



شکل‌دهی تدریجی فلنج‌های آلومینیومی استوانه‌ای با استفاده از یک ابزار جدید خارج از مرکز

سیدجلال هاشمی

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران
* تهران، صندوق پستی 13715-173، j_hashemi@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 دی 1398

داوری اولیه 13 بهمن 1398

پذیرش: 20 فروردین 1399

کلیدواژگان:

شکل‌دهی تدریجی

سنجه شکل‌دهی خارج از مرکز

سرعت دورانی

فلنج

چکیده

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای یکی از فرایندهای نوین در شکل‌دهی ورق‌های فلزی محسوب می‌شود که توانسته با ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی در ورق، میزان بالایی از شکل‌دهی را در آن‌ها به وجود آورد. در این مقاله، ابزار جدیدی برای تولید فلنج‌های استوانه‌ای بر پایه اصول فرایند شکل‌دهی تدریجی معرفی می‌شود. با استفاده از این ابزار برای شکل‌دهی فلنج، به‌جای استفاده از فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری از ماشین فرز دستی استفاده می‌شود. شکل‌دهی دیواره فلنج با یک ابزار جدید که شامل دو سنبه شکل‌دهی است انجام می‌گیرد. دنباله ابزار بر روی اسپیندل دستگاه فرز بسته شده و مقدار خارج از مرکز بودن سنبه‌ها قطر نهایی فلنج را تعیین می‌کند. حرکت ابزار در حال دوران، ساده و با گام مشخص رو به پایین می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از این روش می‌توان فلنج‌ها 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 می‌یابد. افزایش سرعت دورانی ابزار منجر به شکل‌دهی فلنج‌هایی با ارتفاع بیشتر شده اما با بیشتر شدن سرعت پیشروی عمودی ابزار ارتفاع کمتری شکل داده می‌شود.

Incremental forming of cylindrical aluminum flanges using a new eccentric tool

Seyed Jalal Hashemi

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

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

Article Information

Original Research Paper
Received: 17 January 2020
First Decision: 1 February 2020
Accepted: 8 April 2020

Keywords:

Incremental forming
Eccentric forming punch
Rotational speed
Flange

Abstract

Single point incremental forming is one of the novel processes in forming of metallic sheets that has created high forming levels in sheet by local plastic deformation. In this paper, new tool based on incremental forming principles is introduced for production of cylindrical flange. Using this tool for forming of the flange, the manual milling machine is used instead of milling machine equipped with computer numerical control (CNC). Forming of flange wall is accomplished by a new tool that includes two forming punches. Tool shank is fixed on milling machine spindle and the value of eccentricity determines the final diameter of flange. Movement of rotary tool is simple and downward with defined step. The results show that flanges with specified diameters can be formed by using this method very fast. Increasing the diameter of the primary hole created on the sheet increases the flange height but also increases the thinning. Increasing rotational speed results in forming flanges with higher height but increasing vertical feed rate of tool decreases the flange height.

1- مقدمه

با جابجایی‌های نسبی یک ابزار به کمک دستگاه کنترل عددی کامپیوتری به دست می‌آید. در فرایند شکل‌دهی تدریجی، هزینه ساخت قالب و تجهیزات کاهش زیادی دارد و به همین دلیل از این فرایند می‌توان در تولید دسته‌ای و نمونه‌سازی سریع استفاده کرد [2]. در زمینه شکل‌دهی تدریجی تحقیقات متعددی منتشر شده‌اند. بیشتر این تحقیقات بر شکل‌دهی هرم ناقص متمرکز شده‌اند. میرنیا و ملایی داریانی [3] برای جلوگیری از نازک‌شدگی زیاد ورق، یک مخروط ناقص را با استفاده از شکل‌دهی تدریجی در چند مرحله شکل دادند.

یکی از فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی که در آن در هر لحظه فقط بخش کوچکی از محصول شکل‌دهی می‌شود، شکل‌دهی تدریجی ورق فلزی می‌باشد. ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی توسط ادوارد و بر روی ماشین تراش مطرح شد [1]. شکل‌دهی تدریجی یک روش انعطاف‌پذیر برای ساخت محصولات از ورق‌های فلزی است که به سنبه یا قالب مخصوص برای شکل‌دهی احتیاج ندارد. در این روش ورق اولیه به وسیله یک قالب نگهدارنده ساده، محکم نگه داشته شده و شکل نهایی قطعه،

Please cite this article using:

S. J. Hashemi, Incremental forming of cylindrical aluminum flanges using a new eccentric tool, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 28- 35, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شکل‌دهی تدریجی فلنج استفاده کردند و نشان دادند که پارگی در اثر کشش دوماحوری در دیواره فلنج ایجاد می‌شود. کاو و همکارانش [18] از یک ابزار جدید برای شکل‌دهی تدریجی فلنج استفاده کردند که در آن نوک ابزار برای فرزکاری سوراخ اولیه در نظر گرفته شده و در دنباله آن مقطعی با انحنای هایپربولیک برای شکل‌دهی در نظر گرفته شده بود.

در فرایند شکل‌دهی تدریجی فلنج سنبه معمولاً بر روی گلوبی اسپیندل ماشین فرز کنترل عددی نصب شده و با انجام حرکت مارپیچ تغییر شکل پلاستیک موضعی در ورق ایجاد می‌کند. انجام این حرکت مارپیچ علاوه بر پیچیده بودن باعث افزایش زمان فرایند شکل‌دهی می‌شود. در این مقاله به منظور حذف حرکت پیچیده سنبه شکل‌دهی و کاهش زمان فرایند از یک ابزار جدید استفاده شده است. با استفاده از این ابزار جدید که نیاز به حرکت پیچیده را از بین می‌برد، بر روی ورق‌های آلومینیومی از پیش سوراخ شده فلنج‌هایی شکل داده شده و اثر پارامترهای فرایندی شامل سرعت دورانی، قطر سوراخ اولیه، پیشروی عمودی بررسی شده است.

2- روش تجربی

برای شروع فرایند شکل‌دهی تدریجی فلنج یک سوراخ با قطر اولیه مشخص بر روی ورق‌های آلومینیومی ایجاد شده و سپس ورق‌ها بر روی فیکسچر محکم شده‌اند. شکل 1 فیکسچر بستن ورق را نمایش می‌دهد. این فیکسچر شامل صفحه پشتیبان که از زیر ورق را نگهداشته و یک ورق‌گیر که از بالا روی ورق قرار می‌گیرد می‌شود. برای بسته شدن دو قسمت فیکسچر از شش پیچ استفاده شده تا در زمان سوراخ‌کاری و شکل‌دهی هیچ جابجایی در ورق ایجاد نشود و هم‌مرکز بودن ابزارها با سوراخ ورق حفظ گردد. پس از بسته شدن ورق بر روی فیکسچر مطابق با شکل 2 سوراخ‌کاری ورق انجام می‌شود. خود فیکسچر بر روی گیره ماشین فرز نصب می‌شود.



Fig. 1 Fixture of sheet

شکل 1 فیکسچر ورق

طاهرخانی و همکارانش [4] از سرعت‌های دورانی بالای ابزار برای افزایش دمای ورق در ناحیه تماس با ابزار و کاهش نیروی شکل‌دهی استفاده کردند. روحی و همکارانش [5] با به‌کارگیری معیارهای عددی در شبیه‌سازی اجزای محدود، منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های تیتانیومی در دمای بالا در فرایند شکل‌دهی تدریجی را به دست آوردند. افتخاری و فضلی [6] از یک پیش‌فرم مخروطی برای کاهش نازک‌شدگی دیواره مخروط در شکل‌دهی تدریجی استفاده کردند. پناهی لیاولی و همکارانش [7] شکل‌دهی تدریجی ورق‌های ترکیبی جوش‌کاری شده با استفاده از لیزر را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند زاویه خط جوش نسبت به راستای نورد ورق‌ها بر میزان شکل‌پذیری آن‌ها تأثیر دارد.

شکل‌دهی فلنج بر روی ورق‌های فلزی معمولاً با استفاده از سنبه و ماتریس بر روی ورق‌های از پیش سوراخ شده انجام می‌گیرد [8, 9]. شکل‌دهی تدریجی فلنج، فرایندی است که در آن بخش بیرونی یک ورق خام (با مواد مورد نظر) با یک سوراخ از پیش برش داده شده متقارن یا هم‌مرکز به وسیله یک فیکسچر ورق (روبند) محکم شده تا بتوان با استفاده از ابزار شکل‌دهی و پارامترهای تعیین شده به تولید یک فلنج استوانه‌ای یا مخروطی دست یافت. البته در زمینه شکل‌دهی تدریجی فلنج‌های با مقطع غیر گرد نیز تلاش‌هایی صورت گرفته است [10]. در این فرایند همانند تمام فرایندهای شکل‌دهی تدریجی حرکت ابزار توسط یک دستگاه کنترل عددی کامپیوتری کنترل می‌شود. این فرایند قابل انجام بر روی سوراخ‌های از قبل ایجاد شده روی ورق‌های تخت یا لوله‌های فلزی می‌باشد.

براساس تحقیق کوی و همکارانش [11] با افزایش قطر سنبه شکل‌دهی و گام محوری می‌توان از قطر سوراخ اولیه کمتر استفاده کرد. کوی و گاوو [12] برای شکل‌دهی یک فلنج گرد از شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با انتخاب مقادیر افزایش ارتفاع فلنج کوچک بین مراحل می‌توان به توزیع ضخامت بهتری دست یافت. سنتنو و همکارانش [13] برای ساخت فلنج عمودی بر روی ورق مراحل شکل‌دهی را تحت زوایای مشخص انجام دادند و اثر قطر اولیه سوراخ را بر شکل‌پذیری و شکست فلنج در لبه بررسی کردند. مقالاتی در زمینه مقایسه حد شکل‌دهی فلنج در شکل‌دهی تدریجی و فرایند سنتی شکل‌دهی آن منتشر شده است که نشان می‌دهد منحنی حد شکست در شکل‌دهی تدریجی بالاتر از منحنی حد شکل‌دهی سنتی قرار می‌گیرد [14, 15]. بورگو و همکارانش [16, 17] از مسیر مارپیچ استوانه‌ای برای ابزار

منظور کاهش اصطکاک و عدم چسبندگی بین سنبه‌ها و ورق آلومینیومی، روغن هیدرولیک به ناحیه تماس رسانده شده است. با استفاده از ابزار جدید که خارج از مرکز روی اسپیندل دستگاه نصب می‌شود نیاز به حرکت مارپیچ برای شکل‌دهی فلنج از بین رفته و زمان شکل‌دهی کاهش می‌یابد. مسیر حرکت ابزار جدید با مسیر مارپیچ که در پژوهش‌های پیشین استفاده می‌شده در شکل 6 مورد مقایسه قرار گرفته است. در صورت ثابت فرض کردن سرعت حرکت خطی ابزار در طول مسیر برای هر دو حالت ابزار جدید که خطی بوده و مسیر مارپیچ برای حالت معمول مشخص می‌شود که طول مسیر حرکت ابزار جدید خیلی کوتاهتر بوده و در نتیجه زمان شکل‌دهی کاهش می‌یابد.



Fig. 2 Method of locating the fixture on milling machine table and drilling of sheet

شکل 2 روش قرار گرفتن فیسکچر روی میز ماشین فرز و سوراخ‌کاری ورق



Fig. 3 Manual milling machine

شکل 3 ماشین فرز دستی



Fig. 4 Forming tool

شکل 4 ابزار شکل‌دهی

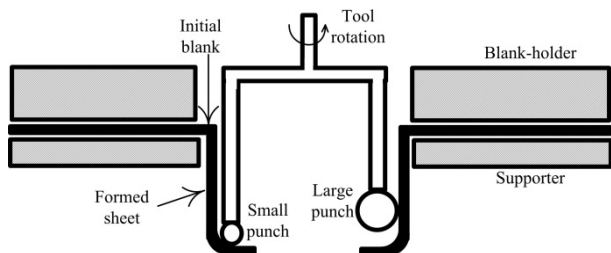


Fig. 5 Schematic of forming process of flange using new tool

شکل 5 شماتیک فرایند شکل‌دهی فلنج با ابزار جدید

ورق‌های مورد استفاده در این مقاله، از آلیاژ AA1050 آلومینیوم با ضخامت اولیه 1mm بوده است. ماشین فرز استفاده شده فرز دستی FP4 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز می‌باشد. این دستگاه مجهز به خط‌کش دیجیتال بوده که حرکت محورها را با دقت 0/001mm نشان می‌دهد. دستگاه مجهز به گیربکس برای تغییر سرعت دوران و یک گیربکس جهت تغییر سرعت پیشروی می‌باشد. نمای کلی دستگاه در شکل 3 نشان داده شده است.

در فرایند شکل‌دهی یک ابزار جدید بدون نیاز به حرکت مارپیچ مطابق با شکل 4 به کار گرفته شد. ابزار دارای دو سنبه خارج از مرکز بوده که میزان خروج از مرکز آنها برابر شعاع فلنج نهایی مورد نظر می‌باشد. با بسته شدن این ابزار بر روی اسپیندل ماشین فرز و هم‌مرکز با سوراخ اولیه ورق فرایند آغاز می‌شود. ابزار با سرعت ثابت دوران کرده و میز ماشین با سرعت پیشروی مشخص به سمت بالا حرکت می‌کند تا به تدریج فلنج شکل داده شود. نحوه شکل‌دهی با ابزار جدید به صورت شماتیک در شکل 5 نشان داده شده است. به دلیل این‌که قطر ابزار بر روی میزان شکل‌پذیری ورق و همچنین کیفیت سطح نهایی قطعه مؤثر است، قطر دو سر ابزار شکل‌دهی متفاوت در نظر گرفته شده است. ابتدا سنبه با قطر کمتر با ورق تماس پیدا کرده و عملیات شکل‌دهی را آغاز می‌کند. قطر کمتر سنبه باعث شکل‌دهی ارتفاع فلنج بالاتر می‌گردد [16]. سپس سنبه با شعاع بیشتر با دیواره شکل گرفته شده تماس پیدا کرده و عملیات را نهایی می‌کند. قطر بزرگتر کیفیت سطح بهتری را روی فلنج ایجاد می‌کند. شعاع بزرگتر سنبه باعث ایجاد کرنش موضعی بزرگتر و برگشت فنی کمتر خواهد شد. فاصله مرکز دو سنبه در جهت عمودی 22mm بوده است. در زمان انجام فرایند به

صورت بالاتر رفتن این کرنش کششی از حد شکل‌دهی ورق ترک در لبه ایجاد شده و در راستای طول فلنج رشد می‌کند. حالت کرنش در لبه فلنج به کشش تک‌محوری نزدیک می‌شود. برای قطعه نشان داده در شکل 9، قطر سوراخ اولیه برابر با 63mm بوده است. با توجه به اینکه شکل‌دهی فلنج با حداکثر ارتفاع و حداقل نازک‌شدگی مطلوب می‌باشد در ادامه اثر پارامترهای فرایندی بر حداقل ضخامت دیواره و ارتفاع فلنج بررسی شده است. به منظور انتخاب پارامترهای فرایندی جهت دستیابی به فلنج سالم و بدون پارگی آزمایش‌های اولیه بر روی تعدادی از قطعات انجام شد.

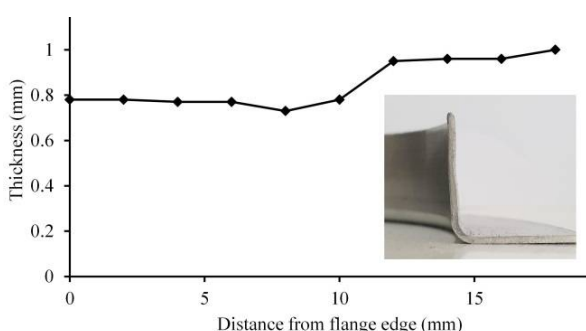


Fig. 7 Thickness distribution of cross-section of part with initial hole diameter of 65mm

شکل 7 توزیع ضخامت مقطع قطعه با قطر سوراخ اولیه 65mm



Fig. 8 Tearing of flange wall because of small initial hole diameter

شکل 8 پارگی دیواره فلنج به علت انتخاب قطر سوراخ اولیه پایین (60mm)



Fig. 9 Longitudinal crack in flange edge

شکل 9 ترک طولی در لبه فلنج

با توجه به آزمایش‌های اولیه مشخص شد که قطر سوراخ

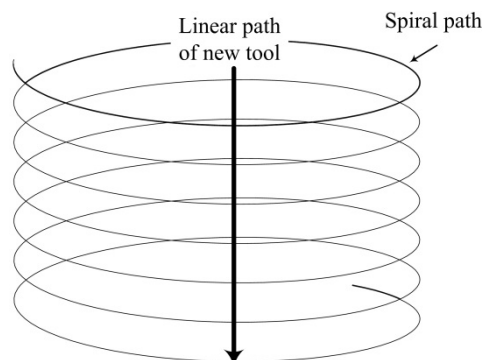


Fig. 6 Comparison of linear path of new tool and spiral path

شکل 6 مقایسه مسیر خطی حرکت ابزار جدید و مسیر مارپیچ

از طرف دیگر در مورد مسیر مارپیچ، طول مسیر به قطر فلنج نهایی بستگی خواهد داشت و با افزایش قطر، زمان فرایند بیشتر می‌شود اما در مورد ابزار جدید، افزایش قطر فلنج با تغییر مقدار خارج از مرکز بسته شدن سنبه‌های شکل‌دهی انجام شده و زمان شکل‌دهی به قطر نهایی فلنج بستگی ندارد.

3- نتایج و بحث

قطر داخلی نهایی فلنج شکل داده شده در این مقاله برای همه حالت‌ها 96mm بوده است. بعد از شکل‌دهی فلنج با ابزار شامل دو سنبه با قطر مختلف ضخامت در نقاط مختلف با برش فلنج اندازه‌گیری شد. توزیع ضخامت فلنج شکل داده شده با قطر سوراخ اولیه 65mm به همراه قطعه برش خورده در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به شکل، بیشترین نازک‌شدگی در وسط دیواره فلنج رخ داده است که تحت کرنش کششی دومحوری می‌باشد. این موضوع برای همه قطعات دیگر نیز صادق است. در صورت انتخاب نامناسب پارامترهای فرایندی قبل از شکل‌دهی کامل فلنج پارگی در دیواره رخ می‌دهد. شکل 8 پارگی دیواره فلنج برای قطر سوراخ اولیه 60mm تحت سرعت دورانی 50 دور بر دقیقه و پیشروی 20mm/min را نمایش می‌دهد. در این حالت به علت کرنش کششی دومحوری ایجاد شده در دیواره توسط ابزار، نازک‌شدگی به سرعت افزایش یافته و قطعه قبل از اتمام فرایند دچار پارگی شده است. علاوه بر این به علت ایجاد کرنش کششی زیاد در راستای محیطی لبه فلنج، ممکن ترک‌هایی در راستای دیواره ایجاد شود. نمونه‌ای از ترک لبه فلنج در اثر کرنش محیطی زیاد در شکل 9 نشان داده شده است. این موضوع در اثر انتخاب قطر سوراخ اولیه کم رخ داده است. در واقع اگر قطر سوراخ اولیه کمتر انتخاب شود و بر اثر افزایش قطر سوراخ در زمان شکل‌دهی، کرنش کششی بزرگتری در راستای محیط فلنج و به ویژه در لبه آن ایجاد می‌شود که در

می‌یابد. با فرض ثابت بودن حجم ماده و ضخامت در زمان شکل‌دهی، ارتفاع فلنج قابل محاسبه است. اما نتایج نشان می‌دهد ارتفاع فلنج بیشتری نسبت به محاسبه نظری ایجاد شده است. این اختلاف در مورد قطرهای سوراخ اولیه کوچکتر، بیشتر شده است که نشان‌دهنده نازک شدن دیواره ورق و ایجاد کرنش‌های کششی در راستای عمودی می‌باشد. با توجه به اینکه پارامترهای دیگری به جز قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع فلنج اثرگذار هستند، مقایسه دقیقی بین نتیجه نظری و تجربی انجام نشده است. شکل 12 تأثیر قطر اولیه سوراخ را بر حداقل ضخامت دیواره فلنج شکل داده شده را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 12، با کاهش قطر سوراخ در هر دو سرعت دورانی نازک‌شدگی افزایش یافته است. هر چقدر قطر سوراخ اولیه کمتر شود، طول تماس ابزار با ورق در زمان شکل‌دهی بیشتر شده و کشش بیشتری در دیواره رخ می‌دهد.

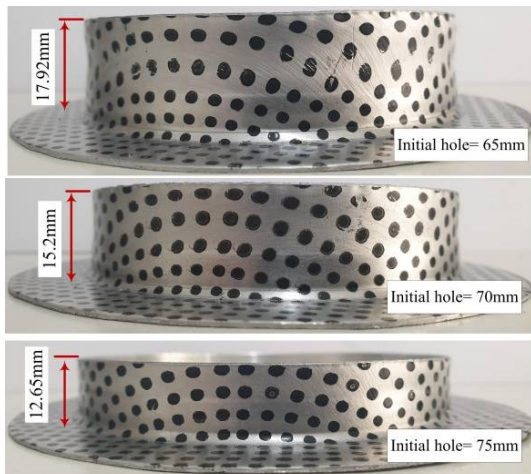


Fig. 10 Formed part with different hole diameter

شکل 10 قطعات شکل داده شده با قطر سوراخ اولیه متفاوت

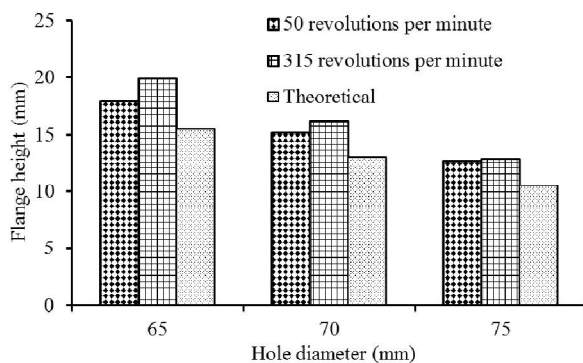


Fig. 11 Effect of hole diameter on flange height

شکل 11 تأثیر قطر سوراخ اولیه و سرعت دوران بر ارتفاع فلنج

3-2- تأثیر سرعت پیشروی بر شکل‌دهی فلنج

با توجه به نتایج تجربی مشخص شد که افزایش سرعت پیشروی

اولیه مهم‌ترین پارامتر در دستیابی به ارتفاع فلنج مناسب می‌باشد. با توجه به این‌که کرنش کششی تک‌محوری باعث ایجاد ترک در لبه فلنج می‌شود از کرنش شکست به دست آمده از آزمایش کشش تک‌محوری می‌توان برای انتخاب حداکثر قطر سوراخ اولیه استفاده کرد. در مورد آلیاژ آلومینیومی مورد استفاده در این مقاله کرنش شکست آزمایش کشش برابر 0/19 بوده و با در نظر گرفتن قطر نهایی 96mm برای فلنج حداکثر قطر 75mm برای سوراخ اولیه استفاده شد. البته با توجه به ماهیت فرایند شکل‌دهی افزایشی امکان ایجاد نازک‌شدگی بیشتر در لبه فلنج وجود دارد و به همین دلیل قطرهای کوچکتر نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین بررسی اولیه نشان داد که استفاده از سرعت‌های دورانی خیلی بالا منجر به اعوجاج و پارگی ورق می‌شود. در واقع نیروی اصطکاک ابزار با سطح داخلی ورق باعث کشیدگی زیاد دیواره فلنج شده و سبب پارگی آن می‌شود. در این تحقیق حداکثر از سرعت دورانی 315 دور بر دقیقه استفاده شد. با افزایش ضخامت و استحکام ورق می‌توان از سرعت‌های دورانی بالاتر استفاده کرد. پارامتر مهم دیگر سرعت پیشروی ابزار شکل‌دهی می‌باشد. با افزایش این سرعت زمان شکل‌دهی کاهش می‌یابد اما دقت قطعه نهایی کمتر خواهد شد.

3-1- تأثیر قطر سوراخ اولیه شکل‌دهی فلنج

با کاهش قطر سوراخ اولیه ایجاد شده در ورق و با توجه به ثابت بودن قطر نهایی فلنج، کرنش کششی بیشتری در لبه فلنج ایجاد خواهد شد و احتمال ترک خوردن لبه بالاتر می‌رود در نتیجه با توجه به محدود بودن شکل‌پذیری ورق امکان انتخاب قطرهای سوراخ خیلی پایین و شکل‌دهی ارتفاع زیاد فلنج امکان‌پذیر نمی‌باشد. سه قطعه شکل داده شده با قطر سوراخ اولیه متفاوت در شکل 10 نمایش داده شده است. دایره‌های مشکی رنگ روی دیواره قطعه در شکل 10، برای بررسی رفتار کرنشی روی دیواره فلنج ایجاد شده‌اند. از تغییر شکل دایره‌ها برای مشخص شدن توزیع کرنش و توجیه نتایج در متن مقاله استفاده شده است. اما با توجه به دقیق نبودن اندازه‌ها، با توجه به روش نامناسب رنگ کردن، از اعداد کرنش در مقاله استفاده نشده است. تأثیر قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع فلنج شکل داده شده در شکل 11 در دو سرعت دورانی به همراه ارتفاع فلنج نظری نشان داده شده است. در همه حالت‌های نشان داده شده، پیشروی ثابت و برابر 20mm/min بوده است. با توجه به اینکه قطر فلنج نهایی ثابت و برابر 96mm است با کاهش قطر سوراخ اولیه، طول لبه بیشتری از ورق برای تبدیل به فلنج باقی مانده و ارتفاع فلنج افزایش

پیشروی تغییرات ایجاد شده در ضخامت دیواره فلنج بیشتر شده است. در واقع نقاطی که ضخامت بالاتری دارند در محل‌هایی قرار گرفته‌اند که سنبه‌های شکل‌دهی تماس کمتری با فلنج داشته و کرنش کششی محیطی کمتری در آن‌ها ایجاد شده است. اما در پیشروی‌های کمتر که قسمت‌های بیشتری از ورق دچار تغییر شکل پلاستیک شده، ماده توسط اصطکاک ابزار به سمت لبه فلنج جریان پیدا کرده و در نتیجه نازک‌شدگی بیشتر شده و همچنین ارتفاع فلنج مقداری افزایش یافته است.

3-3- تأثیر سرعت دورانی ابزار بر شکل‌دهی فلنج

نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت دورانی ابزار برای همه قطرهای اولیه، ارتفاع فلنج بیشتری شکل داده شده است. تأثیر سرعت دورانی بر ارتفاع فلنج شکل داده شده تحت سرعت پیشروی 40mm/min در شکل 15 نشان داده شده است. برای قطر اولیه سوراخ 65mm، با افزایش سرعت دورانی از 50 به 315 دور بر دقیقه، ارتفاع فلنج در حدود 5/5 درصد افزایش یافته است. با افزایش سرعت دورانی، گرمایش موضعی در محل تماس ابزار شکل‌دهی با ورق رخ می‌دهد که علت آن اصطکاک است.

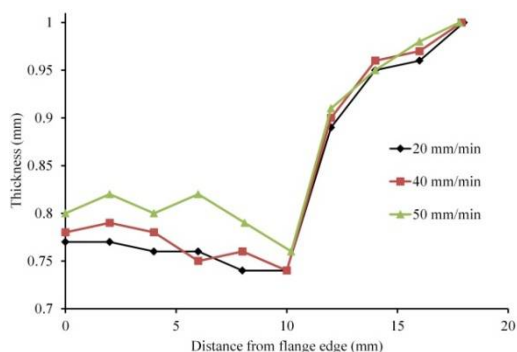


Fig. 14 Effect of feed rate on thickness distribution of flange

شکل 14 تأثیر سرعت پیشروی توزیع ضخامت فلنج

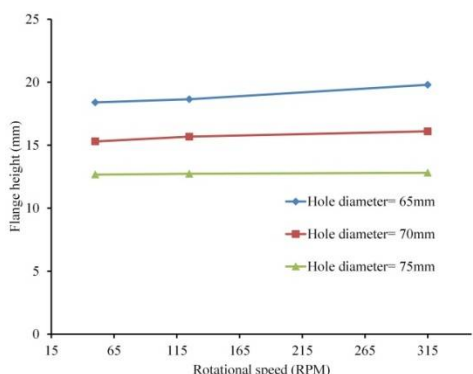


Fig. 15 Effect of rotational speed on flange height

شکل 15 تأثیر سرعت دورانی بر ارتفاع فلنج

در ارتفاع فلنج تأثیر چندانی ندارد. در واقع با افزایش سرعت پیشروی ارتفاع فلنج کاهش می‌یابد. در شکل 13 تأثیر سرعت پیشروی در ارتفاع فلنج تحت سرعت دورانی 125 دور بر دقیقه مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در مقادیر بالاتر قطر سوراخ اولیه، پیشروی بر ارتفاع فلنج اثر نداشته است. بیشترین تأثیر سرعت پیشروی بر ارتفاع فلنج در قطر سوراخ اولیه 65mm ایجاد شده است. افزایش سرعت پیشروی باعث ایجاد فاصله بین نقطه مرکزی تماس سنبه‌ها با سطح ورق شده و در واقع در کل فرایند شکل‌دهی طول تماس ابزار با ورق کمتر می‌شود. در نتیجه مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده در دیواره فلنج و جریان ماده به سمت لبه فلنج کمتر شده و در نهایت ارتفاع فلنج کمتری ایجاد خواهد شد. توزیع ضخامت برای سه نمونه شکل داده شده با قطر اولیه 65mm تحت سرعت دورانی 125 دور بر دقیقه در سرعت‌های پیشروی مختلف در شکل 14 نشان داده شده است.

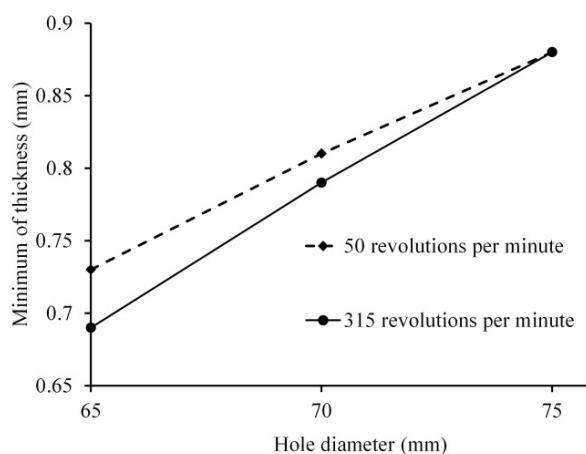


Fig. 12 Effect of hole diameter on minimum thickness of flange

شکل 12 تأثیر قطر سوراخ اولیه و سرعت دورانی بر حداقل ضخامت فلنج

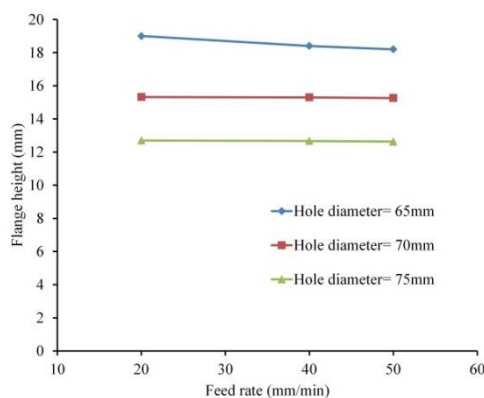


Fig. 13 Effect of feed rate on flange height

شکل 13 تأثیر سرعت پیشروی بر ارتفاع فلنج

همان‌طور که مشاهده می‌شود با بیشتر شدن سرعت

5- مراجع

- [1] L. Edward, Apparatus and process for incremental dieless forming, U.S. Patent 3,342,051, issued September 19, 1967.
- [2] N. B. Khalifa, S. Thiery, Incremental sheet forming with active medium, *CIRP Annals*, 2019.
- [3] M. J. Mirnia, B. Mollaei 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 (In Persian فارسی).
- [4] A. Taherkhani, A. Basti, N. Narimanzadeh, A. Jamali, Tool frictional stir effect on dimensional accuracy and formability in single point incremental forming at high rotational speeds, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 665-674, 2016 (In Persian فارسی).
- [5] H. Roohi, H. Deilami Azodi, M. Safari, Investigation on Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process, *Modares Mechanical Engineering*; Vol. 19, No. 2, pp. 259-268, 2019 (In Persian فارسی).
- [6] S. A. Eftekhari, A. Fazli, A novel strategy for improvement of sheet thickness distribution in incremental sheet metal forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 61-70, 2016 (In Persian فارسی).
- [7] R. Panahi Liavoli, M. Bakhshi Jooybari, H. Gorji, M. J. Mirnia, Experimental investigation of formability of laser tailor welded steel blanks in single point incremental forming, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 6, pp. 25-33, 2019 (In Persian فارسی).
- [8] Y. M. Huang, K. H. Chien, The formability limitation of the hole-flanging process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, No. 1-2, pp. 43-51, 2001.
- [9] D. I. Hyun, S. M. Oak, S. S. Kang, Y. H. Moon, Estimation of hole flangeability for high strength steel plates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130, pp. 9-13, 2002.
- [10] V. A. M. Cristino, L. Montanari, M. B. Silva, P. A. F. Martins, 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*, Vol. 229, No. 5, pp. 380-388, 2015.
- [11] Z. CUI, L. GAO, and Q. LU, Application of CNC incremental forming in hole-flanging process, *Materials for Mechanical Engineering*, Vol. 7, pp. 5-8, 2008.
- [12] Z. Cui, L. Gao, Studies on hole-flanging process using multistage incremental forming, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 124-128, 2010.
- [13] G. Centeno, M. B. Silva, V. A. M. Cristino, C. Vallellano, P. A. F. Martins, Hole-flanging by incremental sheet forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 59, pp. 46-54, 2012.

در نتیجه تنش جریان ماده کاهش پیدا کرده و شکل‌دهی آن راحت‌تر می‌شود. این افزایش دما در سرعت‌های دورانی بالا با بخار شدن روغن هیدرولیک در محل تماس قابل تشخیص بوده است. علاوه بر این، افزایش سرعت دورانی باعث کیفیت سطح داخلی دیواره فلنج می‌شود که این موضوع در شکل 16 نمایش داده شده است.

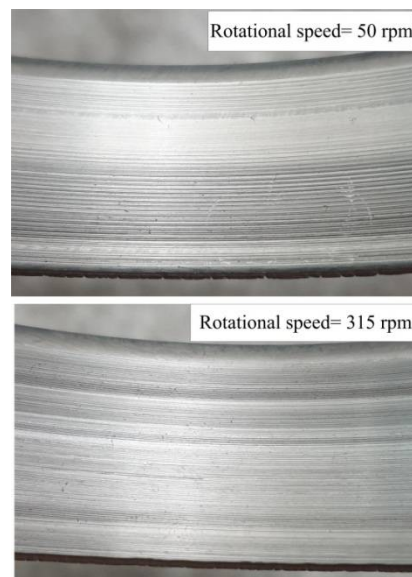


Fig. 16 Effect of rotational speed on roughness of internal surface of flange

شکل 16 تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح داخلی فلنج

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شکل‌دهی تدریجی فلنج‌های آلومینیومی با استفاده از یک ابزار جدید انجام شد. به کارگیری ابزار جدید که شامل دو سنبه شکل‌دهی خارج از مرکز است، نیاز به حرکت پیچیده ابزار شکل‌دهی و ماشین کنترل عددی را از بین می‌برد. استفاده از ابزار جدید با توجه به حذف مسیر ماریچ ابزار و استفاده از حرکت مستقیم رو به پایین منجر به کاهش زمان شکل‌دهی فلنج شده و اثر پارامترهای فرایندی سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر سوراخ اولیه بر ارتفاع فلنج و ضخامت دیواره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد برای دستیابی به حداکثر ارتفاع فلنج باید حداقل قطر سوراخ اولیه، بالاترین سرعت دورانی و کمترین سرعت پیشروی در شکل‌دهی استفاده شود. با کاهش قطر سوراخ اولیه از 75mm به 65mm، ارتفاع فلنج تا 55 درصد افزایش می‌یابد. انتخاب قطر سوراخ خیلی کم منجر به پارگی زودرس در دیواره فلنج می‌شود. افزایش سرعت دورانی علاوه بر افزایش ارتفاع فلنج باعث کاهش زبری سطح داخلی فلنج می‌گردد.

- the single-stage hole-flanging process by SPIF, *Procedia engineering*, Vol. 132, pp. 290-297, 2015.
- [17] M. Borrego, D. Morales-Palma, A. J. Martínez-Donaire, G. Centeno, C. Vallellano, Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 237, pp. 320-330, 2016.
- [18] T. Cao, B. Lu, H. Ou, H. Long, J. Chen, Investigation on a new hole-flanging approach by incremental sheet forming through a featured tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 110, pp. 1-17, 2016.
- [14] M. B. Silva, P. Teixeira, A. Reis, P. A. F. Martins, On the formability of hole-flanging by incremental sheet forming, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 227, No. 2, pp. 91-99 2013.
- [15] L. Montanari, V. A. Cristino, M. B. Silva, P. A. F. Martins, On the relative performance of hole-flanging by incremental sheet forming and conventional press-working, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 228, No. 4, pp 312-322, 2014.
- [16] M. Borrego, , D. Morales-Palma, A. J. Martínez-Donaire, G. Centeno, C. Vallellano, On the study of