مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، تابستان 1394، دوره 2، شماره 2، ص‌ص 18-25

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

مقایسه تحلیلی و تجربی حرکت خط جوش در فرایند کشش عمیق لوح‌های ترکیبی توسط ورق‌گیر یک‌تکه و دوتکه

سعید عبدالعظیم زاده[1]، سیامک مزدک[2*]، ابراهیم شریفی[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
* تفرش، صندوق پستی 79611-39518، s.mazdak@tafreshu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 تیر 1394
پذیرش: 29 مرداد 1394
ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:
کشش عمیق
مقاطع مربعی
لوح‌های ترکیبی

چکیده

لوح‌های ترکیبی از دو یا چند ورق فلزی با ویژگی‌های شکل‌پذیری متفاوت تشکیل شده‌اند که مزیت اصلی استفاده از لوح‌های ترکیبی، کاهش وزن محصول و هزینه‌های تولید بدون به خطر انداختن ایمنی محصول است. لوح‌های ترکیبی به طور گسترده در صنایع خودروسازی استفاده می‌شود. حرکت خط جوش یک مسأله چالش برانگیز در فرایند شکل‌دهی است. شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی، به دلیل وجود منطقه جوش و عدم تطابق مقاومت بین لوح‌ها، کمتر از مواد پایه است. حرکت خط جوش یکی از پارامترهایی است که شکل‌دهی ورق‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف در این مقاله مقایسه حرکت خط جوش در بخش‌های مختلف لوح‌های ترکیبی بین ورق‌گیر یک‌تکه و دوتکه است. برای این منظور در این مقاله یک شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود انجام شده است. در ادامه برای صحت‌سنجی قالب کشش عمیق ساخته شده است و مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حاصل از کشش عمیق لوح‌های ترکیبی با ضخامت‌های متفاوت و محل خط جوش متفاوت انجام شده است. جوشکاری آرگون برای ساخت لوح‌های ترکیبی قبل از شکل‌دهی و آزمایش کشش استفاده شده است. در نهایت به کمک روش پاسخ سطح مجموعه شبیه‌سازی برای بررسی اثر شعاع قالب و سنبه، محل خط جوش و نسبت ضخامت بر روی حرکت خط جوش در لوح‌های ترکیبی مربعی انجام شده است.

Compare the analytical and experimental weld line movement in deep drawing process by one and two piece blank holder

Saeed Abdolazimzadeh, Siamak Mazdak*, Ebrahim Sharifi

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
* P.O.B. 79611-39518, Tafresh, Iran, s.mazdak@tafreshu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 July 2015
Accepted 20 August 2015
Available Online 24 February 2016

Keywords:
Deep Drawing
Sections Square
Tailor Welded Blanks

ABSTRACT

A tailor-welded blank (TWB) composed of two or more sheet metal with different ductility properties, that its main advantage is a weight loss product and production costs without compromising product safety. Tailored welded blanks are increasingly used in the automotive industry. Weld-line movement in tailored welded blanks is always considered as a challengeable problem, during production process. Compared to the base metal, the formability of tailor-welded blank is less due to the presence of weld area and strength mismatch between component blanks. Weld-line movement is one of the parameters, having effect on sheets plasticity. The aim of this paper is compare the weld-line movement in different parts of the tailored welded blank between the blank holder blank one-piece and two-piece. For this purpose, in this article a three dimensional finite-element simulation has been carried out. In this regard, a deep drawing tool is manufactured for validation, and comparison has been performed between simulation and experimental results, being obtained from deep drawing of TWB's, with having different thickness and different weld-line location. Argon welding is used for manufacturing tailor welded blanks before forming and tensile test. Finally, using surface response technique, simulation is done to investigate the effect of punch and die's radius, weld-line situation and thickness rate, on weld-line movement and thickness distribution in square TWBS.

1- مقدمه

لوح‌های ترکیبی از دو یا چند ورق فلزی از مواد با ضخامت‌ها و استحکام‌های متفاوتی تشکیل شده‌اند که قبل از شکل‌دهی به وسیله فرایند جوشکاری به هم جوش داده شده و سپس توسط یک فرایند شکل‌دهی مناسب مانند کشش عمیق به شکل مورد نظر تبدیل می‌شوند. استفاده از این لوح‌های ترکیبی این امکان را می‌دهد تا بتوان قطعات را با هزینه‌ها و وزن کم تولید نمود. از لوح‌های ترکیبی به طور گسترده در صنایع خودروسازی استفاده می‌شود.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Abdolazimzadeh, S. Mazdak, E. Sharifi, Compare the analytical and experimental weld line movement in deep drawing process by one and two piece blank holder, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 18-25, 2015 (in Persian)

بدنه خودرو متشکل از چندین جزء کوچک است، که هر بخش به صورت جدا شکل داده شده و سپس با استفاده از فرایند جوشکاری به هم جوش داده می‌شوند که این روش دارای هزینه‌های تولید بالا و همچنین دقت ابعادی پایین است. نگرانی‌های زیست‌محیطی، تولیدکنندگان خودرو را با آیین‌نامه‌های کاهش وزن محصول و بهره‌وری سوخت برای پاسخگویی به تقاضاها مواجه کرده است. برای رفع این نیازها لوح‌های ترکیبی به صنعت خودرو معرفی شد [1].

قطعات خودرو که می‌توان توسط لوح‌های ترکیبی ساخت عبارت‌اند از: درون درب جلو، درب صندوق عقب و غیره [2].

مزایای استفاده از لوح‌های ترکیبی عبارت‌اند از:

- کاهش وزن محصول: به دلیل حذف قطعات تقویتی و ترکیب کردن قطعات [1].
- کاهش هزینه‌های تولید: از طریق کاهش تعداد کارکنان و همچنین کاهش تعداد قالب‌های تولیدی مورد نیاز و کاهش میزان ضایعات از طریق تولید یک مرحله‌ای محصول [1].
- بهبود ایمنی و استحکام قطعات: به دلیل استفاده از ورق‌های با استحکام یا ضخامت‌های بالا در مناطقی از قطعه که تحت ضربه قرار می‌گیرند.

در مقابل مزایای استفاده از لوح‌های ترکیبی برخی معایب نیز وجود دارد. جوش و منطقه متأثر از حرارت می‌تواند شکل‌پذیری لوح‌ها را با توجه به توسعه ساختار مارتنزیتی تحت تأثیر قرار دهد و همچنین جوشکاری ورق‌های مسطح یک گام اضافه در فرایند تولید است.

با توجه به اینکه در جوشکاری انرژی ورودی زیاد است باعث تغییر ساختار جوش و منطقه متأثر از حرارت شده و همچنین اختلاف شکل‌پذیری مواد باعث می‌شود که شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی کاهش یابد که در نتیجه این شکل‌پذیری کم لوح‌های ترکیبی است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. به دلیل اینکه مزایای لوح‌های ترکیبی نسبت به معایب آن‌ها بیشتر است لذا آن‌ها به‌طور گسترده در صنعت خودرو استفاده می‌شوند.

رسول صفدریان و همکارانش [3-4] کارایی مشتق دوم نازک شدگی، نرخ کرنش مؤثر، نرخ کرنش اصلی، نرخ کرنش ضخامت و شیب ضخامت برای پیش‌بینی نمودار حد کشش بر روی لوح‌های ترکیبی با ضخامت‌های متفاوت را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که گلویی شدن هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر نرخ کرنش مؤثر، نرخ کرنش اصلی و نرخ کرنش ضخامت حداکثر است و همچنین بر اساس معیار گرادیان ضخامت، گلویی شدن زمانی رخ می‌دهد که مقدار آن بزرگ‌تر از 0.78 باشد و بر اساس معیار مشتق دوم نازک شدگی گلویی شدن زمانی رخ می‌دهد که مقدار آن برای اولین بار در فرایند شکل‌دهی به اوج خود می‌رسد. همچنین آن‌ها نشان دادند که در بین این معیارها معیار مشتق دوم نازک شدگی از دقت خوبی برای پیش بینی حرکت خط جوش و حد شکل‌دهی برخوردار است. آن‌ها همچنین بیان کردند که ناهمسانگردی مواد اثر مهمی در رفتار شکل‌گیری لوح‌های ترکیبی دارد. همچنین آن‌ها اشاره کردند که مدل معیار حداکثر نیروی پانچ برای نمونه‌های بیشتر با عرض‌های مختلف بهترین دقت برای پیش بینی ارتفاع کشش دارد ولی برای پیش بینی حد کشش فاقد دقت و صحت است.

عباسی و همکارانش [5] یک روش تحلیلی جدید برای پیش‌بینی حرکت خط جوش در کشش عمیق لوح‌های ترکیبی مقطع گرد ارائه کردند. این روش تحلیلی ارائه شده می‌تواند اثر نسبت ضخامت را در هر دو مورد حرکت خط جوش و حد ارتفاع کشش در نظر بگیرید. آن‌ها بیان کردند که با افزایش عرض لوح‌های ترکیبی حرکت خط جوش به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش نسبت ضخامت توزیع کرنش غیریکنواخت شده و تغییر خط جوش به سمت ورق ضخیم‌تر است. با نزدیک شدن به مرکز جوش حرکت خط جوش افزایش می‌یابد.

پادمانابان و همکارانش [6] اثر ناهمسانگردی در کشش عمیق لوح‌های ترکیبی فولاد نرمه را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که نیروی پانچ مورد نیاز برای کشش عمیق لوح‌های ترکیبی ناهمسانگرد نسبت به همسانگرد افزایش می‌یابد. همچنین جریان مواد ناکافی در گوشه پایین فنجان باعث نازک شدگی می‌شود، علاوه بر آن نازک شدگی در امتداد خط جوش در ترکیب مواد ایزوتروپیک از ناهمسانگرد بیشتر است. مواد ضعیف تحت تغییر شکل‌های بزرگ قرارگرفته و از این رو، خط جوش به سمت مواد قوی‌تر در فنجان و به سمت مواد ضعیف در منطقه فلنج حرکت می‌کند.

شکیل و همکارانش [7] اثر نسبت ضخامت، نسبت استحکام و غیره بر حرکت خط جوش در لوح‌های ترکیبی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که حرکت خط جوش در لوح‌های ترکیبی همیشه به سمت فلز قوی‌تر رخ می‌دهد و همچنین، استحکام و ضخامت اثر قابل توجهی در حرکت خط جوش داشته، در حالی که جوش تأثیر زیادی بر حرکت خط جوش ندارد.

کامپاس و همکارانش [8] کشش عمق لوح‌های ترکیبی بدون ورق‌گیر را روی چهار ماده با خواص شکل‌پذیری متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که در کشش عمیق لوح‌های ترکیبی بدون ورق‌گیر پارگی فنجان همیشه در انتقال بین پایین فنجان و دیوار آن رخ می‌دهد.

یوهو چوی و همکارانش [9] حرکت خط جوش ورق‌های جوش داده شده با لیزر در طول فرایند کشش عمیق برای دو نوع شکل لوح، یعنی مربع و دایره، دارای سه مکان متفاوت خط جوش اولیه بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند با افزایش نسبت ضخامت و همچنین با کاهش سطح ورق ضخیم نسبت به ورق نازک حرکت خط جوش افزایش می‌یابد. همچنین لوح‌های دایره‌ای از مربعی برای طراحی لوح‌های ترکیبی بهتر است چون تغییر شکل و حرکت خط جوش در آن کمتر است.

ماموسی و همکارانش [10] یک رویکرد جدیدی برای تعیین نمودار حد کشش لوح‌های ترکیبی بر اساس گلویی شدن ارائه کردند. آن‌ها بیان کردند، در سه معیار مختلفی (مشتق دوم کرنش اصلی، مشتق دوم کرنش ضخامت، مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل) که برای تعیین حد کشش استفاده کردند، در هر سه معیار موقعیت گلویی شدن مشابه است.

در این مقاله اثر پارامترهای مختلف بر حرکت خط جوش در بخش‌های مختلف لوح‌های ترکیبی برای دو حالت ورق‌گیر یک‌تکه و دوتکه با هم مقایسه شده است. این پارامترها عبارت‌اند از: شعاع سنبه، موقعیت خط جوش و نیروی ورق‌گیر. برای این بررسی یک شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود انجام شده است. معیار ناهمسانگردی هیل 48 و مدل سخت شدن نمایی برای مدل‌سازی ورق‌های فلزی استفاده شده است. در ادامه برای صحت سنجی، قالب کشش عمیق ساخته شده است و مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حاصل از کشش عمیق لوح‌های ترکیبی با ضخامت‌های متفاوت و محل خط جوش متفاوت انجام شده است. برای ساخت لوح‌های ترکیبی از جوش آرگون استفاده شده است.

2- کار تجربی

2-1- خصوصیات مواد

خواص مکانیکی و پارامترهای ناهمسانگردی فولاد در جدول 1 نشان داده شده است. پارامترهایی مانند تنش تسلیم، تنش نهایی و توان و ضریب کار سختی با استفاده از آزمایش استاندارد ASTM-E8 با سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه تعیین می‌شود.

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد ST37

Table 1 Mechanical properties Steel ST37

پارامترهای ناهمسانگردی			n	K (Mpa)	ϑ	E (Gpa)	ضخامت ورق (mm)
1.089	-0.118	1.324	0.15	435.3	0.3	203	1
0.624	0.167	0.898	0.196	433.83	0.3	203	1.5
1.318	-0.215	0.771	0.191	412.11	0.3	203	2

2-2- ساخت لوح‌های ترکیبی

برای ساخت لوح‌های ترکیبی از ورق‌های با ضخامت‌های 1، 1.5 و 2 با موقعیت‌های متفاوت خط جوش استفاده شده است. برای اتصال ورق‌ها از فرایند جوشکاری آرگون استفاده شده است. کیفیت جوش تأثیر زیادی در شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی دارد. برای بررسی کیفیت خط جوش نمونه‌ای از لوح‌های ترکیبی با ترکیب ضخامت 1.5-1.5 مطابق استاندارد ASTM-E8 و شکل 1 ساخته شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی لوح‌های ترکیبی به دست آمده از آزمایش کشش ارائه شده است. پس از کشیده شدن نمونه توسط تست کشش پارگی در جوش رخ نداد که نشان دهنده کیفیت جوش است.

2-3- مجموعه قالب

سنبه و ماتریس مورد استفاده در این تحقیق در شکل 2 نشان داده شده است. شمای قالب مورد استفاده در این تحقیق در شکل 3 نشان داده شده است که متشکل از دو نیمه است که نیمه پایین شامل ماتریس و نیمه بالا شامل ورق‌گیر، سنبه، حلقه نگه دارنده، حلقه ثابت که حرکت آن توسط 4 فنر محدود شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی لوح‌های ترکیبی

Table 2 Mechanical properties tailor welded blank

Yield strength (Mpa)	n	K (Mpa)	ترکیب ضخامت
206.7	0.04	409.34	1.5×1.5 (mm)

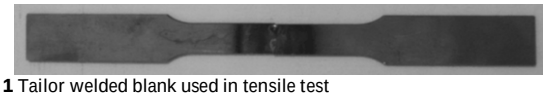

Fig. 1 Tailor welded blank used in tensile test

شکل 1 لوح ترکیبی مورد استفاده در آزمایش کشش

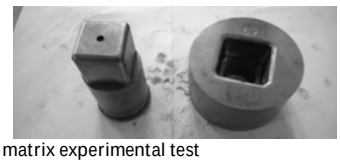

Fig. 2 Punch and matrix experimental test

شکل 2 سنبه و ماتریس آزمایش تجربی

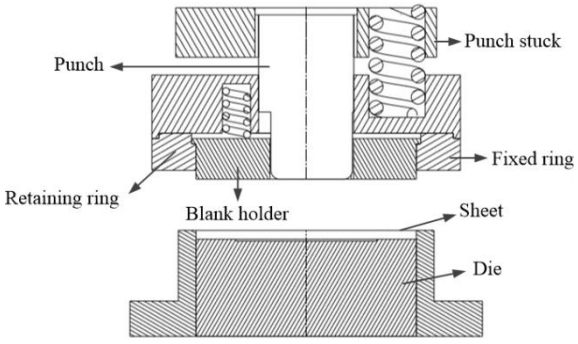

Fig. 3 Schematic of die

شکل 3 شماتیک قالب مورد استفاده

ورق‌گیر توسط 4 فنر که نیروی 2000 نیوتنی تأمین می‌کند برای نگه داشتن ورق روی ماتریس استفاده شده است. حلقه ثابت نیز توسط 4 فنر که نیروی 12000 نیوتونی تأمین می‌کند مهار شده است. پانچ مستطیلی شکل با سرعت ثابت به لوح‌های ترکیبی نزدیک شده و آن را تا عمق 12 میلی‌متر شکل می‌دهد. هندسه سنبه و ماتریس استفاده شده در آزمایش تجربی در شکل 4 نشان داده شده است.

2-4- روش اندازه‌گیری حرکت خط جوش

برای اندازه‌گیری حرکت خط جوش از تکنیک عکس برداری و نرم‌افزار اتوکد استفاده شده است.

روش کار بدین صورت است که کولیس را به اندازه معین باز کرده و در کنار قطعه قرار داده، سپس توسط دوربینی که در فاصله معین از قطعه قرار دارد عکس گرفته و عکس را در نرم‌افزار اتوکد وارد کرده، در آنجا با در نظر گرفتن اندازه واقعی کولیس و مقدار اندازه‌گیری شده یک ضریب تصحیح به دست آورده و با استفاده از این ضریب تصحیح مقدار جابجایی خط جوش به دست آمده است.

3- شبیه‌سازی شکل‌پذیری لوح‌های ترکیبی

بررسی عددی شکل‌دهی لوح‌های ترکیبی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده و شکل نهایی محصول به صورت یک فنجان مربعی به ابعاد 44.5 در 44.5 میلی‌متر در آمده و همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود مدل المان محدود از یک سنبه، ورق‌گیر، ورق و قالب تشکیل شده است. با توجه به اینکه منطقه جوش نسبت به سطح کل ورق کم می‌باشد، لذا از جوش و منطقه متأثر از حرارت در شبیه‌سازی صرف نظر شده است [11].

3-1- صحت مش‌بندی

ورق به صورت یک جسم تغییر شکل‌پذیر با استفاده از المان پوسته دارای چهار نقطه انتگرال (S4R) مدل شده و با توجه به اینکه فرایند کشش عمیق یک فرایند شبه استاتیک است لذا باید شرایط عدم وابستگی به مش بندی را ارضاء کند. عدم وابستگی به مش با در نظر گرفتن تغییرات انرژی داخلی بررسی می‌شود، همچنین جهت صحت شبیه‌سازی شبه استاتیک در تحلیل‌ها همواره انرژی جنبشی باید از 10 درصد انرژی کل کمتر باشد. در شکل 6 میزان تغییرات انرژی مدل بر اساس تعداد المان و زمان در نظر گرفته شده است و مش مورد نظر برای مدل سازی بر این اساس انتخاب می‌شود. نوع مش استفاده شده در قسمت‌های مختلف در جدول 3 ارائه شده و مقدار ضریب اصطکاک برای تمامی سطوح 0.1 در نظر گرفته شده است.

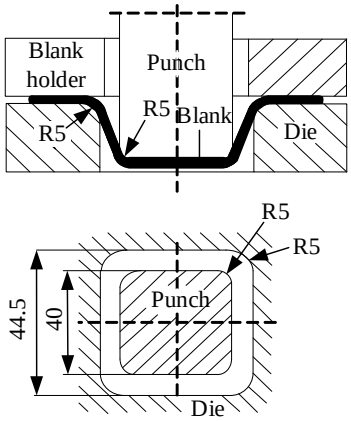

Fig. 4 Punch and die geometry used in the experiments, (mm)

شکل 4 هندسه سنبه و ماتریس استفاده شده در آزمایش تجربی

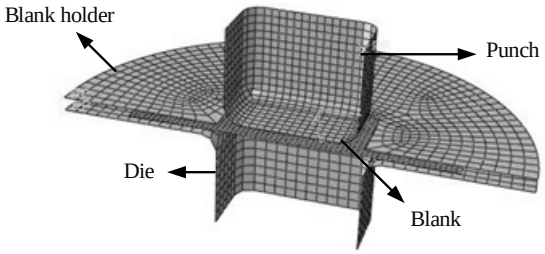

Fig. 5 Finite element model used in the simulation process

شکل 5 مدل المان محدود مورد استفاده در شبیه‌سازی فرایند

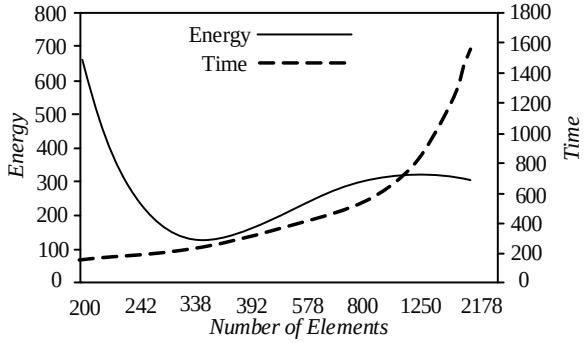

Fig. 6 Independent of the mesh

شکل 6 عدم وابستگی به مش

جدول 3 نوع المان در المان محدود

Table 3 Type element in finite element

اجزا	نوع	تعداد المان	نوع المان
سنبه	صلب	658	R3D4
ورق‌گیر	صلب	735	R3D4
قالب	صلب	1294	R3D4
ورق	صلب	2178	S4R

3-2- شرایط مرزی

شرایط مرزی لحاظ شده در شبیه‌سازی در شکل 7 نشان داده شده است که عبارت است از:

- ورق: چون در ورق تقارن وجود دارد لذا برای کاهش زمان محاسبات، تنها نیمی از ورق به صورت مستطیل 100-50 میلی‌متر شبیه‌سازی شده و این نیم مربع از لوح‌های ترکیبی به دو بخش با ضخامت‌های مختلف تقسیم شده و برای جلوگیری از حرکت ورق در طی فرایند شکل‌دهی لبه‌ها با قید تقارن مقید شده است.
- ورق‌گیر: ورق‌گیر یک حرکت به اندازه‌ای داده می‌شود تا در طی فرایند از جدا شدن ورق در اثر نفوذ سنبه به داخل ورق جلوگیری کند.
- سنبه: به سنبه فقط یک حرکت به اندازه 12 میلی‌متر داده شده تا با نفوذ سنبه به داخل قالب ورق شکل سنبه را به خود بگیرد.
- قالب: به صورت کاملاً صلب و بدون هیچ حرکتی مدل شده است.

4- طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و از روش پاسخ سطح برای طراحی آزمایش استفاده شده است.

4-1- پارامترهای ورودی

در این روش، پارامترهای ورودی پارامترهای تأثیرگذار و قابل تغیر در فرایند هستند که یک دسته از این پارامترها در آزمایش عملی بکار برده شده است. با مشخص شدن این پارامترها و بازه تغییرات آن‌ها، یک سری شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای ورودی، توسط نرم‌افزار طراحی می‌شود. پارامترهای ورودی تأثیرگذار در فرایند و محدوده تغییرات آن‌ها برای ورق‌گیر یک‌تکه و دوتکه به ترتیب در جدول‌های 4 و 5 نشان داده شده است.

4-2- پارامترهای خروجی

آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت شامل 38 مرحله است. پارامترهای خروجی عبارت‌اند از: بیشینه تنش، بیشینه کرنش، بیشینه نازک شدگی ورق 1، بیشینه نازک شدگی ورق 2، بیشینه جابجایی خط جوش در کف فنجان، بیشینه جابجایی خط جوش در دیواره فنجان و بیشینه جابجایی خط جوش در فلنج فنجان.

در مورد خروجی بیشینه نازک شدگی دو مسیر یکی در راستای قطری و دیگری در راستای مرکز ترسیم شده که در شکل 8 نشان داده شده است.

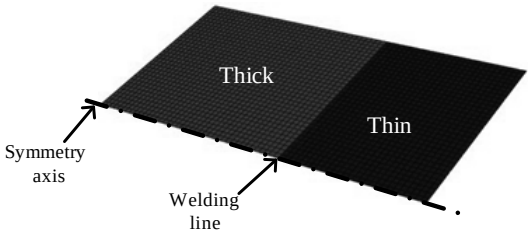

Fig. 7 Boundary conditions

شکل 7 شرایط مرزی

جدول 4 محدوده تغییرات پارامترهای ورودی

Table 4 Internal parameter changes limit

نام	واحد	حد پایین	حد وسط	حد بالا
ضخامت ورق 1	mm	1	1.5	2
ضخامت ورق 2	mm	1	1.5	2
محل خط جوش	mm	-10	0	10
شعاع قالب	mm	4	5	6
شعاع سنبه	mm	4	5	6
نیروی ورق‌گیر	N	2700	3400	3950

جدول 5 محدوده تغییرات پارامترهای ورودی

Table 5 Internal parameter changes limit

نام	واحد	حد پایین	حد وسط	حد بالا
ترکیب ضخامت	mm	1-2	1-1.5	1.5-2
محل خط جوش	mm	-10	0	10
شعاع قالب	mm	4	5	6
شعاع سنبه	mm	4	5	6
نیروی ورق‌گیر1	N	2700	3400	3950
نیروی ورق‌گیر2	N	2700	3400	3950

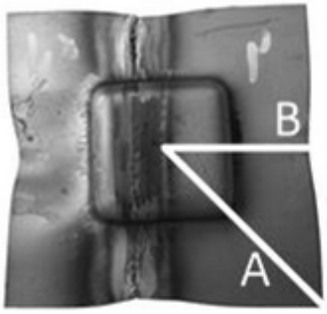

Fig. 8 Measuring stretch of thinning

شکل 8 راستاهای اندازه‌گیری نازک شدگی

5- نتایج و بحث

5-1- صحت سنجی

شکل 9 نتایج تجربی و شبیه‌سازی نازک شدگی برای دو ترکیب ضخامت 1 در 2 و 1.5 در 2 میلی‌متر با موقعیت خط جوش 10- میلی‌متر از مرکز فنجان در دو راستای 0 و 45 درجه از مرکز فنجان را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است بیشینه نازک شدگی مربوط به گوشه‌های سنبه و مسیر مورب است. بیشترین مقدار نازک شدگی در هر بخش نمونه 1 در 2 میلی‌متر برابر با در بخش نازک 22 و در بخش ضخیم 33 درصد مقدار ضخامت است.

جدول 6 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای بیشینه حرکت خط جوش ارائه شده؛ که ملاحظه می‌شود اختلاف کمی بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد که علت این اختلاف ساده‌سازی شرایط شبیه‌سازی و همچنین خطای اندازه‌گیری تجربی است.

شکل‌های 10 و 11 نتایج شبیه‌سازی و تجربی حرکت خط جوش در فنجان پس از کشیده شدن برای دو حالت ورق‌گیر یک‌تکه و دوتکه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در کف و دیواره فنجان خط جوش به سمت ورق ضخیم منحرف می‌شود ولی در فلنج چون ورق ضخیم بیشتری در فلنج نسبت به ورق نازک باقی مانده است لذا خط جوش به سمت ورق نازک منحرف می‌شود؛ که در هر دو مورد تجربی و شبیه‌سازی این نتیجه صدق می‌کند.

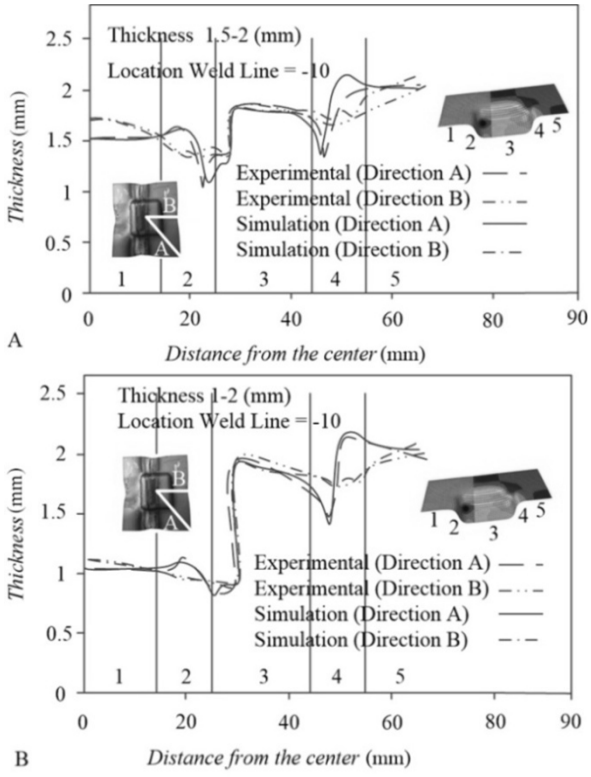

Fig. 9 Experimental results and simulation thinning in thickness combination of A) 1.5-2 B) 1-2 (mm)

شکل 9 نتایج تجربی و شبیه‌سازی نازک شدگی در ترکیب ضخامت A) 1.5-2 B) 1-2 میلی‌متر

جدول 6 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای بیشینه حرکت خط جوش

Table 6 compares the experimental and simulations results to maximize the weld line movement

ترکیب ضخامت	موقعیت خط جوش	مقدار عددی	مقدار تجربی	خطا
1.5-2	-10	0.23	0.253	10%
1.5-2	0	1.048	1.2052	13%
1.5-2	10	1.5	1.725	15%

در شکل 11 بیشترین حرکت خط جوش مربوط به موقعیت خط جوش 10+ است؛ با مقایسه شکل‌های 9 و 10 ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن ورق‌گیر دوتکه حرکت خط جوش و همچنین مقدار چین خوردگی ورق نازک از حالت یک‌تکه کمتر است.

5-2- تأثیر پارامترها بر حرکت خط جوش

جابجایی خط جوش را می‌توان بر اساس ماهیت تنش در ورق توجیه کرد. عامل مؤثر در جابجایی خط جوش مؤلفه‌های تنش است که عمود بر خط جوش اعمال می‌شود و در شکل 12 نشان داده می‌شود.

5-2-1- شعاع سنبه

با افزایش شعاع سنبه میزان کرنش بیشینه کاهش می‌یابد، علت آن این است که هر چه گوشه‌ها بزرگ‌تر می‌شود میزان خمیدگی ورق در گوشه‌ها کاهش می‌یابد، جریان مواد آسان‌تر صورت می‌پذیرد و کشیدگی ورق در این ناحیه کمتر است که باعث کاهش مقاومت مواد در برابر تغییر شکل می‌شود. در نتیجه حرکت خط جوش کاهش می‌یابد.

ورق ضخیم‌تر سخت‌تر تغییر شکل می‌دهد، ورق نازک راحت‌تر به همین دلیل تغییر شکل بیشتر مربوط به ورق نازک‌تر است، در نتیجه خط جوش به سمت ورق ضخیم‌تر حرکت می‌کند.

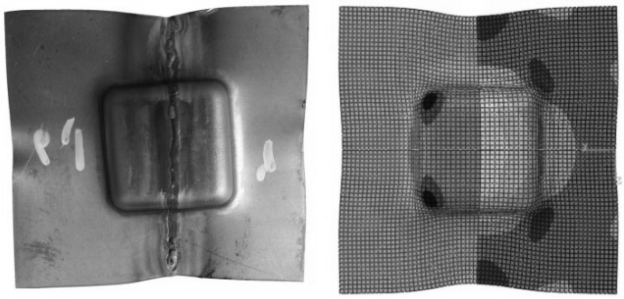

Fig. 10 Simulation and experimental results of weld-line movement for the one piece blank holder

شکل 10 نتایج شبیه‌سازی و تجربی حرکت خط جوش برای حالت ورق‌گیر دوتکه

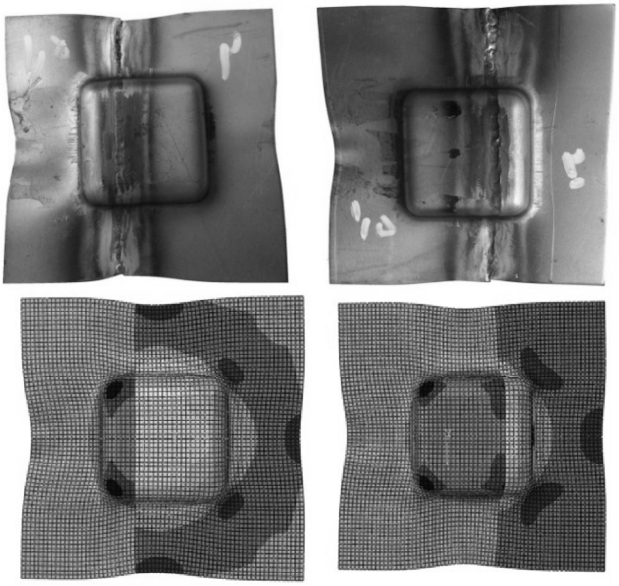

Fig. 11 Simulation and experimental results of weld-line movement for the two piece blank holder

شکل 11 نتایج شبیه‌سازی و تجربی حرکت خط جوش برای حالت ورق‌گیر یک‌تکه

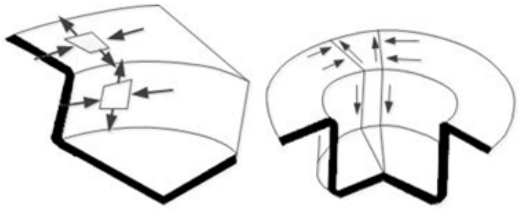

Fig. 12 Tension (radial) and pressure (tangential) force

شکل 12 نیروی کشش (شعاعی) و فشاری (مماسی)

به دلیل اینکه تنش‌های کششی در طول خط جوش در مرکز از دیواره بیشتر است، پس میزان حرکت خط جوش از دیواره‌ها به سمت مرکز ورق افزایش می‌یابد و در ناحیه فلنج چون تنش از نوع فشاری است لذا خط جوش به سمت ماده نازک‌تر حرکت می‌کند. صحت این موضوع را می‌توان در شکل 13 ملاحظه نمود.

همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود در صورتی که ورق‌گیر یک‌تکه باشد بیشینه حرکت خط در سه منطقه مرکز، دیواره و فلنج فنجان پس از کشیده شدن به ترتیب 12، 11 و 24 درصد کاهش می‌یابد و درصورتی که ورق‌گیر دوتکه باشد این بیشینه جابجایی در این سه منطقه به ترتیب 3، 14.5 و 24 درصد کاهش می‌یابد؛ که نشان می‌دهد در صورتی که ورق‌گیر یک‌تکه باشد با افزایش 50 درصدی شعاع سنبه جابجایی خط جوش در مرکز فنجان 9 درصد از حالت دوتکه به سمت ورق ضخیم‌تر کمتر است.

5-2-2- موقعیت خط جوش

شکل 14 اثر محل خط جوش بر جابجایی آن را نشان می‌دهد. با تغییر محل خط جوش به سمت ورق ضخیم چون سطح درگیری ورق ضخیم با قالب و ورق‌گیر کم می‌شود در نتیجه حرکت خط جوش افزایش می‌یابد.

همان‌طور که از شکل 14 مشخص است با افزایش خط جوش از 10- به 10 مقدار حرکت خط جوش به سمت ورق ضخیم افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که در صورتی که ورق‌گیر یک‌تکه باشد با این افزایش موقعیت خط جوش، جابجایی خط جوش در سه منطقه مرکز، دیواره و فلنج پس از کشیده شدن به ترتیب از 0.0326 به 2.6، 0.4012 به 2.174 و 0.9429 به 0.3954- رسیده است و برای حالت دوتکه به ترتیب از0.042 به 2.58، 0.4 به 2.135 و 0.95 به 0.377- رسیده است؛ که ملاحظه می‌شود با این افزایش موقعیت خط جوش مقدار جابجایی خط جوش 27 درصد کمتر از دوتکه به سمت ورق ضخیم است.

5-2-3- نیروی ورق‌گیر

با توجه به اینکه افزایش نیروی ورق‌گیر از نفوذ ورق ضخیم به داخل حفره قالب به دلیل افزایش اصطکاک بین ورق با اجزای قالب جلوگیری می‌کند لذا این افزایش اصطکاک باعث می‌شود جریان مواد به داخل حفره کاهش یابد در نتیجه با افزایش نیروی ورق‌گیر حرکت خط جوش افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل 15 که مربوط به انجام شبیه‌سازی در مورد ترکیب ضخامت 1-2 میلی‌متر است ملاحظه می‌شود با افزایش نیروی ورق‌گیر خط جوش به سمت ورق ماده ضخیم‌تر بیشتر منحرف می‌شود. با افزایش 46 درصدی در نیروی ورق‌گیر برای حالت یک‌تکه، حرکت خط جوش پس از کشیده شدن در کف فنجان 1.5 درصد و در دیواره‌های فنجان 11 درصد و در فلنج 43 درصد به سمت ورق ضخیم افزایش یافته است. برای حالت دوتکه با افزایش 46 درصدی در نیروی ورق‌گیر 1 و 2، حرکت خط جوش پس از کشیده شدن در کف فنجان به ترتیب 5 و 41 درصد و در دیواره‌های فنجان 3 و 53 درصد و در فلنج 32 و 82 درصد به سمت ورق ضخیم افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که در حالت دوتکه با افزایش نیروی ورق‌گیر در بخش نازک نسبت به ضخیم باعث می‌شود خط جوش در محور تقارن باقی بماند.

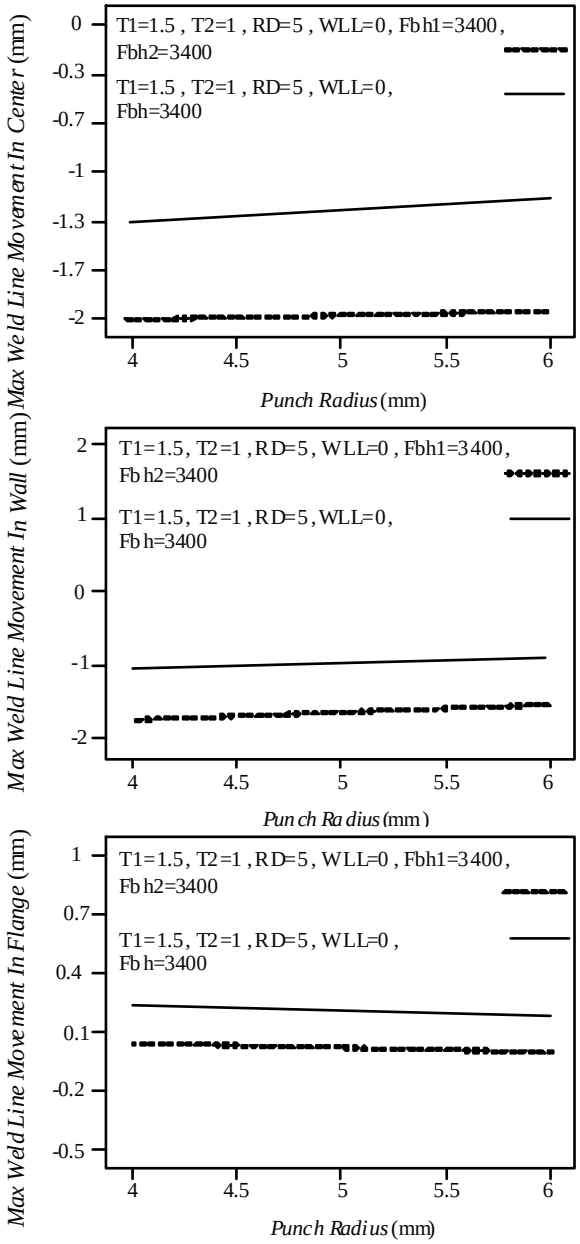

Fig. 13 The effect of punch radius, on weld line movement

شکل 13 اثر شعاع سنبه بر حرکت خط جوش

6- روابط آماری عددی

برای طراحی مراحل شبیه‌سازی عددی برای پیش بینی حرکت خط جوش لوح‌های ترکیبی برای حالت ورق‌گیر دوتکه به صورت زیر است:

$$R_1 = 0.19 - 2.166t_1 + 1.29t_2 + 0.125WLL - 0.011R_D + 0.03R_P - 2.2e^{-5}Fbh_1 + 5.29e^{-4}Fbh_2 \quad (1)$$

$$R_2 = 0.226 - 1.226t_1 + 0.897t_2 + 0.086WLL + 0.031R_D - 0.072R_P + 5.91e^{-6}Fbh_1 + 3.825e^{-4}Fbh_2 \quad (2)$$

$$R_3 = -1.725 + 0.57t_1 + 0.088t_2 - 0.068WLL - 0.012R_D + 0.032R_P - 1.996e^{-5}Fbh_1 + 2.754e^{-4}Fbh_2 \quad (3)$$

که در آن R_1، R_2 و R_3خروجی‌های نرم‌افزار که به ترتیب بیشینه جابجایی خط جوش در کف فنجان، دیواره و فلنج است و t_1، t_2، WLL، R_D، R_P، Fbh_1

و Fbh_2 ورودی‌های نرم‌افزار که به ترتیب عبارت‌اند از: ضخامت ورق 1، ضخامت ورق 2، موقعیت خط جوش، شعاع قالب، شعاع سنبه و نیروی ورق‌گیر 1 و نیروی ورق‌گیر 2 است.

جدول 7 مقایسه بین نتایج حاصل از کار عملی و تحلیل برای بیشینه حرکت خط جوش را نشان داده شده است.

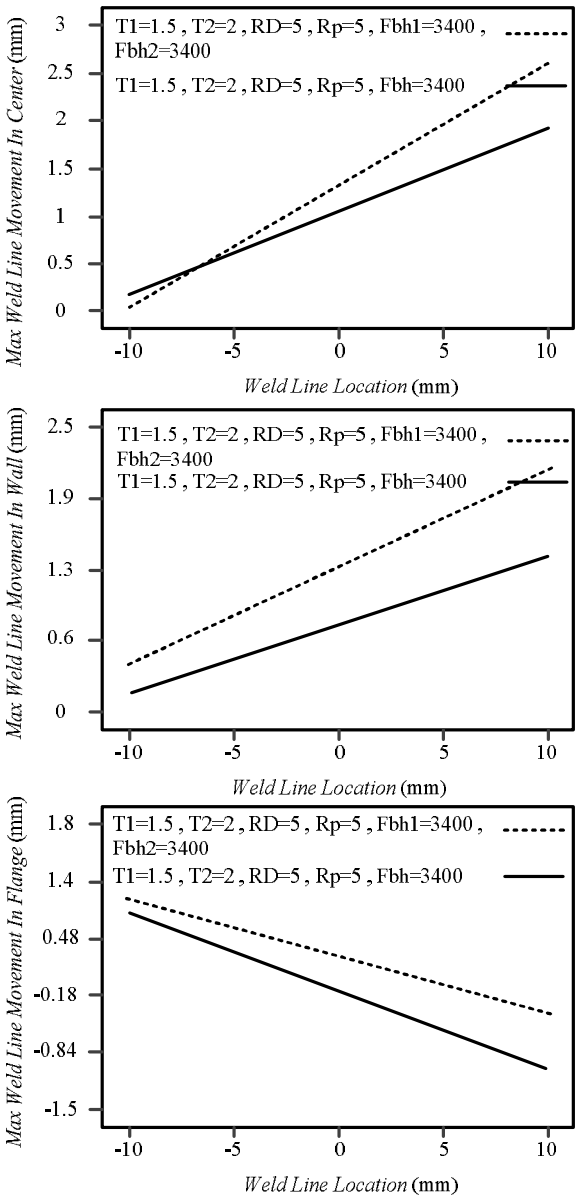

Fig. 14 The effect of weld line location, on its movement

شکل 14 اثر موقعیت خط جوش بر حرکت خط جوش

جدول 7 بررسی درستی روابط حرکت خط جوش ترکیب ضخامت 2-1

Table 7 Considering the correctness of relations, for weld line movement in thickness of 1-2 mm

درصد خطا	مقدار تحلیلی	مقدار عملی	نیروی ورق‌گیر2 (N)	نیروی ورق‌گیر1 (N)	شعاع سنبه و قالب (mm)	موقعیت خط جوش (mm)	بخش
13	2.423	2.14	3400	3400	5	0	کف
12	2.013	1.79	3400	3400	5	0	دیواره
10	-0.0096	-0.1212	3400	3400	5	0	فلنج

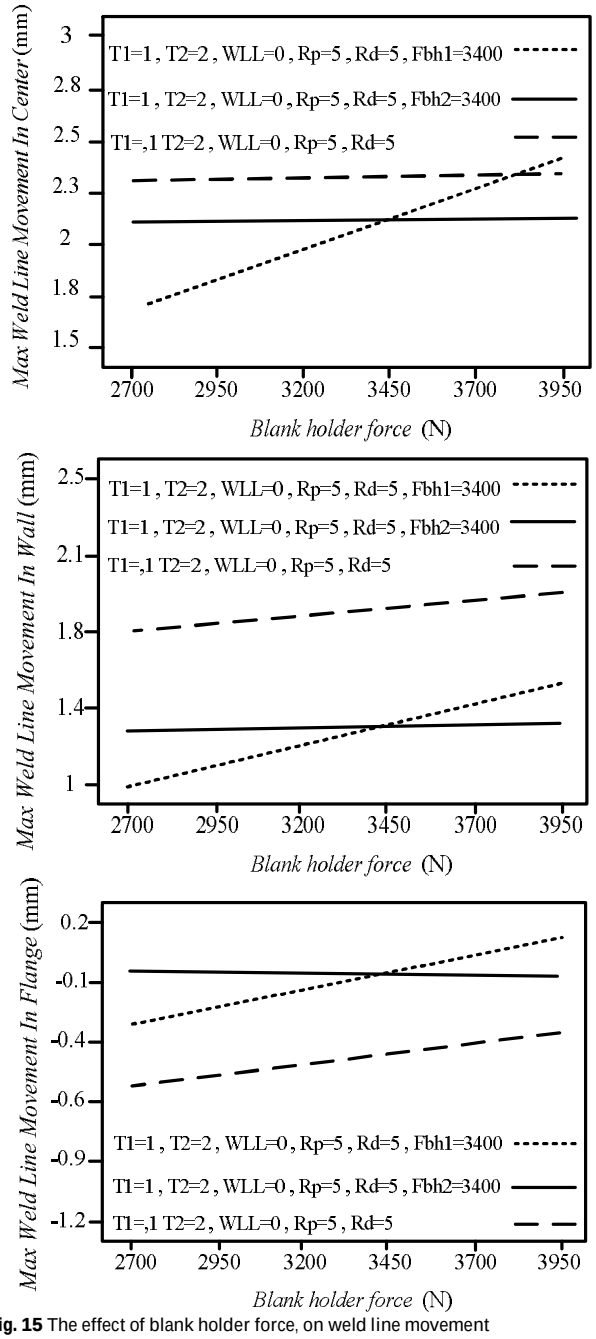

Fig. 15 The effect of blank holder force, on weld line movement

شکل 15 اثر نیروی ورق‌گیر بر حرکت خط جوش

7- جمع‌بندی

در این مطالعه، لوح‌های ترکیبی با ضخامت‌های متفاوت از ورق ST37 که با استفاده از فرایند جوشکاری آرگون ساخته شده است، در فرایند کشش عمیق از سنبه 40×40 میلی‌متر استفاده شد.

همچنین، شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده نرم‌افزار آباکوس انجام شده و از روش پاسخ سطح برای طراحی شبیه‌سازی استفاده شده است. مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی نشان می‌دهد که مدل توسعه داده شده قابلیت خوبی در پیش بینی حرکت خط جوش و نازک شدگی لوح‌های ترکیبی دارد. موارد زیر را به‌عنوان نتیجه از این تحقیق گرفته شده است.

- افزایش شعاع سنبه از 4 به 6 میلی‌متر باعث می‌شود جابجایی خط جوش در مرکز فنجان وقتی ورق‌گیر یک‌تکه است 9 درصد از حالت دوتکه به سمت

ورق ضخیم‌تر کمتر شود.

- با افزایش موقعیت خط جوش از 10- به 10 مقدار جابجایی خط جوش برای حالت ورق‌گیر یک‌تکه 27 درصد کمتر از دوتکه به سمت ورق ضخیم است.
- در حالت دوتکه با افزایش نیروی ورق‌گیر در بخش نازک نسبت به ضخیم باعث می‌شود خط جوش در محور تقارن باقی بماند.
- روابطی آماری-عددی برای پیش‌بینی حرکت خط جوش پیشنهاد شد.

8- فهرست علایم

E	ضریب الاستیسیته (Gpa)
Fbh	نیروی ورق‌گیر (N)
Gpa	گیگا پاسکال
k	ضریب کار سختی (Mpa)
Mpa	مگا پاسکال
n	توان کار سختی
R_D	شعاع قالب (mm)
R_P	شعاع سنبه (mm)
T	ضخامت (mm)
WLL	موقعیت خط جوش (mm)

علائم یونانی

ϑ	ضریب پواسون

9- مراجع

[1] T. Meindersa, A. van den Bergb, J. Hueatinka, Deep drawing simulations of Tailored Blanksand experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 103, pp 65-73, 2000.

[2] M. Abbasi, B. Bagheri, M. Ketabchi, D.F Haghshenas, Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank Computational Materials Science, Vol. 53, pp. 368-376, 2012.

[3] R. Safdarian, H. Moslemi, G. Liaghat, Forming Limit Diagram Prediction of Tailor-Welded Blank Using Experimental and Numerical Methods, *Journal of Materials Engineering and Performance,* Vol. 21, pp. 2053-2061, 2012.

[4] R. Safdarian, R. M. Natal, A. D. Santos, M. P. L. Parent, A comparative study of forming limit diagram prediction of tailor welded blanks, *International Journal of Material Forming,* Vol. 8, pp. 293-304, 2014.

[5] M. Abbasi, S. R. Hamzeloo, M. Ketabchi, M.A. Shafaat, B. Bagheri Analytical method for prediction of weld line movement during stretch forming of tailor-welded blanks, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, pp. 999-1009, 2014.

[6] R. Padmanabhan, A. J. Baptista, M. C. Oliveira, L. F. Menezes, Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, pp. 288-293, 2007.

[7] S. A. Kagzi, S. Patil, H. K. Raval, Factors Affecting Weld Line Movement in Tailor Welded Blank, *International Journal of Mechanical, Aerospace,* Vol. 8, No. 6, 2014.

[8] Z. Kampus, T. Pepelnjak, J. Tusek, Deep drawing without a blankholder and ironing of tailored blanks, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 133, pp. 128-133, 2003.

[9] Y. Choia, Y. Heob, H. Kimc, D. Seod, Investigations of weld-line movements for the deepdrawing process of tailor welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 108, pp. 1-7, 2000.

[10] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad,, A Novel Approach to the Determination of Forming Limit Diagrams for Tailor-Welded Blank, *Journal of Materials Engineering and Performance,* Vol. 22, pp. 3210-3221, 2013.

[11] M. A. Ahmetoglu, D. Brouwers, L. Shulkin, G. L. Kinzel, T. Altan, Deep drawing of round cups from tailor-welded blanks,, Journal of Material Processing Technology, Vol. 53, pp. 684-694, 1995.