ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

مهندسی مکانیک مدر س

مطالعه پنجره فرایند در کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجانی مربعی با ورق دولایه آلومينيوم-فولاد

 4 سىدەجەدجىيىن سىدكاشى $^{1^*}$ ، فرزاد رجەنى 2 ، جىيىن امىرآبادى 8 ، مجەد جىيىن يون گللو

1 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشيار، مهندسی مکانيک، دانشگاه بيرجند، بيرجند

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* بيرجند، صندوق پستى 97175/376، seyedkashi@birjand.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی محفظهای از سیال جایگزین ماتریس شده است و شکل نهایی قطعه براساس شکل سنبهی صلب تعیین میگردد. جهت جلوگیری از بروز پارگی و چینخوردگی در قطعه لازم است فشار سیال در حین فرایند در محدودهی کاری مجاز تغییر نماید. منحنی ناحیه کاری نشاندهنده محدوده حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون ایجاد پارگی در ورق، تحت بیشترین فشار محفظهای میباشد.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 17 مرداد 1395 پذیرش: 14 مهر 1395 انه در سایت: 16 آبان: 1395
در این مقاله کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجانیهای با مقطع مربعی از جنس ورق دولایه آلومینیوم-فولاد به دلیل بالا بردن نسبت کشش آلومینیوم به صورت ورق دولایه ترکیبی با فولاد، با استفاده از آزمایش های تجربی و شبیه سازی های اجزای محدود بررسی شده است. به منظور تشخیص شروع پارگی در شبیه سازی از نمودار حد شکل دهی که به روش تجربی برای ورق دولایه آلومینیوم/ فولاد بدست آمد، استفاده شد. از آزمایش های تجربی به منظور مقایسه و تایید صحت مدل اجزای محدود استفاده گردید. تأثیر پارامترهای فرایند مانند ضخامت لایه های مختلف ورق، فشار پیش بالج، فشار محفظه ای و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه ی کاری و پنجره فرایند بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می دهد که برای هر فشار پیش بالج، فشار محفظه ای و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه ی کاری و پنجره فرایند بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می دهد فرق، فنانر پیش بالج، فشار محفظه ای و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه ی کاری و پنجره فرایند بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می دهد ورق، فنانر پیش بالج، فشار محفظه ای و ضریب اصطکاک بر روی ناحیه ی کاری و پنجره فرایند بررسی گردیده است. نتایج عددی نشان می دهد ورق، فنانر پیش بالج یک مقدار بهینه برای نسبت کشش مشخص وجود دارد. همچنین با افزایش فشار محفظه ای، چروکیدگی در ناحیه فلانج کاهش می ابد. با افزایش اصطکاک بین ورق و قالب یا ورق و ورق گیر ناحیه کاری کوچکتر شده، در حالی که با افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه ناحیه کاری بزرگتر می شود. برای ارزیابی نتایج عددی برای نسبت کشش های متفاوت آزمایش های تجربی انجام شد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده گردید.	کلید <i>واژگان:</i> ورق دولایه کشش عمیق هیدرومکانیکی پنجره فرایند نمودار حد شکلدهی فنجانی مربعی

Study of Process Window in Square Cup Hydromechanical Deep Drawing of **Aluminium/Steel Double Layer Sheet**

Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi^{1*}, Farzad Rahmani¹, Hossein Amirabadi¹,

Mohammad Hoseinpour Gollo²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Layer Sheet, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 277-283, 2016 (in Persian)

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 07 August 2016 Accepted 05 October 2016 Available Online 06 November 2016

Keywords: Double Layer Sheet Hydromechanical Deep Drawing Process Window Diagram Forming Limit Diagram Square Cup

ABSTRACT

In hydromechanical deep drawing process, the traditional matrix is replaced by pressurized fluid, and the final shape is determined based on the shape of a rigid punch. It is necessary to change the fluid pressure within the allowed working zone during the process to prevent the workpiece from rupturing and wrinkling. Working zone curve represents the range of maximum available drawing ratios without rupture under the highest chamber pressure. In this paper, hydromechanical deep drawing of square cups made of aluminum-steel double layer sheets are studied by experiments and finite element simulations. In order to detect the rupture onset in simulations, experimental forming limit diagrams were obtained using aluminum/steel double layer sheet. Experimental data were used to validate the finite element model. The effects of process parameters such as thickness of the various layers, prebulge pressure, chamber pressure and the friction coefficient were investigated on the working zone and the process window. The numerical results show that an optimum amount for the drawing ratio exists for each prebulge pressure. Also, with increasing the chamber pressure, shrinkage is reduced on the flange area. By increasing the friction between the sheet and matrix or the sheet and blank-holder, working zone becomes smaller; while with increasing the friction between the sheet and the punch it becomes larger. Experiments were performed for different drawing ratios to evaluate the numerical results and good agreement was observed.

Please cite this article using:

1- مقدمه

امروزه صنايع مرتبط با فرايندهاي شكل دهي ورق هاي فلزى به سمت ايجاد محصولاتی کم وزن و دارای خواص ترکیبی پیش میروند. در این میان در سالهای اخیر استفاده از ورقهای چند لایه فلزی و بطور خاص ورقهای دولایه فلزی متشکل از دولایه ورق با جنسهای مختلف در صنایعی همچون خودروسازی، هوایی، الکتریکی، شیمیایی و غذایی توسعه یافته است [1-3]. كاربرد عمده این ورق ها می تواند به دو دلیل عمده باشد: 1) بهبود شكل پذیری ورق های سبک وزن و با شکل پذیری پایین، 2) ایجاد خواص ترکیبی در سازه همچون مقاومت الکتریکی، مقاومت در برابر خوردگی، نسبت استحكام به وزن بالا و غيره.

ملایی و همکاران [4] شکل پذیری ورق های دولایه فلزی با مدل سازی المان محدود را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با روشهای تئوری و تجربی مقایسه کردند. از مهمترین نتایجشان میتوان به این اشاره کرد که استفاده از روش تئوری راهی مناسب برای دست یابی به منحنی حد شکلدهی این ورقها می باشد. کدخدایان و همکاران [5] نیز به اصلاح هندسه قالب در فرآیند خمش U شکل ورق دولایه فلزی با هدف جبرانسازی پدیده بازگشت فنری پرداختند.

ژانگ و همکاران [6-8] در پژوهشهای جداگانهای ساخت قطعات استوانهای، جعبههای مخروطی با مقطع چهار ضلعی و قطعات سهمی گون را با روش کشش عمیق هیدرومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. جنسن و همکاران [9] با حل معادلهی رینولدز به روش تفاضل محدود برای جریان سیال بین ورق و ماتریس در عملیات کشش عمیق هیدرومکانیکی، از این مدل به عنوان الگوریتم تماسی در شبیه سازی فرایند به روش اجزای محدود استفاده نمودند. رحمنی و همکاران [10] تاثیر پارامترهای موثر بر کشش عمیق قطعات مربعی را مورد بررسی قرار داده و با نتایج تجربی مقایسه کردند.

هدف از این مقاله بررسی ناحیه شکلدهی امن در کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق های دولایه و دستیابی به یک پنجره فرایند مناسب برای توليد نمونه بدون عيب براى قطعات مربعى مى باشد. اين نوع كشش عميق به دلیل خاص بودن شکل سنبه دارای پیچیدگی های خاص در انتخاب شکل لوح اوليه است. با استفاده از نتايج اين تحقيق مهندسان طراح در صنعت، بسادگی می توانند محدوده کاری ایمن را برای تولید این محصول استخراج نمايند.

2- مدل سازی

برای شبیهسازی عددی، فرآیند در نرم افزار تحلیلی آباکوس² مدل شده است و مدل ساخته شده در آباکوس/صریح³ مورد استفاده قرار گرفت. در شبیه سازی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده شده است. تغییرات فشار در مراحل پیشبالج و شکلدهی به صورت خطی میباشد.

لوح به صورت جسم شکل پذیر و سهبعدی در نظر گرفته شده و با وجود اينكه لوح اوليه معمولا كاملا يكنواخت و بدون عيب نيست، از تنش باقيمانده صرفنظر شده است. با استفاده از رابطه (1) می توان نسبت کشش را برای قطعات غیر گرد بهدست آورد [11]. همچنین ارتفاع کشش نیز با استفاده از رابطه (2) قابل محاسبه میباشد.

$$\beta_{\rm eq}^2 = \frac{A_0}{A_{\rm m}} \tag{1}$$

1 Blank ² Abaqus ³ Abaquse\Explicit

که در آن A_{m} مساحت لوح تغییر شکل نیافته و A_{m} مساحت متوسط سنبه و حفره قالب است. با ثابت در نظر گرفتن حجم، عمق هر قطعه توسط رابطه (2) محاسبه می شود:

$$h = \frac{A_0 - A_m - A_f}{C_m} \tag{2}$$

که A_f مساحت فلنج باقی مانده در انتهای فرایند و C_m محیط متوسط سطح مقطع سنبه و حفره قالب می باشد.

برای بهدست آوردن هندسه ورق اولیه در سطوح مقطعهای مربعی که درشکل 1 نشان داده شدهاند، باید ابعاد دقیق لوح مورد نظر را در یک ضریب Z که درشکل 2 نشان داده شده، وارد نمود. ضریب Z با استفاده از رابطه نسبت کشش طبق روابط (3) الی (5) قابل محاسبه است. L_1 و L_2 طول و عرض سنبه مورد نظر و R شعاع سرسنبه مورد نظر می باشد.

$$\beta_{eq}^{2} = \frac{A_{0}}{A_{m}} \rightarrow A_{0} = L_{1}L_{2} + 2L_{1}Z + 2L_{2}Z$$

$$+ 1.50015Z^{2}$$
(3)



شكل 1 ابعاد سنبه [10]





شكل 2 هندسه لوح اوليه [10]



Fig. 4 Chamber pressure during the forming process شکل 4 تغییرات فشار محفظه ای در طول زمان فرایند

کشش متفاوت برای ورق دولایه	کشش برای نسبتهای	جدول 1 ابعاد لوح و ارتفاع
		آلومينيوم - فولاد

 Table 1 Blank dimension and drawing depth for different drawing ratios

Tutios		
(mm) Z	ارتفاع کشش (mm)	نسبت کشش
13.522	12.168	1.75
17.168	19.662	2
19.348	21.22	2.1
22.246	29.07	2.25
25.412	32.22	2.4
27.632	36.52	2.5

خوردهاند، از آزمون استاندارد لایه کنی استفاده گردید. برای انجام این آزمون، ورق ها با اندازه مشخص بریده شده و انتهای ورق دولایه اندکی از یکدیگر جدا می شوند و لبههای ورقها را برگردانده و به فک دستگاه کشش بسته می شود.

برای معرفی جنس ورق ها به نرمافزار باید نمودار تنش -کرنش حقیقی هر یک از ورق ها موجود باشد. بنابراین باید پس از اینکه ورق دولایه با استفاده از فرایند نورد ساخته و آماده شد، دو لایه با استفاده از آزمون لایه کنی از یکدیگر جدا شده و سپس نمونه آزمون کشش به صورت استاندارد برای هر لایه تهیه شود. زمانی که ورق با فرایند نورد تولید شود، تمامی قسمتهای ورق در راستای نورد دارای استحکام کششی یکسان می شود و به راحتی از انتهای ورق می توان برای آزمون کشش سرد استفاده نمود. نمونههای آزمون کشش سرد در شکل 5 مشاهده می شود. منحنی تنش کرنش حاصل از کشش برای هر کدام از جنسها جداگانه به نرمافزار وارد گردیده است.



شکل 5 نمونه های آزمون کشش

Fig. 5 Tensile test specimens

 $A_{\rm m} = L_1 L_2 - (4R^2 - \pi R^2)$ $L_1 L_2 + 2L_1 Z + 2L_2 Z + 1.50015 Z^2$ (4)

$$\beta_{eq}^{2} = \frac{L_{1}L_{2} + L_{1}L + L_{2}L + L_{2}L + L_{3}D + L_{3}L}{L_{1}L_{2} - (4R^{2} - \pi R^{2})}$$
(5)

در نهایت با قرار دادن نسبت کشش مورد نظر در رابطه فوق می توان ضریب Z را به راحتی محاسبه کرد و لوح مورد نظر را طراحی نمود. ضریب Zو ارتفاع کشش مربوط به نسبت کششهای متفاوت برای قطعه مربعی با ابعاد30 mm در جدول 1 آمده است.

برای مقاطع مربعی، لوح هشت ضلعی با ضخامت اولیه 1 میلیمتر با استفاده از المانهای پوستهای S4R مدل شده است. کل لوح شامل 3621 گره و 3500 المان میباشد. مدل شبیه سازی شده در شکل 3 نشان داده شده است.

قالب، سنبه و ورق گیر به صورت صلب مدل شدهاند. ضریب اصطکاک بین ورق و ورق گیر ((μ_h) 0.05 ،بین ورق و سنبه (μ_p) 0.1 و بین بلانک و قالب 0.05 ((μ_h) 0.05) ما مدل اصطکاکی کولمب در نظر گرفته شده است [10].

در شبیه سازی به جای تاثیر فشار سیال شکل دهی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده و به منظور صرفه جویی در زمان محاسبه، کل زمان شکل دهی 0.33 ثانیه در نظر گرفته شده است. تغییرات فشار در مراحل پیش بالج و شکل دهی به صورت خطی می باشد (شکل 4). در عمل فشار پیش بالج توسط پمپ ایجاد می شود، در حالی که فشار محفظه ای با حرکت سنبه به سمت پایین تا فشار نهایی به صورت خطی افزایش می یابد.

3- بررسی تجربی 1-3- نحوه تولید ورق های دولایه

برای ساخت ورق های دولایه به روش نورد سرد، در ابتدا باید ورق های یک لایهی معمولی تهیه شوند. ابعاد این ورق ها باید با توجه به توان دستگاه نورد و … یکسان شود. سپس یک سطح از هرکدام از ورقها آماده میشود. در مرحله بعد ورقها از سمتی که آماده شدهاند روی یکدیگر قرار گرفته و در دمای محیط نورد می شوند. سپس ورقها عملیات حرارتی می شوند.

3-2-آزمون لایه کنی و کشش ورق های دولایه

برای اطمینان از اینکه دولایه ورق با استحکام کافی به یکدیگر جوش



شکل 3 مدل شبیه سازی شده

منحنیهای تنش-کرنش فولاد و آلومینیوم مورد استفاده در شکل 6 نمایش داده شده است.

فولاد مورد استفاده، St12 و ورق آلومینیومی AA1100 میباشد. البته قابل ذکر است که به دلیل انجام فرآیند نورد روی این ورقها به جهت ساخت ورق دولایه، کارسختی شدیدی در این ورقها روی داده است.

مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی نیز برای هر کدام از جنسها در جدول 2 آورده شده است.

3-3- نمودار حد شکلدهی

میزان یا وسعت تغییر شکلی که در فرایند شکل دادن بدون ایجاد هرگونه وضعیت نامطلوب، مانند تخریب یا شکست، در ماده میتوان به آن دست یافت، شکل پذیری آن ماده را مشخص میکند. در هر فرایند تغییر شکل، در متفاوت است. کمیتی که شکل پذیری را مشخص میکند، معمولا تغییر شکل نسبی تا شکست است. این کمیت معمولا از طریق آزمایشهای مختلف مانند: کشش، فشار و پیچش تعیین میشود. به منظور تشخیص شروع پارگی در شبیه سازی از نمودار حد شکل دهی¹ (FLD) که از آزمایشهای تجربی بهدست آمده، استفاده شده است.

منحنیهای حد شکل دهی ورق با استفاده از کشش قالب سنبه و ماتریس به دست می آید. نحوه انتخاب قالب و نمونههای ورق با استفاده از استاندارد ASTM E-2218 محاسبه شده است. قطر سنبه مورد نظر 50 میلی متر و قطر دایرههای حک شده برروی ورق های براساس استاندارد ASTM E-2218 به قطر 3 میلی متر و فاصله مرکز تا مرکز 3.5 میلی متر شبکهبندی شده است. پس از انجام آزمایش، برای اندازه گیری دایرههای تغییر شکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتال استفاده شد. در تمامی آزمون های حد شکل دهی و کشش، لایه فولادی با سنبه در تماس می باشد.

برای ترسیم منحنی حد شکل دهی حداقل با انجام آزمون چهار نمونه می توان یک منحنی رسم کرد. در این تحقیق نمونه ای از ورق دولایه آلومینیوم/فولاد که برروی هم نورد شدهاند، استفاده شده است. 12 نمونه با طول 19.5 میلمتر و عرضهای مختلف, 11, 9.5 , 8, 5.5 , 5 , 5 , 5 بالا , 15.5 , 18 , 2.5 و به ضخامت 2 میلیمتر بریده شدند. شکل 7 لوح شبکه بندی شده برای انجام آزمایش، و شکل 8 نمونه هایی از قطعات شکل-داده شده را نشان می دهند. با استفاده از آزمایش های تجربی، نمودار حد شکل دهی (FLD) برای ورق های دولایه آلومینیوم/فولاد بدست آمده که در شکل 9 نشان داده شده است.



¹ Forming Limit Diagram

جدول 2 مشخصات ورق،های فولادی و آلومینیومی

Table 2 Prome sheet steel and aruninum					
چگالی	ضريب پواسون	مدول يانگ	نوع	جنس	
7800kg/m ³	0.3	207GPa	St12	فولاد	
2700 kg/m^3	0.3	70GPa	AA1100	آلومينيوم	

3-4- تجهيزات آزمايشگاهي

به منظور تایید شبیهسازی عددی، یک سیستم آزمایشگاهی برای فرایند HDD طراحی و ساخته شد. این سیستم در شکل 10 نشان داده شده است. دو شیر اطمینان 1 و 2 به ترتیب فشار پیشبالج و فشار حداکثر محفظهای را کنترل میکنند. در مرحله پیشبالج روغن به کمک پمپ 3 به محفظه وارد شده، و فشار داخل محفظه افزایش مییابد. در مرحله شکلدهی با حرکت سنبه به داخل محفظه، فشار روغن به شدت افزایش مییابد. شیر یکطرفه مانع از برگشت روغن و تخلیهی آن از طریق مسیر پمپ روغن میشود. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می یابد. با توجه به ضخامت 2 میلیمتری ورق، فاصله بین ورق و قالب 1 میلیمتر در نظر گرفته شده است. با کنترل فشار محفظهای به وسیله دو شیر اطمینان 1 و 2 فرایند کشش عمیق تحت نسبتهای کشش متفاوت انجام گرفت و توزیع ضخامت و ناحیه کاری مربوط به این شرایط تعیین شد.

آزمایشهای تجربی با استفاده از یک پرس 40 تن هیدرولیکی که در شکل 11 مشاهده میشود انجام شده است. نمونهای از لوحهای اولیه بریده شده، برای نسبت کششهای متفاوت در شکل 12 نشان داده شده است. همچنین دو نمونه تولید شده با دو نسبت کشش 1.8 و 2.2 در شکل 13 مشخص شده است.

4- نتايج و بحث

1-4- تاثير ضخامت هاى مختلف بين آلومينيوم و فولاد

ضخامتهای متفاوت دو جنس اثری کاملا متفاوت برروی نسبت حد کشش دارد. شکل 14 اثر سه ضخامت متفاوت بین آلومینیوم و فولاد برروی نسبت حدی کشش را نشان میدهد. مشاهده میشود که با افزایش ضخامت فولاد



Fig. 7 A sample of a grid layout on the plate

شکل 7 نمونهای از طرح شبکه بندی شده برروی ورق



Fig. 8 An example of formed sheets for FLD test شکل 8 نمونهای از ورق های شکل داده شده برای منحنی حد شکلدهی



Fig. 12 Initial blank for experiments with two drawing ratio شکل 12 لوح اولیه برای انجام آزمایش عملی دو نسبت کشش متفاوت



Fig. 13 Samples produced by hydro mechanical deep drawing with drawing ratios of 1.8 and 2.2 شكل 13 نمونههاى توليد شده به روش كشش عميق هيدرومكانيكى با نسبت كشش 2.2 با 1.8

دلیل شرایط اصطکاکی بین سنبه و قالب، از منطقه شعاع سرسنبه بوده، اما در کشش عمیق هیدرومکانیکی بخاطر وجود فشار هیدرومکانیکی بالا با چسبیدن ورق به سنبه و عدم تماس با قالب، پارگی در دیواره قطعه اتفاق افتاده است.

در حین فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، فشار سیال به ورق وارد میشود و باعث میشود که ورق در مقابل ورق گیر فشرده شود. این عمل باعث تأمین نیروی ورق گیر شده که مقدار آن به فشار سیال و سطحی از ورق که با ورق گیر در تماس است، بستگی دارد.

هنگامیکه فشار سیال از حد فشار بالایی تجاوز کند، نیروی ورق گیر از مقدار "بحرانی" بیشتر میشود و پارگی در ورق بوجود میآید. از طرف دیگر، اگر فشار به کار رفته کمتر از حد مقدار پائینی باشد و در نتیجه نیروی ورق گیر برای جلوگیری از توسعه تنش های فشاری در فلانج کافی نبوده و در نهایت چروکیدگی بوجود میآید. درشکل 16 حدود بحرانی پارگی و چین خوردگی در پنجره فرآیند به صورت شماتیک نشان داده شده است.



Fig. 14 The effect of different blank thicknesses on working zone شکل 14 اثر ضخامت های مختلف ورق روی محدوده کاری



Fig. 9 FLD of two layer steel/aluminum sheet

شکل 9 منحنی حد شکلدهی ورق دولایه آلومینیوم فولاد



Fig. 10 Experimental test system process HDD [10] شكل 10 سيستم آزمايش تجربي فرايند HDD [10]



Fig. 11 Hydromechanical deep drawing equipment شكل 11 دستگاه كشش عميق هيدرومكانيكي

نسبت به آلومینیوم، نسبت حدی کشش افزایش مییابد. در این شکل سه ضخامت متفاوت برای ورق دولایه 2 میلیمتری مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل 15 قطعههای کشیده شده تحت شرایط ضخامتی آلومینیوم 0.4 میلیمتر و فولاد 1.6 میلیمتری را نشان میدهد که تحت دو شرایط کشش عمیق سنتی و کشش عمیق هیدرومکانیکی با فشار سیال 250 کشیده شدهاند. همانگونه که مشخص است پارگی در قطعه کشش عمیق سنتی به



Fig. 15 Comparison of Al(0.4mm)/St(1.6mm) sheet forming with traditional (left) and hydromechanical (right) methods شكل 15 قطعه كشيده شده در ضخامت آلومينيوم 0.4 ميليمتر و فولاد 1.6 ميليمتر

به دو روش سنتی (شکل چپ) و هیدرومکانیکی (شکل راست)



Fig. 16 Process window diagram for Al/St bilayer sheet شکل 16 پنجره فرایند برای ورق های دو لایه آلومینیوم-فولاد

4-2- تاثير فشار پيشبالج

شکلهای 17 و 18 تاثیر فشارهای پیشبالج متفاوت را برروی ناحیه کاری ورقهای تکلایه ST12 و AA1100 با ثابت نگهداشتن همه پارامترها نشان میدهد. با افزایش فشار پیشبالج از 0 به 20 بار حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون پارگی در هر دو ورق افزایش مییابد، با این تفاوت که ناحیه کاری ورقهای فولادی بیشتر از ورقهای آلومینیوم میباشد. دلیل این پدیده، بالج ورق در ابتدای فرایند و جلوگیری از تماس آن با پروفیل شعاع قالب میباشد. در فشارهای محفظهای پایین، بین فشار پیش بالج 0 و 20 بار، تفاوت چندانی وجود ندارد. در فشارهای محفظهای پایین، برای هر دو فشار پیش بالج گفته شده، لوح با پروفیل شعاع قالب در تماس است.

در فشار پیش بالج 40 بار هم در فشارهای محفظهای پایین و هم در فشارهای محفظهای بالا نسبت کشش کاهش مییابد. با اعمال فشار پیش بالج 40 بار، کرنش اولیه ورق در ناحیه تماس آن با ورق گیر افزایش یافته و ضخامت ورق در ابتدای فرایند کاهش مییابد که باعث ایجاد عیب در محصول نهایی می شود.

با توجه به اینکه فشار پیشبالج اولیه 20 بار برای هر دو ورق تکلایه به عنوان فشار اولیه مناسب شناسایی شده، همانطور که در شکل 19 مشاهده میشود برای سه ضخامت متفاوت بین آلومینیوم و فولاد در فشار پیشبالج 20 بار دامنههای کاری متفاوتی بدست آمده است.

شکل 20 ناحیه کاری برای ورقهای دولایه آلومینیوم فولاد با فشارهای پیش الج متفاوت را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است ناحیه کاری این ورق به مراتب بهتر از ورقهای تکلایه آلومینیومی و نزدیک ورقهای فولادی می باشد. فشار پیش بالج 20 بار دستیابی به ناحیه بزرگتری

را امکانپذیر میکند.

4-3- مقايسه نتايج تجربي و شبيهسازي

شکل 21 نتیجه آزمایشهای کشش تحت فشارهای مختلف برای ورقهای







Fig. 18 The effect of prebulge pressure in single-layer ST12 sheet شكل18 تاثير فشار پيشبالج برروى ورق تكلايه ST12



Fig. 19 The effect of prebulge pressure in working zone from different thickness ratios

شکل 19 اثر فشار پیش بالج بر محدوده کاری در نسبت ضخامتهای متفاوت



Fig. 20 The effect of different prebulging in bilayer sheets

شکل 20 اثر پیشبالجهای متفاوت برروی ورق دولایه آلومینیوم - فولاد





دولایه آلومینیوم فولاد با ضخامت های 1.6 میلیمتر فولاد و 0.4 میلیمتر آلومینیوم را نشان میدهد. آزمایش ها نشاندهنده آن است که با افزایش فشار سیال تا 150 بار حد کشش فرایند از 1.85 تا 2.35 افزایش یافته است. با افزایش بیشتر فشار سیال حد کشش فرایند کاهش مییابد.

5- نتیجه گیری

در این مقاله بررسی عددی و تجربی حد شکل دهی در فرایند شکل دهی هیدرومکانیکی ورق های دولایه قطعات مربعی انجام شد و تاثیر پارامترهای فرایند مانند فشار پیش بالج، ضخامت لایه های مختلف و اثر ضریب اصطکاک برروی ناحیه کاری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دستیابی به یک ناحیه کاری مناسب برای تولید نمونه بدون عیب از مهم ترین عوامل می باشد.

برطبق نتایج بدست آمده با افزایش ضخامت ورق میتوان به ناحیه کاری بزرگتر و نسبت کشش بالاتر دست یافت.

نتایج عددی نیز مشابه نتایج تجربی نشان میدهد که با اعمال فشار

سیال، نسبت حد کشش فرایند ابتدا افزایش یافته تا در یک فشار بهینه، حداکثر نسبت کشش قابل حصول بهدست آید. با افزایش بیشتر فشار، نسبت حد کشش فرایند کمتر می شود.

نتایج نشان میدهد در فشارهای پیشبالج کمتر از 20 bar راخ نمیتواند به سنبه بچسبد و شکل اولیه سنبه را به خود بگیرد، در نتیجه میزان نازکشدگی افزایش مییابد. فشار بیشتر از bar 40 نیز برای شکلدهی مناسب نیست، زیرا میزان نازکشدگی زیاد است. درنتیجه بهترین فشارهای پیشبالج بین 20 bar تا 40 میباشد.

نتایج عددی نشاندهنده کاهش قابل ملاحظه حد شکلدهی در اثر افزایش اصطکاک بین ورق و ورق گیر است.

در فشارهای بالا افزایش اصطکاک بین ورق و ماتریس در حالت فاصلهانداز ثابت، تاثیر چندانی برروی نسبت حد کشش ندارد، در حالی که در فشارهای پایین به علت تماس ورق با شعاع ماتریس، با افزایش اصطکاک بین ورق و ماتریس، نسبت کشش کاهش مییابد.

اصطکاک بین ورق و سنبه نیز اثر کاملا متفاوت دارد. با افزایش آن نسبت حد کشش افزایش می ابد. علت این رفتار آن است که با افزایش فشار سیال، محل پارگی از شعاع سرسنبه به سمت شعاع ماتریس جابجا می شود.

6- مراجع

- J. K. Kim, T. X. Yu, Forming and failure behavior of coated, laminated and sandwiched sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 33-42, 1997.
- [2] F. Yoshida, R. Hino, Forming limit of stainless steel clad aluminum sheets under plane stress condition, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 66-71, 1997.
- [3] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. M. Dariani, Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1131-1138, 2008.
- [4] A. Jalali Aghchai, M. Shakeri, B. M. dariani, Formability analyis of metal double layer sheets with finite element simulation and comparison with theoretical and experimental results, *Proceedings of The 10thrnational Conference on Manufacturing Engineering*, Babol, Iran, March 1-3, 2010. (in Persian, فارسی)
- [5] M. Kadkhodayan, S. J. Noei, Compensation of springback phenomenon in Al/St sheet forming using die geometry modification, *Proceedings of The 1st Regional Congress on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, March, 2013. (in Persian, Congression))
- [6] S. H. Zhang, M. R. Jensen, J. Danckert, K. B. Nielsen, D. C. Kang, L. H. Lang, Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No 3, pp. 367-373, 2000.
- [7] S. H. Zhang, K. B. Nielsen, J. Danckert, D. C. Kang, L. H. Lang, Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, No 1, pp. 1-8, 2000
- [8] S. H. Zhang, L. H. Lang, D. C. Kang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpiecesexperiments and numerical simulation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No 10, pp. 1479-1492, 2000.
- [9] M. R. Jensen, L. Olovsson, J. Danckert, Numerical model for the oil prerssure distribution in the hydromechanical deep drawing process, *Journal* of Materials Processing Technology, Vol. 103, No 1, pp. 74-79, 2000.
- [10] F. Rahmani, S. J. Hashemi, H. M. Naeini, H. D. Azodi, Numerical and experimental study of the efficient parameters on hydromechanical deep drawing of square parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 2, pp. 338–344, 2013.
- [11] E. Onder, A. E. Tekkaya, Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 5, pp.532-542, 2007.