



بررسی و تحلیل آماری تاثیر پارامترهای قطر پین، ضخامت و سختی لایه پلی اورتان بر نمودار حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم مس در فرآیند شکلدهی چند نقطه ای

میلاذ عالی مجیدآباد¹، رامین هاشمی^{2*}، حبیب اله اکبری³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در پژوهش حاضر نمودار حد شکلدهی حاصل از فرآیند شکلدهی چند نقطه ای ورق‌های دولایه آلومینیوم/مس به صورت تجربی و به صورت تئوری با استفاده از روش مشتق دوم بدست آمد. نتایج تجربی با نتایج تئوری کمتر از 10 درصد خطا داشته است. در شبیه‌سازی فرآیند تاثیر پارامترهای قطر پین، سختی لایه پلی اورتان و ضخامت لایه پلی اورتان بر حد شکلدهی فرآیند شکلدهی چند نقطه ای بررسی گردید. خروجی‌های نتایج شبیه‌سازی تحت بررسی آماری قرار گرفت که نتایج نشان داد همبستگی خوبی با یکدیگر دارند و پارامترها تاثیر بسیار بالایی بر حد شکلدهی داشته است. نتایج نشان داد که پین با قطر 12 میلی‌متر ابعاد بهینه می‌باشد و بیشترین حد شکلدهی را در تمامی حالات استفاده از لایه پلی اورتان در مقایسه با سایر پین‌ها داشته است. در تمامی قطر پین‌ها با افزایش سختی‌های لایه پلی اورتان و با افزایش ضخامت لایه پلی اورتان حد شکلدهی افزایش یافته است اما این افزایش حد شکلدهی با افزایش ضخامت تاثیر چشمگیری داشته است که در پین با قطر 8 و 15 میلی‌متر بسیار بیشتر بوده است.

دریافت: 1404/09/04

پذیرش: 1405/03/03

کلیدواژگان

شکلدهی چند نقطه ای،

نمودار حد شکلدهی،

ورق دولایه جوش انفجاری آلومینیوم/مس،

شکلدهی ورق

Statistical investigation and analysis of the effects of pin diameter, polyurethane layer thickness, and hardness on the forming limit diagram of aluminum/copper bimetallic sheets in the multi-point forming process

Milad Aali Majidabad¹, Ramin Hashemi^{1*}, Habibolah Akbari¹

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

Keywords

Multi points forming (MPF),
Forming limit diagram (FLD),
Al/Cu Bimetallic Sheets,
Nakazima test,
Sheet metal forming

Abstract

In this study, the forming limit diagram (FLD) of aluminum/copper bimetallic sheets in the multi-point forming (MPF) process was obtained both experimentally and theoretically using the second derivative method. The experimental results showed less than 10% deviation from the theoretical predictions. In the numerical simulations, the effects of pin diameter, polyurethane layer hardness, and polyurethane layer thickness on the forming limit of the MPF process were systematically analyzed. The simulation outputs were subjected to statistical evaluation, and the results indicated a strong correlation among the studied parameters, confirming the adequacy of the selected modeling approach. The findings showed that a pin diameter of 12 mm provided the optimal configuration, yielding the highest forming limit under all polyurethane layer conditions compared to other pin diameters. Furthermore, for all pin sizes, increasing both the hardness and thickness of the polyurethane layer led to an improvement in the forming limit. However, the influence of layer thickness was found to be more significant, particularly for pin diameters of 8 mm and 15 mm.

1- مقدمه

می‌شود، دارد لذا تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. بعد از 1980 تحقیقات روی این قالب‌ها توسط هارت در دانشگاه MIT به صورت جدی‌تری دنبال شد. در سال 1988 اولین قالب MPP¹ با کاربرد صنعتی به منظور اتساع

شکلدهی چند نقطه ای به علت انعطاف‌پذیری در انجام فرایند و تغییر ارتفاع پین‌ها کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف که از شکلدهی ورق استفاده

¹ Multi Points Foming

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Aali Majidabad, M., Hashemi, R., Akbari, H., "Statistical investigation and analysis of the effects of pin diameter, polyurethane layer thickness, and hardness on the forming limit diagram of aluminum/copper bimetallic sheets in the multi-point forming process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 3, pp. 2831-2838, 2026. <https://doi.org/10.22068/jstc.2026.2078995.1943>

ورق به چند منطقه تقسیم می‌شود و بر اساس هندسه قطعه در آن ناحیه، قالب شکل مورد نظر را به خود می‌گیرد و به این ترتیب با انجام شکل‌دهی در نواحی مختلف ورق در نهایت شکل مورد نظر ایجاد می‌گردد. یکی از مزایای این روش امکان شکل‌دهی قطعات بزرگ با استفاده از یک قالب MPF کوچک می‌باشد. سای و همکاران [12] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند کششی چند نقطه‌ای را در شکل‌دهی قطعات با سطوح زینی، استوانه‌ای و کروی شکل مورد بررسی قرار دادند. آنان نشان دادند که برای جلوگیری از عیب تورفتگی استفاده از لایه الاستیک امری ضروری است. همچنین هر اندازه که قطعات شکل داده شده انحنای بیشتری داشته باشند، دقت ابعادی بالاتر و نتایج بهتری در استفاده از این روش قابل حصول می‌باشد. ابوساف و همکارانش در سال 2017 فرآیند شکلهی چند نقطه‌ای را بهینه کردند. آن‌ها توانستند با تغییر ابعاد سطح پین‌های مربعی شکل ابعاد بهینه‌ای برای تغییر شکل یکنواخت ورق پیدا کنند و اثرات پین را حذف کنند. همچنین نتایج کار خود را با نتایج شبیه‌سازی مقایسه کرد که نتایج مطابقت بالایی داشتند [13]. فانگ و همکارانش در سال 2020 در پژوهش خود از پین‌ها و نیروی الکترومغناطیس استفاده نمود و توانست به سطحی با کیفیت بهتر دست یابد. او در پژوهش خود با استفاده از نیروی الکترومغناطیس و اصطکاک بالای ایجاد شده توسط نیروی الکترومغناطیس و چیدمان نزدیک پین‌ها به سطحی با کیفیت بهتر دست یافت اما این نیروی الکترومغناطیسی بر افزایش عمق شکلهی اثرگذار نبود. همچنین با استفاده از ترکیب نیروی الکترومغناطیس و شکلهی چند نقطه‌ای برای شکلهی ورق‌های با سایز بزرگ استفاده کرد [14]. یا جی لیو و همکارانش در سال 2018 در پژوهش خود برای کاهش میزان چروکیدگی لبه‌های ورق در فرآیند شکلهی چند نقطه‌ای ورق‌گیر را به چهار قسمت تقسیم نمودند. همچنین سطوح ورق‌گیر را مورد ارزیابی قرار دادند تا ابعاد بهینه ورق‌گیر را بدست آورند [4]. نیاما و همکارانش در سال 2018 در پژوهش خود اثر نیروی ورق‌گیر و لایه پلی اورتان را در قالب خود پین‌ها به صورت دایره‌ای بود مورد بررسی قرار دادند. همچنین او در قالب خود از پین‌های کروی استفاده نمود و برای برگشت پین‌ها از فنر برای استفاده نمود در نتیجه پژوهش میزان اثر پین و چروکیدگی لبه‌های ورق را در فرآیند شکلهی چند نقطه‌ای کاهش داد. او توانست با استفاده از لایه پلی اورتان میزان ضخامت را در سطح نمونه به میزان ثابت نگه دارد و اثر پین‌ها از روی سطح نمونه کاهش یافت [5]. پانیو و همکارانش در پژوهش خود در سال 2017 ورق فولادی را مورد مطالعه قرار داد و برای اعمال نیروی تغییر شکل به روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای به جای استفاده از پین‌های پشتی از نیروی سیال در پشت صفحه الاستیک استفاده نمودند. همچنین در مقابل پین‌ها برای حذف اثر پین از صفحه الاستیک استفاده نمودند. در نتیجه پژوهش خود با تغییر سختی صفحه الاستیک میزان اثرگذاری پین‌ها را بر روی ورق بررسی نمود که نتایج تجربی و شبیه‌سازی او مطابقت مناسبی داشتند. در شبیه‌سازی خود میزان کرنش اعمال شده و تنش اعمال شده به ورق را بررسی نمود [15]. کو ارهو و همکارانش در سال 2018 در پژوهش خود در شکل‌دهی چند نقطه‌ای در چهار حالت از لایه پلی اورتان و صفحه محافظ فولادی استفاده کردند. نتایج را این چهار حالت را برای میزان ضخامت در راستای دو محور با استفاده از لیزر اسکن و مقایسه کردند. همچنین در پژوهش خود نتایج حاصل از کار تجربی را با نتایج شبیه‌سازی مقایسه کردند که این نتایج با یکدیگر تطابق داشتند. در پژوهش خود به این نتایج دست یافتند که بدون استفاده از لایه پلی اورتان

ورق‌های بدنه هواپیما با همکاری مشترک دانشگاه MIT، گروه فضایی گرومن و کمپانی بٹ سیرل ساخته شد [1]. این قالب دارای ابعاد 1.2 در 1.8 متر بوده و در آن از پین‌های با قطر 28 میلی‌متر استفاده می‌شد. این قالب می‌توانست طی 30 دقیقه شکل مورد نظر را به خود بگیرد. دقت موقعیت دهی پین‌های آن 0.1 میلی‌متر و کورس حرکت عمودی 305 میلی‌متر و توانایی تحمل نیروی عمودی هر پین به تنهایی 22 کیلو نیوتن بوده است. تان و همکاران [2] شکل‌دهی پرتز جمجمه انسان، از ورق تیتانیومی مشبک را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. آنان داده‌های به دست آمده از اسکن CT¹ را برای تنظیم المان‌های قالب به کار بردند و با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند که با استفاده هم‌زمان از ورق گیر، لایه الاستیک و بالشتک فلزی می‌توان پرتز جمجمه را به‌طور سالم و موفقیت آمیزی شکل‌دهی کرد. در نواحی تماس پین‌ها با سطح ورق، تغییر شکل موضعی شدید رخ می‌دهد. برای جلوگیری از وقوع این پدیده و تولید قطعاتی باکیفیت مناسب می‌توان از یک لایه الاستیک ما بین پین‌ها و سطح ورق استفاده کرد. خصوصیات لایه الاستیک مورد استفاده تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی دارد. همچنین در شکل‌دهی چند نقطه‌ای مشابه روش سنتی عیب چین خوردگی به وجود می‌آید که به دلیل عدم نیروی ورق گیر حاصل می‌شود. [3]. در شکلهی سنتی عیب چین خوردگی با استفاده از ورق گیر حذف می‌شود. در شکل‌دهی چند نقطه‌ای نیز برای حذف چین خوردگی می‌توان ورق گیر استفاده کرد [15,19]. پاپازیان و همکاران [6] یک قالب گسسته قابل تغییر شکل با سیستم کنترل مدار بسته را در مقیاس صنعتی برای شکل‌دهی کششی پوسته هواپیما توسعه دادند. هاس و همکاران [6] قالب انعطاف‌پذیری را جهت شکل‌دهی قطعات تکی طراحی کرده و با ساخت یک قالب اولیه، عملی بودن روش ارائه شده را بررسی کردند. مینگژلی و همکارانش [7] روش‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، با مفهوم فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند، ایشان طبقه‌بندی مدهای مختلف شکل‌دهی چند نقطه‌ای و استفاده از روش‌های شکل‌دهی قطعات ورقه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان همچنین به‌منظور فراهم کردن امکان شکل‌دهی سطوح ورقه‌ای با ابعاد بزرگ با استفاده از قالب‌های کوچک، روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای موضعی را پیشنهاد کردند [8]. فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای با استفاده از ورق‌گیر و شکل‌دهی چند نقطه‌ای مرحله‌ای از دیگر روش‌های ارائه شده توسط ایشان می‌باشد [2]. ژانگ و همکاران [9] فرآیند شکل‌دهی چند نقطه‌ای ساندویچی را مورد بررسی قرار دادند. در این روش تنها نیمی از قالب با ماتریسی از پین‌ها جایگزین شده و نیمه دیگر آن با یک بالشتک الاستیک ضخیم جایگزین می‌شود. ایشان نشان دادند که استفاده از لایه الاستیک میانی مکانیزم شکل‌دهی را تحت تأثیر قرار داده و حتی در صورتی که ورق قالب دچار تورفتگی شود به‌خوبی می‌تواند از وقوع این عیب در قطعه کار اصلی جلوگیری کند. سان [10] با الهام از مفهوم شکل‌دهی چند نقطه‌ای، روشی با عنوان ورق‌گیر چند نقطه‌ای را ابداع نمود که در آن ورق گیر به جای اینکه سطحی یک تکه باشد، به صورت قطعات جداگانه ساخته می‌شود که تک تک آن‌ها قابلیت کنترل ارتفاع را دارند، به این ترتیب در حین فرآیند شکل‌دهی جریان ورق به صورتی تنظیم می‌شود که چروکیدگی و پارگی ورق به حداقل مقدار ممکن برسد و عمق بیشتری شکلهی نمودند. چن [11] با بهره‌گیری از قابلیت‌های منحصر به فرد MPF در تغییر شکل قالب روشی با عنوان شکل‌دهی منطقه‌ای را ابداع نمود. در این روش با توجه به ابعاد قالب،

¹ Computer Tomography

استفاده شده است. ورق به ابعاد 17×17 سانتیمتر و به ضخامت 0.5 میلی‌متر استفاده گردید. پس از اتصال ضخامت ورق دولایه 1 میلی‌متر شده است. ورق مس CU10100 و ورق آلومینیوم AA1100 می‌باشد. ورق‌ها قبل از شکلدهی به مدت یک ساعت و سی دقیقه در دمای 350 درجه سانتی‌گراد در داخل کوره تحت عملیات حرارتی، آنیل شدند. نمونه آزمون کشش ورق‌ها بر اساس استاندارد E8 M ASTM تهیه گردید.

برای بدست آوردن نمودار حد شکلدهی تجربی به این ترتیب عمل می‌شود. قطر تغییر یافته دایره‌هایی با قطر 2 میلی‌متر که به روش الکتروشیمیایی بر روی ورق حک گردیده است، اندازه‌گیری می‌شود. سپس کرنش‌های اصلی و فرعی خوانده می‌شود. در انتها نمودار حد شکلدهی حاصل از فرآیند شکلدهی چند نقطه ای استخراج می‌گردد.

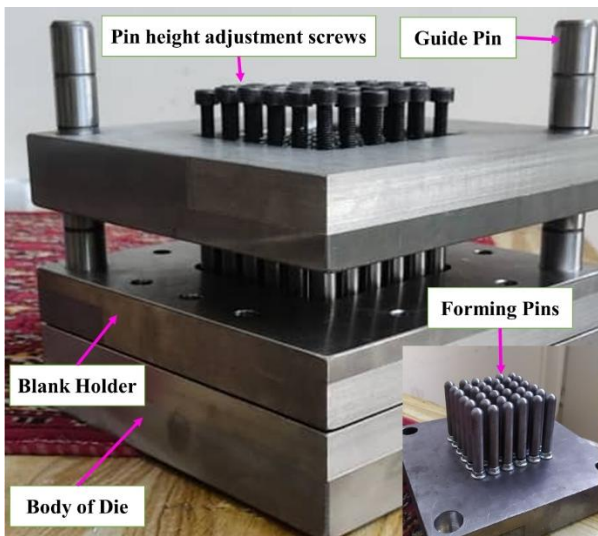


Fig. 1 Multi points forming die components

شکل 1 اجزای قالب شکلدهی چند نقطه ای

پس از انجام فرآیند شکلدهی چند نقطه ای در قسمت‌هایی که پاره شدن ورق و یا نازک شدن ورق اتفاق افتاده است، ابعاد تغییر یافته دایره‌های بر روی نمونه خوانده می‌شود و با استفاده از معادلات 1 کرنش‌های اصل و فرعی بدست آورده می‌شود. سپس نتایج بر روی نمودار ثبت می‌شود و نمودار حد شکلدهی استخراج می‌گردد.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \ln \left(\frac{d_1}{d_0} \right) \\ \varepsilon_2 &= \ln \left(\frac{d_2}{d_0} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

2-2- روش شبیه‌سازی

برای بدست آوردن نمودار حد شکلدهی به روش تئوری از روش مشتق دوم استفاده می‌شود. در مراحل شبیه‌سازی ابتدا قالب مد نظر با نرم‌افزار Solidworks طراحی گردیده است و در ادامه این طراحی برای شبیه‌سازی فرآیند شکلدهی چند نقطه ای به نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus انتقال داده شده است. در مدل پژوهشی برای کاهش زمان شبیه‌سازی فقط پین‌ها و ورق گیر و سنبه به صورت پوسته و صلب؛ ورق دولایه به صورت شکل‌پذیر مدل‌سازی شده است. برای مش‌بندی از المان‌های چهار گره‌ای 4sdr استفاده گردید. روش Dynamic/Explicit دقت و سرعت بالایی در حل مسائل تماسی پیچیده دارد لذا از این روش برای شبیه‌سازی اجزا محدود استفاده گردید. لازم

میزان اثر پین و تغییرات ضخامت در دو راستای ورق بسیار زیاد می‌باشد اما در حالت اما با استفاده از پلی اورتان این میزان چروکیدگی را کاهش دادند. اما در حالت استفاده از پد فولادی بهتر از حالت با لایه پلی اورتان بود اما اگر از هر دو به طور همزمان استفاده شود ضخامت در راستای دو محور ثابت می‌ماند که این نتایج را در شبیه‌سازی مشاهده نمودند [16].

به علت کاربرد ورق‌های دو لایه از جمله کاهش وزن، افزایش استحکام، افزایش شکل‌پذیری و غیره در ادامه نتایجی از بررسی‌های شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیوم/ مس آورده شده است. آلومینیوم به علت سبک بودن و مس به علت شکل‌پذیری بالا و رسانایی گرمایی و الکتریکی بالایی که دارد بسیار فلزات پر کاربردی در صنعت می‌باشند. فدهیل عباس و همکارانش در سال 2019 ترکیبی از شکلدهی چند نقطه ای و شکلدهی تدریجی پرداخت و در پژوهش خود ماتریس مد نظر خود را با استفاده از تنظیم ارتفاع پین‌ها تنظیم کرد و با استفاده از یک ابزار که برنامه حرکتی آن به دستگاه سی ان سی داده شده بود مسیر حرکت ابزار را بر روی ورق مشخص کرد و در ادامه بین پین‌های ماتریس و ورق یک قالبی را برای از بین بردن اثر پین بر روی ورق قرار داد [17]. علایی و همکارانش در تحقیقات خود تاثیر دما را بر نمودار حد شکلدهی آزمایش ناکازیمما بر روی ورق دولایه آلومینیوم/ مس بررسی کردند و آزمایش ناکازیمما را در سه دمای 23، 120 و 220 درجه سانتی‌گراد انجام دادند و نشان دادند که میزان شکل‌پذیری در اثر افزایش دما، افزایش یافته است و نمودار حد شکلدهی به سمت پایین حرکت کرده است [18]. غضنفری و همکارانش در پژوهش خود مدل M-K را در تعیین نمودار حد شکلدهی بهینه کردن و نتایج تئوری خود را با نتایج تئوری حاصل از مدل M-K مرسوم مقایسه کردند که پس از مقایسه هر دو مدل با نتایج تجربی آزمایش ناکازیمما دریافتند که مدل بهینه شده با نتایج تجربی مطابقت بیشتری دارد و میزان خطای مدل مرسوم را کاهش داده بودند [19]. کرجی بانی و همکارانش در سال 2016 با استفاده از نتایج آزمون کشش ورق دولایه آلومینیوم/ مس نمودار حد شکلدهی حاصل از آزمایش ناکازیمما را بر اساس تئوری مدل M-K شبیه‌سازی نمود و با نتایج حاصل از آزمایش تجربی ناکازیمما صحت سنجی نمود [20]. عالی و همکاران در سال 2024 به صورت تجربی نشان دادند که حد شکلدهی در فرآیند شکلدهی چند نقطه ای از پین با ابعاد سایز 12 mm استفاده شود حد شکلدهی نسبت به حد شکلدهی در آزمایش ناکازیمما افزایش می‌یابد [21].

در پژوهش حاضر با توجه به عدم بررسی جامع پارامترهای اثرگذار بر حد شکلدهی چند نقطه ای فرآیند شکلدهی چند نقطه ای در این پژوهش پس از صحت‌گذاری نتایج تجربی بر نتایج تئوری، تاثیر پارامترهای ضخامت و سختی لایه پلی اورتان و قطر پین بر نمودار حد شکلدهی فرآیند شکلدهی چند نقطه ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین میزان اثرگذاری این پارامترها از لحاظ آماری بر نمودار حد شکلدهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- روش تجربی

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، در این پژوهش از قالبی در ابعاد 25×25 سانتی‌متر از جنس MO40 استفاده گردید. ابعاد ناحیه شکلدهی 10×10 سانتیمتر می‌باشد. در این ناحیه شکلدهی تعداد 36 عدد پین کروی به قطر 12 میلی‌متر استفاده گردیده است. چیدمان پین‌ها به صورت 6 ردیف و 6 ستون می‌باشد. بین ورق و پین‌ها برای از بین بردن اثر پین‌ها بر روی نمونه از لایه پلی اورتان با سختی 85 (SA) استفاده گردید. در ادامه برای شکلدهی از ورق‌های دولایه حاصل از اتصال جوش انفجاری دو ورق مس و آلومینیوم

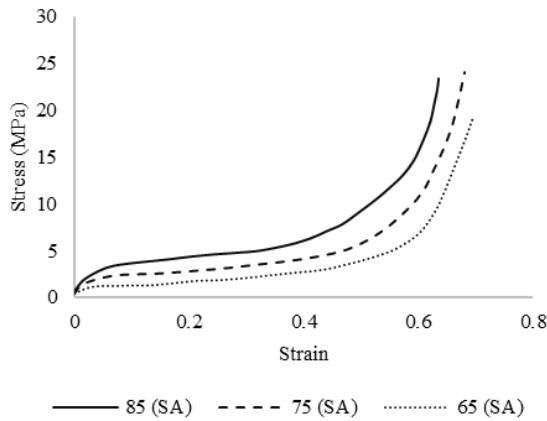


Fig. 3 Tensile test results of the polyurethane layer at harnesses levels of 65, 75, and 85 SA

شکل 3 نمودار تنش کرنش لایه پلی اورتان در سه سختی 65(SA)، 75(SA) و 85(SA)

جدول 2 پارامترهای فرآیند شکلدهی چند نقطه‌ای در نرم‌افزار آباکوس

Table 2 MPF parameters in ABAQUS

قطر پین (mm)	ضخامت لایه پلی اورتان (mm)	سختی لایه پلی اورتان (SA)
8	5	65
10	10	75
12		85
15		

جدول 3 حالات شبیه‌سازی برای سایزهای پین و ضخامت و سختی‌های پلی اورتان

Table 3 Simulation scenarios for pin sizes and polyurethane thickness and hardness

ردیف	قطر پین (mm)	سختی لایه پلی اورتان (SA)	ضخامت لایه پلی اورتان (mm)
1	8	65	5
2	8	75	5
3	8	85	5
4	8	65	10
5	8	75	10
6	8	85	10
7	10	65	5
8	10	75	5
9	10	85	5
10	10	65	10
11	10	75	10
12	10	85	10
13	12	65	5
14	12	75	5
15	12	85	5
16	12	65	10
17	12	75	10
18	12	85	10
19	15	65	5
20	15	75	5
21	15	85	5
22	15	65	10
23	15	75	10
24	15	85	10

به ذکر می‌باشد فقط پین‌ها و ورق گیر و ورق پس از تماس حرکت عمودی خواهند داشت. همچنین حرکت ای دورانی برای مدل محدود شده است. بین ورق و اجزای مختلف قالب میزان اصطکاک را برابر 0.1 می‌باشد. همچنین بین ورق و ورقگیر نیز ضریب اصطکاک را برابر 0.1 در نظر گرفته شده است. جهت صحنه‌گذاری ابتدا شرایط تجربی اعمال می‌گردد. پارامترهای تجربی شکلدهی چند نقطه ای ابعاد هندسی پین 12 میلی‌متر، لایه پلی اورتان با ضخامت 10 میلی‌متر و سختی (SA) 85 می‌باشد. نیروی ورقگیر 5 کیلو نیوتن و شبکه‌بندی‌ها به صورت می‌باشد.

خواص مکانیکی و خواص پلاستیک آلومینیوم و مس مطابق آزمون کشش انجام شده در دمای محیط در شکل 2 اعمال می‌گردد. آزمون کشش ورق‌ها مطابق استاندارد E8M انجام شده است. برای لایه پلی اورتان از نتایج آزمون کشش برای سه سختی 65، 75 و 85 استفاده شده است. نتایج در شکل 3 نشان داده شده است. برای بدست آوردن نمودار تنش کرنش لایه پلی اورتان از استاندارد ASTM 575D-91 استفاده گردید. برای شبیه‌سازی در ادامه نتایج آزمون کشش در نرم‌افزار المان محدود اعمال گردیده است.

در این روش پس از انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود نمودار کرنش پلاستیک در واحد زمان در المان‌های بحرانی ترسیم می‌شود سپس با دوبار مشتق‌گیری زمان بحرانی استخراج می‌گردد و در المان‌های بحرانی به شعاع 1.5 برابر کرنش‌های اصلی و فرعی خوانده می‌شود و نمودار حد شکلدهی استخراج می‌گردد. برای بررسی پارامترهای موثر بر نمودار حد شکلدهی ابتدا لازم می‌باشد صحنه‌گذاری بر روش تئوری انجام گیرد. لذا شرایط آزمایش تجربی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. پس از صحنه‌گذاری پارامترهای سختی و ضخامت لایه پلی اورتان و ابعاد هندسی پین مطابق جدول 2 برای شبیه‌سازی اعمال گردید. با در نظر گرفتن متغیرها در جدول 2 تمام حالات شبیه‌سازی گردید، شرایط شبیه‌سازی در جدول 3 نشان داده شده است. چیدمان قالب در نرم‌افزار آباکوس در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم - مس - لایه پلی اورتان

پارامترها	AA1100	CU10100
مدول یانگ E (GPa)	73	124
تنش تسلیم (MPa)	44	77
نرخ کار سختی K (MPa)	344	540
ضریب پواسون (ν)	0.33	0.34
توان کار سختی (n)	0.25	0.31

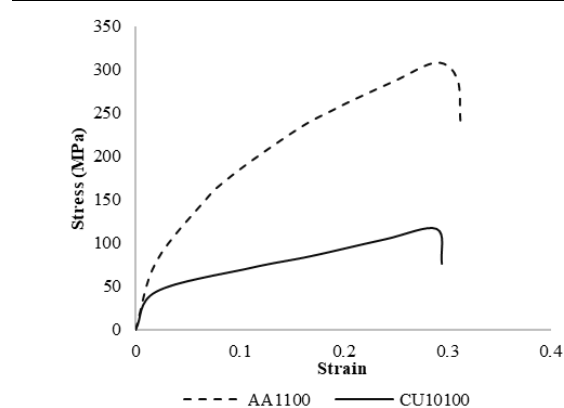


Fig. 2 Tensile test results of the Al and Cu

شکل 2 نتایج آزمون کشش مس و آلومینیوم

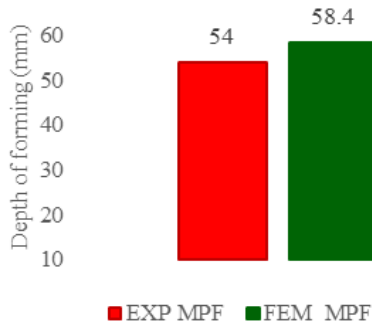


Fig. 6 Experimental versus numerical forming depths in MPF

شکل 6 مقایسه عمق شکلدهی فرآیند شکلدهی چند نقطه ای به صورت تئوری و تجربی

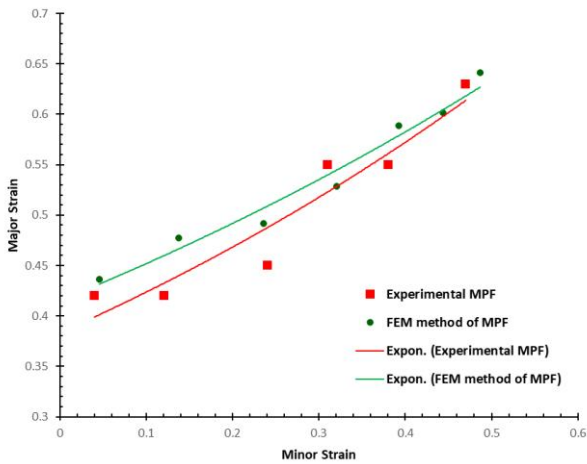


Fig. 7 Experimental versus numerical forming limit in MPF

شکل 7 مقایسه حد شکلدهی فرآیند شکلدهی چند نقطه ای تجربی و شبیه سازی

جدول 4 مساحت زیر نمودار حد شکلدهی 28 حالت فرآیند شکلدهی چند نقطه ای
Table 4. The area under the forming limit diagram for 28 different multi-point forming Style

ردیف	قطر پین (mm)	سختی لایه پلی اورتان (SA)	ضخامت لایه پلی اورتان (mm)	مساحت زیر نمودار (mm ²)
1	8	65	5	0.17626
2	8	75	5	0.18075
3	8	85	5	0.18363
4	8	65	10	0.18414
5	8	75	10	0.22108
6	8	85	10	0.23023
7	10	65	5	0.20035
8	10	75	5	0.20280
9	10	85	5	0.20970
10	10	65	10	0.20429
11	10	75	10	0.20945
12	10	85	10	0.21115
13	12	65	5	0.21516
14	12	75	5	0.22778
15	12	85	5	0.23665
16	12	65	10	0.22856
17	12	75	10	0.23773
18	12	85	10	0.24154
19	15	65	5	0.19483
20	15	75	5	0.19776
21	15	85	5	0.20741
22	15	65	10	0.20033
23	15	75	10	0.21300
24	15	85	10	0.23427

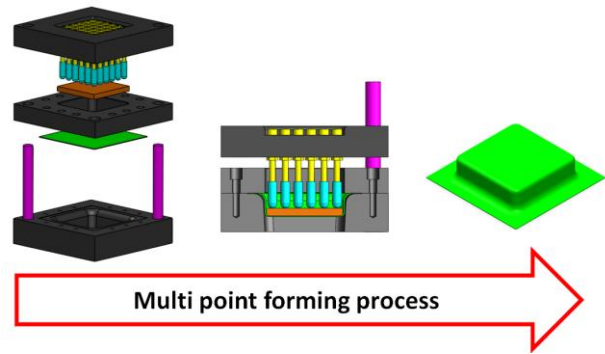


Fig. 4 Schematic of the MPF process, die setup, and formed sheet

شکل 4 روش انجام فرآیند شکلدهی چند نقطه ای و چیده مان قالب و خروجی ورق شکل دهی شده

در ادامه نتایج نمودار حد شکلدهی حاصل از شبیه سازی فرآیند شکل دهی چند نقطه ای ورق دولایه آلومینیوم/مس از نظر آماری مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین در ادامه بررسی آماری نتایج و بررسی اثر پارامترها بر نمودار حد شکلدهی در این فرآیند از دو شاخص آماری اصلی شامل نمودار احتمال نرمال و تحلیل قابلیت فرآیند در نرم افزار Minitab استفاده می شود.

3- نتایج

3-1- نتایج تجربی

مقایسه نتایج تجربی با نتایج تئوری فرآیند شکلدهی چند نقطه ای در شکل 5 نشان داده شده است که گلوبی شدن در نقاط گوشه اتفاق افتاده است. در ادامه در شکل 6 میزان عمق شکل پذیری در حالت تئوری 58.8 میلی متر بوده است و با نتایج تجربی اختلاف 8.1 درصدی داشته است. نمودار حد شکلدهی حاصل از فرآیند شکلدهی چند نقطه ای به صورت تئوری و تجربی در شکل 7 نشان می دهد که به دلیل اعمال ساختار همگن و بدون عیوب کریستالی ورق ها در نرم افزار المان محدود، در حالت تئوری نمودار حد شکلدهی بالاتر بوده است. خطای حد شکلدهی حالت تجربی و تئوری 8.4 درصد می باشد که برای اندازه گیری خطا از سطح زیر نمودار استفاده گردیده است.

نمودار حد شکلدهی تمامی حالات رسم گردید و اگر مساحت زیر نمودار بیشتر باشد به این معنا است که نمودار حد شکلدهی بالاتر می باشد. در جدول 4 مساحت زیر نمودار در شرایط مختلف نشان داده شده است.

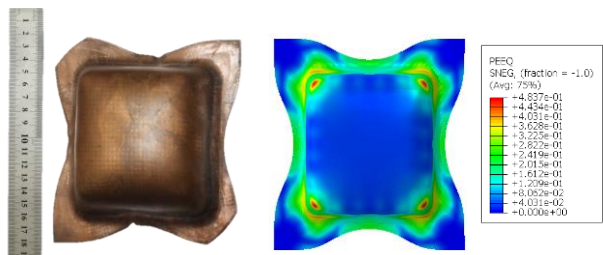


Fig. 5 Bimetallic sheets in MPF Experimental and Numerical

شکل 5 نمونه شبیه سازی شده در نرم افزار اجزا محدود آباکوس

یافته است چرا که در نقاط گوشه ای ورق کرنش های موضعی ایجاد کرده است و حد شکلهی را به قدری کاهش داده است که پین 10 حد شکلهی بیشتری نسبت به پین 15 داشته است.

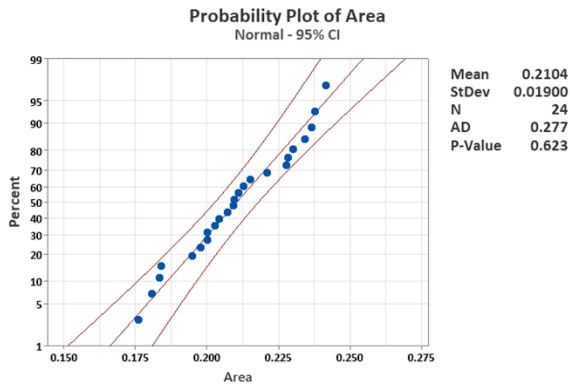


Fig. 8 Probability plot of area

شکل 8 نمودار احتمال مربوط به مساحت زیر نمودار حد شکل دهی

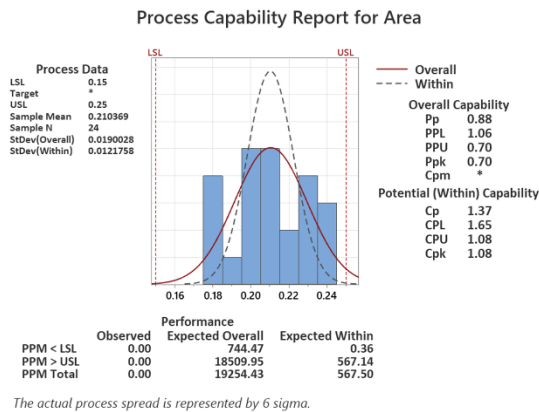


Fig. 9 Process capability report for area

شکل 9 نمودار قابلیت فرآیند مربوط به مساحت زیر نمودار حد شکل دهی

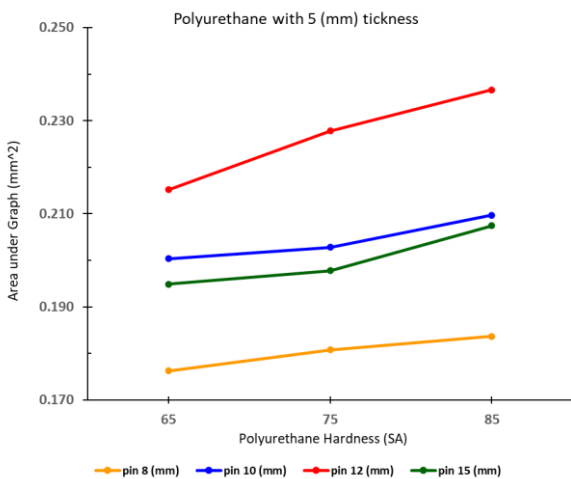


Fig. 10 Variation of the area under the forming limit diagram with changes in polyurethane layer hardness at a thickness of 5 mm

شکل 10 نمودار تغییرات مساحت زیر نمودار حد شکلهی بر اساس تغییرات سختی لایه پلی اورتان با ضخامت 5 میلی متر

در تحلیل نتایج آماری با استفاده از نرم افزار Mini Tab ، پاسخ نهایی به صورت مساحت زیر نمودار حد شکل دهی در نظر گرفته شده است، به طوری که افزایش این مساحت یعنی بالاتر بودن نمودار حد شکلهی است که این نشان دهندهی بهبود قابلیت شکل پذیری ورق در شرایط فرآیند شکلهی چند نقطه ای است. همانطور که در شکل 8 مشاهده می شود، نمودار احتمال نرمال¹ برای داده های حاصل از شبیه سازی ارائه شده است. هدف از این تحلیل، بررسی نمودار بودن توزیع داده ها جهت اطمینان از صحت و اعتبار تحلیل های بعدی بوده است. همان طور که مشاهده می شود، اغلب نقاط در محدوده ی خطوط اطمینان ۹۵٪ قرار دارند و انحراف چشمگیری از خط نرمال مرکزی دیده نمی شود. مقدار میانگین داده ها برابر 0.2104 و انحراف معیار برابر 0.019 گزارش شده است. همچنین مقدار آماره اندرسون-دارلینگ (AD²) برابر با 0.277 محاسبه گردید. از آن جا که مقدار P-value³ برابر 0.623 می باشد و بیشتر از عدد 0.05 است، فرض نرمال بودن داده ها در سطح اطمینان ۹۵٪ پذیرفته می شود. این نتیجه نشان می دهد که داده های پاسخ از توزیع نرمال تبعیت کرده و تغییرات آن ها ناشی از نوسانات طبیعی فرآیند است، بنابراین داده ها از نظر آماری معتبر و قابل استناد می باشند.

در ادامه همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است، نتایج تحلیل قابلیت فرآیند⁴ برای پاسخ مساحت زیر نمودار حد شکل دهی نمایش داده شده است. مشخصه حدود پایین (LSL⁵) و حد بالا (USL⁶) به ترتیب برابر با 0.15 و 0.25 در نظر گرفته شده اند. بر اساس تحلیل نرم افزار، مقادیر شاخص های قابلیت بالقوه فرآیند شامل Cp=1.37، Cpk=1.08 و شاخص های قابلیت واقعی فرآیند شامل Pp=0.88 و Ppk=0.70 محاسبه گردیده است. این مقادیر بیانگر آن است که فرآیند در حالت بالقوه از توانایی قابل قبولی برای تولید نتایج یکنواخت برخوردار بوده، هر چند در شرایط واقعی مقداری افت در شاخص های قابلیت مشاهده می شود که می تواند ناشی از تغییرات جزئی در پارامترهای ورودی باشد. با وجود این، مقدار نسبتاً بالای Cp و Cpk نشان می دهد که فرآیند در محدوده ی کنترل آماری قرار دارد و پتانسیل بهبود بیشتری دارد.

به طور کلی، نتایج آماری به دست آمده از دو تحلیل فوق تایید می کند که داده های مربوط به مساحت زیر نمودار حد شکل دهی از توزیع نرمال پیروی کرده و فرآیند شکلهی چند نقطه ای از پایداری و یکنواختی مناسبی برخوردار است. همچنین می توان نتیجه گرفت که پارامترهای مؤثر شامل قطر پین، ضخامت و سختی لایه پلی اورتان نقش تعیین کننده ای در بهبود پاسخ نهایی داشته اند و روند تغییرات حاصل از آن ها از منظر آماری قابل اعتماد و تکرار پذیر است.

نتایج حاصل از اثر افزایش سختی لایه پلی اورتان بر نمودار حد شکلهی برای هر پین در شکل 10 و 11 نشان داده شده است. در نمودار شکل 10 ضخامت نشان می دهد که لایه پلی اورتان 5 میلی متر می باشد و برای همه ابعاد هندسی پین ها افزایش سختی باعث افزایش حد شکلهی شده است. علت این امر چنین می باشد که افزایش سختی لایه پلی اورتان از کرنش های موضعی پین در گوشه های ورق جلوگیری کرده است. لازم به ذکر می باشد که پین 8 میلی متری در شرایط لایه پلی اورتان با ضخامت 5 میلی متر در تمامی سختی ها کمترین حد شکلهی را داشته است و پین 12 بیشترین حد شکلهی را داشته است که با افزایش قطر پین به 15 میلی متر حد شکلهی به مراتب کاهش

⁴ Process Capability Report
⁵ Lower Specification limit
⁶ Upper Specification limit

¹ Probability Plot
² Anderson Darling
³ Probability Value

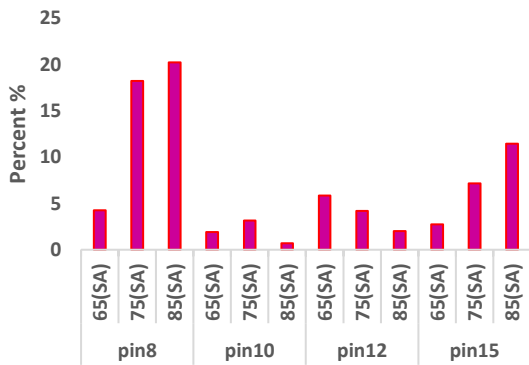


Fig. 12 Percentage change in the area under the forming limit diagram with variations in polyurethane layer thickness

شکل 12 نمودار درصد تغییرات مساحت زیر نمودار حد شکلدهی در اثر تغییرات ضخامت لایه پلی اورتان

4- جمع بندی

در این پژوهش برای ورق دولایه آلومینیوم/ مس که از طریق جوش انفجاری متصل شده است، نمودار حد شکلدهی حاصل از فرآیند شکلدهی چندنقطه‌ای به صورت تجربی و به صورت تئوری با استفاده از روش مشتق دوم بدست آمده است. در ادامه جمع بندی نتایج این پژوهش بیان می شود:

- برای حالت تئوری نمودار حد شکلدهی با استفاده از روش مشتق دوم بدست آمد و با نتایج تئوری مطابقت بالای 90 درصد داشته است.
- از تفسیر نتایج آماری بر اساس خروجی نمودار حد شکلدهی نشان داد که پارامترهای انتخاب شده در این پژوهش تاثیرات بسیار بالایی بر حد شکلدهی داشته است و این پارامترها کافی می باشد و فرض نرمال بودن داده ها در سطح اطمینان 95٪ می باشد.
- نتایج تئوری نشان داد که پین 12 میلی متری در همه حالات نسبت به سایر پین ها در شرایط مشابه حد شکلدهی بالاتری داشته است. در حالت پین 12 میلی متر و سختی لایه پلی اورتان (SA) 85 با ضخامت 10 میلی متر دارای بیشترین سطح زیر نمودار به اندازه 0.24154 میلی متر مربع می باشد.
- نتایج تئوری نشان داد که با افزایش ضخامت لایه پلی اورتان از 5 به 10 نمودار حد شکلدهی همواره بالاتر می رود. و از کرنش های موضعی ناشی از اثر پین جلوگیری می کند.
- نتایج تئوری نشان داد که در پین 8 میلی متری افزایش سختی تاثیر چندانی بر افزایش حد شکلدهی نداشته است و لازم می باشد ضخامت لایه پلی اورتان تا 10 میلی متر افزایش پیدا کند تا از کرنش های موضعی جلوگیری کند.

5- مراجع

[1] Walczyk, D. F., Lakshmikanthan, J., Kirk, D. R., "Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels," J. Manuf. Syst., vol. 17, no. 4, pp. 287-296, 1998.

[2] Tan, F. X., Li, M. Z., Cai, Z. Y., "Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis," J. Mater. Process. Technol., vol. 187, pp. 453-457, 2007.

[3] Li, M., Liu, Y., Su, S., Li, G., "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet," J. Mater. Process. Technol., vol. 87, no. 1-3, pp. 277-280, 1999.

[4] Liu, Y., Li, M., Ju, F., "Research on the process of flexible blank holder in multi-point forming for spherical surface parts," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 89, no. 5-8, pp. 2315-2322, 2017.

در نمودار شکل 11 نشان می دهد که ضخامت لایه پلی اورتان 10 میلی متر می باشد و برای همه پین ها افزایش سختی باعث افزایش حد شکلدهی شده است. در لایه پلی اورتان با سختی 65(SA) پین 8 کمترین حد شکلدهی را داشته است زیرا که قطر کم پین ها باعث کرنش های موضعی شده است و ورق زودتر دچار گلوبی و پارگی شده است. زمانی که سختی لایه پلی اورتان (SA) 75 می باشد حد شکلدهی پین 8 میلی متری به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می کند که حتی از پین 10 و 15 حد شکلدهی بیشتر می باشد که علت آن را چنین می توان بین کرد افزایش سختی در ضخامت 10 میلی متر توانسته است از کرنش های موضعی جلوگیری کند ولی پین های 10 و 15 در گوشه های ورق باعث گلوبی شدن و پارگی شده است و حد شکلدهی پایین تری نسبت به پین 8 داشته است. در لایه پلی اورتان با سختی 85(SA) حد شکلدهی برای پین های 8 و 15 نزدیک به هم بوده است، چراکه سختی به مقداری افزایش یافته است که مانع از اثر پین 8 برای کرنش های موضعی می شود و همچنین مانع از اثر پین 15 در گوشه های ورق می شود و حد شکلدهی برای این دو پین نزدیک هم بوده است اما پین 10 که هم باعث کرنش های موضعی در سطح ورق می شود و هم در گوشه های ورق باعث گلوبی شدن می شود حد شکلدهی پایین تری داشته است. در تمام لایه های پلی اورتان پین 12 ابعاد بهینه می باشد و بیشترین حد شکلدهی را داشته است.

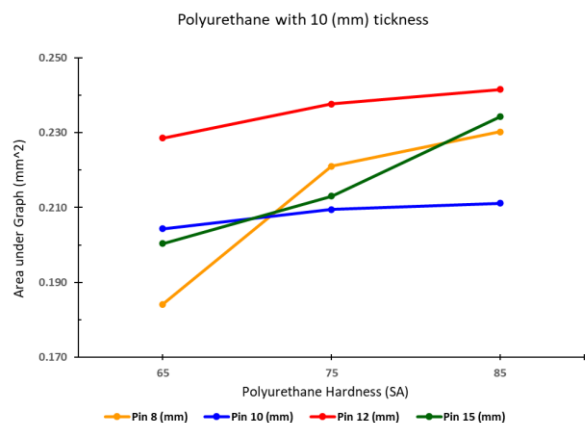


Fig. 11 Variation of the area under the forming limit diagram with changes in polyurethane layer hardness at a thickness of 10 mm

شکل 11 نمودار تغییرات مساحت زیر نمودار حد شکلدهی بر اساس تغییرات سختی لایه پلی اورتان با ضخامت 10 میلی متر

در ادامه نتایج در نمودار شکل 12 نشان می دهد که افزایش ضخامت لایه پلی اورتان همواره باعث افزایش حد شکلدهی شده است اما لازم به ذکر می باشد که در پین به قطر 8 میلی متر در اثر افزایش سختی لایه پلی اورتان با افزایش ضخامت لایه پلی اورتان اثر بیشتری بر افزایش حد شکلدهی داشته است چرا که از شکلدهی موضعی حاصل از قطر پین ها به مراتب بیشتر جلوگیری می کند و حد شکلدهی را افزایش می دهد. در پین 10 میلی متر افزایش ضخامت تاثیر چشمگیری نداشته است و در پین 12 میلی متری با افزایش سختی لایه پلی اورتان افزایش ضخامت روند کاهشی در افزایش حد شکلدهی داشته است. اما در پین 15 میلی متری هم با افزایش سختی لایه پلی اورتان افزایش ضخامت تاثیر افزایشی داشته است چرا که در سختی بالاتر باعث می شود، در گوشه های ورق گلوبی شدن و پارگی دیرتر اتفاق بیفتد و حد شکلدهی افزایش پیدا کند.

- [5] Neama, R. A., Al-Baghdadi, M. A. R. S., Al-Waily, M., "Effect of Blank Holder Force and Punch Number on the Forming Behavior of Conventional Dies," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 18, no. 04, 2018.
- [6] Haas, E., Schwarz, R. C., Papazian, J. M., "Design and test of a reconfigurable forming die," *J. Manuf. Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 77–85, 2002.
- [7] Li, M.-Z., Cai, Z.-Y., Sui, Z., Yan, Q. G., "Multi-point forming technology for sheet metal," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 333–338, 2002.
- [8] Cai, Z.-Y., Wang, S.-H., Li, M.-Z., "Numerical investigation of multi-point forming process for sheet metal: wrinkling, dimpling and springback," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, no. 9, pp. 927–936, 2008.
- [9] Zhang, Q., Wang, Z. R., Dean, T. A., "Multi-point sandwich forming of a spherical sector with tool-shape compensation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 194, no. 1–3, pp. 74–80, 2007.
- [10] Sun, G., Li, M. Z., Yan, X. P., Zhong, P. P., "Study of blank-holder technology on multi-point forming of thin sheet metal," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 187, pp. 517–520, 2007.
- [11] Chen, J.-J., Li, M.-Z., Liu, W., Wang, C.-T., "Sectional multipoint forming technology for large-size sheet metal," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 935–939, 2005.
- [12] Cai, Z.-Y., Wang, S.-H., Xu, X.-D., Li, M.-Z., "Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 1, pp. 396–407, 2009.
- [13] Abosaf, M., Essa, K., Alghawail, A., Tolipov, A., Su, S., Pham, D., "Optimisation of multi-point forming process parameters," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 5–8, pp. 1849–1859, 2017.
- [14] Fang, C., Zhao, J., Ling, L., Wang, W., Wan, M., "Electromagnetic peening-a novel sheet metal forming method," *EasyChair*, 2019.
- [15] Panouiu, V., Boazu, D., "Hydro-multipoint Forming, a Challenge in Sheet Metal Forming," in *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies*, Springer, 2017, pp. 79–94.
- [16] Erhu, Q., Mingzhe, L., Rui, L., Mingyang, C., Jianlei, L., "Research on formability in multi-point forming with different elastic pads," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 98, no. 5, pp. 1887–1901, 2018.
- [17] Abbas, T. F., Younis, K. M., kadhim Mansor, K., "The Influence of Process Parameters on Thickness Distribution in Multipoint Forming Process Using Finite Element Analysis," in *2019 2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering (ICECCPCE)*, IEEE, 2019, pp. 120–125.
- [18] Alaie, A., Hashemi, R., Kazemi, F., "Investigation of forming limit diagram and mechanical properties of the bimetallic Al/Cu composite sheet at different temperatures which fabricated by explosive welding," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 235, no. 1–2, pp. 73–84, 2021.
- [19] Ghazanfari, A., Soleimani, S. S., Keshavarzzadeh, M., Habibi, M., Assempuor, A., Hashemi, R., "Prediction of FLD for sheet metal by considering through-thickness shear stresses," *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 48, no. 6, pp. 755–772, 2020.
- [20] Hashemi, R., Karajibani, E., "Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 232, no. 5, pp. 848–854, 2018.
- [21] Majidabad, M. A., Khodayari, R., Akbari, H., Davoodi, B., Hashemi, R., "Multipoint forming process of aluminum sheet considering its forming limit diagram: Experimental and numerical investigations," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 0, no. 0, p. 14644207241276680, doi: 10.1177/14644207241276681.