳-۲- دقت ابعادی

۳-۲-۱- اثر قطر بر دقت ابعادی

به منظور بررسی تاثیر قطر ابزار بر دقت ابعادی، آزمایش‌های تجربی برای سه قطر مختلف ابزار ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر انجام گرفت. نمونه‌ها با استفاده از هر دو استراتژی تولید شد. برای استراتژی S1 با گام عمودی ۰٫۲ میلی‌متر و لبه آزاد ۵ میلی‌متر با استفاده از روانکار و برای استراتژی S2 با گام عمودی ۱٫۷ میلی‌متر و لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر با استفاده از روانکار تولید شد. نتایج در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده شد هرچه با کاهش قطر ابزار دقت ابعادی و ارتفاع فلنج افزایش می‌یابد.



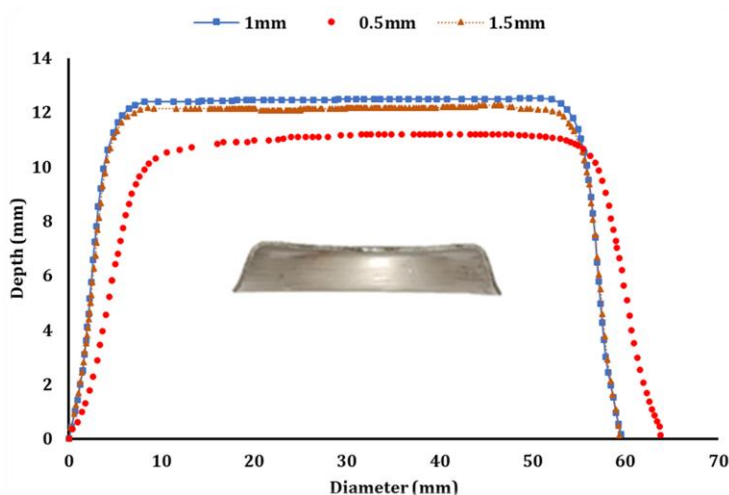
شکل ۱۳ نمودار اثر قطر ابزار بر دقت ابعادی برای استراتژی S1



شکل ۱۴ نمودار اثر قطر ابزار بر دقت ابعادی برای استراتژی S2

۳-۲-۲- اثر گام عمودی بر دقت ابعادی

برای بررسی تاثیر گام عمودی بر دقت ابعادی، نمونه‌های تولید شده با سه گام مختلف ۰,۵، ۱ و ۱,۵ میلی‌متر برای بررسی تاثیر آن مورد بررسی قرار گرفت و فلنج‌ها با استفاده از استراتژی S۲ تولید شد. در این سه نمونه قطر ابزار ۱۰ میلی‌متر و لبه آزاد ورق ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته و با استفاده از روانکار تولید شد. نتایج در شکل ۱۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش گام عمودی برگشت فنی کاهش و دقت ابعادی و ارتفاع گردن فلنج افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ نمودار اثر گام عمودی بر دقت ابعادی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر دو استراتژی مختلف تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای به منظور فلنج‌زنی لبه آزاد ورق آلومینیوم AA6۰۶۱، به صورت تجربی بررسی شد. همچنین، امکان پذیری انجام فرایند با استفاده از استراتژی‌های متفاوت تغییر شکل و تأثیر روانکار بر توزیع ضخامت و دقت ابعادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- دو استراتژی مختلف تغییر شکل به منظور امکان‌سنجی فرایند فلنج‌زنی لبه مورد بررسی قرار گرفت. استراتژی تک مرحله‌ای S۱ برای لبه آزاد ۵ میلی‌متر موفقیت‌آمیز بود که در این استراتژی تک مرحله‌ای، قطعه تحت تنش شدید قرار می‌گیرد. همچنین، برای لبه‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر، مانند ۱۰ میلی‌متر، استراتژی تک مرحله‌ای S۱ موفقیت‌آمیز نبود. این پارگی ناشی از حجم زیادی است که در یک مرحله از فرایند شکل‌دهی اعمال می‌شود و باعث افزایش نازکی در نقاط لبه آزاد ورق می‌شود.
- استراتژی تغییر شکل چند مرحله‌ای S۲ برای لبه آزاد ۱۰ میلی‌متر با موفقیت انجام شد. در این استراتژی لبه ورق به این ترتیب شکل می‌گیرد: خم‌کاری اولیه با زاویه θ به ارتفاع d و سپس حرکت افقی ابزار بر روی لبه باقی‌مانده ورق با زاویه مشخص، سپس خم‌کاری ثانویه با زاویه $\alpha + \theta$ به اندازه d و خم‌کاری نهایی با زاویه 90° انجام شد.
- استفاده از روانکار بر اساس نتایج به دست آمده منجر به بهبود صافی سطح قطعه فلنج‌زنی شده می‌شود. کمترین نازک‌شدگی برای ابزار با قطر ۱۵ میلی‌متر بود و نسبت به قطر ۱۰ میلی‌متر که بیشترین نازک‌شدگی داشت، مقدار $4,21\%$ توزیع ضخامت را بهبود بخشید. با افزایش گام عمودی، دقت ابعادی افزایش و با افزایش قطر دقت ابعادی کاهش یافت و همچنین، با افزایش گام عمودی، ضخامت قطعه کاهش یافته است.

فهرست علائم

d ارتفاع شکل‌دهی

علائم یونانی

θ زاویه شکل‌دهی اولیه

α زاویه شکل‌دهی ثانویه

References

- [1] Shanmuganatan SP, Kumar VS. Metallurgical analysis and finite element modelling for thinning characteristics of profile forming on circular cup. *Materials & Design*. 2013 Feb 1;44:208-15. doi: [10.1016/j.matdes.2012.07.042](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.042)
- [2] Pierre R, inventor; L Morane SA Ets, assignee. Machines for shaping sheet metal. United States patent US 2,945,528. 1960 Jul 19.
- [3] Leszak E. Apparatus and process for incremental dieless forming. Google Patents. 1967.
- [4] Matsubara S. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool. *J. Jpn. Soc. Tech. Plasticity*. 1994;35(406):1311.
- [5] Strano M. Technological representation of forming limits for negative incremental forming of thin aluminum sheets. *Journal of manufacturing processes*. 2005 Jan 1;7(2):122-9. doi: [10.1016/S1526-6125\(05\)70089-X](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(05)70089-X)
- [6] Mirnia MJ, Mollaei Dariani B, Vanhove H, Dufloy JR. Thickness improvement in single point incremental forming deduced by sequential limit analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Feb;70:2029-41. doi: [10.1007/s00170-013-5447-2](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5447-2)
- [7] Mirnia MJ, Mollaei Dariani B, Vanhove H, Dufloy JR. An investigation into thickness distribution in single point incremental forming using sequential limit analysis. *International Journal of Material Forming*. 2014 Dec;7:469-77. doi: [10.1007/s12289-013-1143-x](https://doi.org/10.1007/s12289-013-1143-x)
- [8] Voswinckel H, Bambach M, Hirt G. Improving geometrical accuracy for flanging by incremental sheet metal forming. *International Journal of Material Forming*. 2015 Jul;8:391-9. doi: [10.1007/s12289-014-1182-y](https://doi.org/10.1007/s12289-014-1182-y)
- [9] Wen T, Zhang S, Zheng J, Huang Q, Liu Q. Bi-directional dieless incremental flanging of sheet metals using a bar tool with tapered shoulders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016 Mar 1;229:795-803. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.005)
- [10] Cristino VA, Montanari L, Silva MB, Martins PA. Towards square hole-flanging produced by single point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2015 Oct;229(5):380-8. doi: [10.1177/1464420714524930](https://doi.org/10.1177/1464420714524930)
- [11] Hussain G, Valaei H, Al-Ghamdi KA, Khan B. Finite element and experimental analyses of cylindrical hole flanging in incremental forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016 Sep 1;26(9):2419-25. doi: [10.1016/S1003-6326\(16\)64362-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64362-5)
- [12] Gonzalez MM, Lutes NA, Fischer JD, Woodside MR, Bristow DA, Landers RG. Analysis of geometric accuracy and thickness reduction in multistage incremental sheet forming using digital image correlation. *Procedia Manufacturing*. 2019 Jan 1;34:950-60. doi: [10.1016/j.promfg.2019.06.105](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.105)
- [13] Besong LI, Buhl J, Bambach M. Investigations on hole-flanging by paddle forming and a comparison with single point incremental forming. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019 Dec 1;164:105143. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105143](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105143)
- [14] Li X, Han K, Xu P, Wang H, Li D, Li Y, Li Q. Experimental and theoretical analysis of the thickness distribution in multistage two point incremental sheet forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Mar;107:191-203. doi: [10.1007/s00170-020-05037-y](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05037-y)
- [15] Soleimanifar M, Elyasi M. 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*. 2021 Jan 20;7(11):9-20. [In Persian]
- [16] Chen X, Wen T, Qin J, Hu J, Zhang M, Zhang ZS. Deformation feature of sheet metals during inclined hole-flanging by two-point incremental forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2020 Feb;21:169-76. doi: [10.1007/s12541-019-00296-6](https://doi.org/10.1007/s12541-019-00296-6)
- [17] Hashemi SJ. Incremental forming of cylindrical aluminum flanges using a new eccentric tool. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Oct 22;7(8):28-35. [In Persian]
- [18] Seyyedi SE, Bakhshi-Jooybari M, Gorji H, Mirnia MJ. An Experimental and Numerical Investigation of Deformation Mechanics on Hole-Flanging Process of AA6061-T6 Sheets through Single-Point Incremental Forming. *Journal of Stress Analysis*. 2021 Sep 1;6(1):29-46. doi: [10.22084/jrstan.2021.24756.1188](https://doi.org/10.22084/jrstan.2021.24756.1188)
- [19] Gandla PK, Pandre S, Suresh K, Kotkunde N. A critical analysis of formability and quality parameters for forming a dome shape using multi-stage strategies in incremental forming process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022 Jul 1;19:1037-48. doi: [10.1016/j.jmrt.2022.05.064](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.064)
- [20] Hajfathalian A, Mirnia MJ, Elyasi M. Experimental study of two-point incremental forming of St12 sheet using negative dies. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Feb 20;9(12):32-42. doi: [10.22034/IJME.2023.402149.1794](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.402149.1794) [In Persian]
- [21] Zahedi Dizajyekan A, Mirnia MJ, Mollaei Dariani B. Numerical and experimental analysis of damage in the single point incremental forming of Aluminum/Copper bilayer sheet. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Mar 21;10(1):20-9. doi: [10.22034/IJME.2023.417116.1831](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.417116.1831) [In Persian]