



مطالعه تجربی و عددی اثر پارامترهای فرآیند بر ناحیه کاری در شکل دهی قطعه مخروطی دولایه به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی

مجید مولائی¹، حامد دیلمی عضدی^{2*}، مهدی صفری²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 38135-1177، hdazodi@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 آذر 1395

پذیرش: 19 بهمن 1395

ارائه در سایت: 11 اسفند 1395

کلید واژگان:

کشش عمیق هیدرومکانیکی

ورق دولایه

قطعه مخروطی

روش اجزای محدود

ناحیه ایمن کاری

چکیده

کشش عمیق هیدرومکانیکی یک فرآیند پیشرفته شکل دهی فلزات است که در آن از فشار بالای سیال جهت شکل دادن قطعات پیچیده استفاده می شود. قطعات مخروطی از جمله قطعاتی است که به دلیل سطح تماس کم میان پیشانی سنبه و ورق، امکان نازک شدن و در نتیجه پارگی در مراحل شکل دهی آن ها زیاد است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی فرآیند شکل دهی هیدرومکانیکی یک قطعه مخروطی دولایه از جنس های آلومینیوم 3003 و فولاد IF پرداخته می شود. بدین منظور اثر پارامترهای مختلف فرآیند از جمله ضریب اصطکاک، ترتیب چیدمان لایه ها و همچنین نسبت ضخامت لایه ها بر ناحیه ایمن کاری مورد مطالعه قرار می گیرد. ناحیه ایمن کاری در این فرآیند، محدوده مناسب فشار محفظه ای و نسبت کشش را برای دستیابی به قطعه بدون پارگی مشخص می کند. نتایج نشان می دهد کاهش اصطکاک میان ورق و ورقگیر، افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، افزایش ضخامت لایه با شکل پذیری بالاتر و همچنین قرارگیری فولاد به عنوان لایه بیرونی، سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده تر شدن محدوده کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می شود. در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده از بررسی تجربی و شبیه سازی عددی انطباق خوبی بین نتایج مشاهده شد.

Experimental and Numerical Study on Effects of Process Parameters on Working Zone in Hydro-mechanical Deep Drawing of Two-layer Conical Parts

Majid Molaei¹, Hamed Deilami Azodi^{1*}, Mehdi Safari¹

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 38135-1177 Arak, Iran, hdazodi@arakut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 December 2016
Accepted 07 February 2017
Available Online 01 March 2017

Keywords:

Hydro-mechanical deep drawing
Two-layer sheet
Conical part
Finite element method
Safe working zone

ABSTRACT

Hydro-mechanical deep drawing is an advanced process in metal forming in which high pressure fluid is used to form complicated parts. Conical parts are a kind of complex parts in which there is a high possibility of thinning and rupture during the forming process due to low contact area between the punch head and the blank. In this paper, the Hydro-mechanical deep drawing of Al3003-IF Steel two-layer conical parts is studied using the experimental and numerical approaches. The effects of process parameters such as friction coefficient, arrangement of layers and thickness ratio of two-layer sheet on working zone are investigated. Allowable working zone in this process indicates the applicable range of chamber pressure and drawing ratio to achieve a part without rupture. The results show that by decreasing the friction between blank and blank holder, increasing the friction between blank and punch, increasing the thickness of high formable layer and setting IF steel layer as outer layer increase the limit drawing ratio and make the allowable working zone more extensive. Finally, comparison of the results obtained from experimental investigation and numerical simulation shows a good agreement between the results.

1- مقدمه

هر دو جنس از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در سال های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه شکل دهی قطعات دو لایه صورت گرفته است. جلالی و همکاران [1] تأثیر خواص مکانیکی آلومینیوم A1100/ فولاد St13 را بر شکل پذیری ورق های دولایه بررسی کردند و دریافتند که حد شکل دهی ورق های دولایه بین منحنی های حد شکل دهی ورق های تک لایه آلومینیومی و فولادی است. پارسا و همکاران [2] تأثیر نسبت ضخامت ها و ترتیب

فرآیند شکل دهی قطعات مخروطی به طور قابل ملاحظه ای پیچیده تر از شکل دهی قطعات استوانه ای است. این امر به دلیل سطح تماس کم میان پیشانی سنبه و ورق است که نازک شدن و بروز پارگی را در مراحل شکل دهی افزایش می دهد. در این میان شکل دهی قطعات مخروطی دو لایه با توجه به امکان بهره گیری از خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و الکتریکی

Please cite this article using:

M. Molaei, H. Deilami Azodi, M. Safari, Experimental and Numerical Study on Effects of Process Parameters on Working Zone in Hydro-mechanical Deep Drawing of Two-layer Conical Parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 72-78, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مشخص است به ازای تعداد 2225 المان حل همگرا می‌شود، همچنین تعداد المان‌ها در راستای ضخامت 4 المان جهت جلوگیری از بروز عیوب قفل برشی و ساعت شنی در نظر گرفته می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها به جای مدل‌سازی سیال اثر آن به صورت اعمال یک فشار یکنواخت بر سطح ورق مدل شده است. مسیرهای فشار اعمال شده در شبیه‌سازی‌های عددی مطابق شکل 3 است. بخش OA از مسیرهای فشار مربوط به فشار پیش‌بالم است که پیش از حرکت سنبه به سطح زیرین ورق اعمال می‌شود، سپس مطابق مسیر AB فشار محفظه‌ای با حرکت سنبه به داخل محفظه قالب افزایش یافته تا به مقدار تنظیم شده برای شیر کنترل فشار نهایی برسد. پس از آن شیر محدودکننده فشار باز شده و ادامه فرآیند تحت فشار ثابت انجام می‌شود.

مشخصات آلیاژ آلومینیوم Al-3003 و فولاد IF استفاده شده در این پژوهش در جدول 1 آورده شده است. شکل و ابعاد قالب و مدار هیدرولیکی فرآیند در جدول 2 و شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به مراجع [11,10] ضرایب اصطکاک میان ورق و ورقگیر و سنبه و ورق به ترتیب 0.1 و 0.05 در نظر گرفته می‌شود.

در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقدار انرژی جنبشی فرآیند با مقدار انرژی درونی جهت اطمینان از شبه استاتیک بودن حل مقایسه می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقدار انرژی جنبشی همواره کمتر از 5% انرژی درونی مشاهده شده است.

3- معیار شکست

در این پژوهش حداکثر میزان نازک‌شدگی ورق به عنوان معیار واماندگی⁴ در

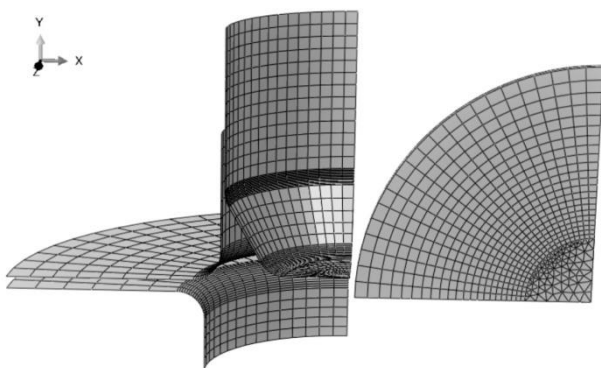


Fig. 1 Finite element model of process

شکل 1 مدل اجزای محدود فرآیند

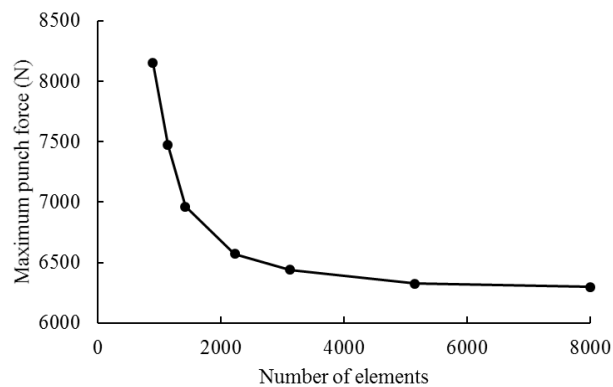


Fig. 2 Variation of maximum punch force versus number of elements

شکل 2 تغییرات بیشینه نیروی سنبه برحسب تعداد المان‌ها

⁴ Failure

قرارگیری لایه‌ها را بر نسبت کشش در فرآیند کشش عمیق و بازکشش معکوس فنجان استوانه‌ای آلومینیوم- فولاد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در کشش عمیق برای دستیابی به بیشترین نسبت کشش، لایه فولادی باید در تماس با سنبه قرار گیرد. این در حالی است که در بازکشش معکوس عکس این حالت رخ می‌دهد. باقرزاده و همکاران [3] به پیش‌بینی تنش و وقوع ناپایداری در فرآیند شکل‌دهی فنجان استوانه‌ای دولایه آلومینیوم- فولاد پرداختند. روابط تحلیلی استخراج شده از پژوهش آن‌ها برای پیش‌بینی ناحیه ایمن کاری تطابق مناسبی را با نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد. لانگ و همکاران [4] توزیع ضخامت ورق‌های سه لایه با لایه میانی بسیار نازک را در فرآیند هیدروفورمینگ به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع ضخامت لایه‌ها در حالت فولاد/ فولاد/ آلومینیوم بهتر از حالت آلومینیوم/ آلومینیوم/ فولاد است، همچنین آن‌ها دریافتند که با افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌ها شکل‌پذیری لایه میانی افزایش خواهد یافت. مروتی و همکاران [5] پدیده چروکیدگی را در کشش عمیق قطعات دو لایه آلومینیوم/ فولاد بررسی و با چروکیدگی قطعات تک‌لایه مقایسه کردند. نتایج آن‌ها اهمیت نیروی ورق‌گیر برای جلوگیری از ایجاد چروکیدگی در ناحیه فلنج را نشان داد. جلیل و همکاران [6] مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی فشار بحرانی در شکل‌دهی قطعات مخروطی دولایه آلومینیوم 1050/ فولاد St13 به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی ارائه کرده، تأثیر پارامترهای فرآیند از جمله شعاع نوک سنبه و ضریب اصطکاک را بر فشار بحرانی و ارتفاع کشش بررسی کردند. ژانگ و همکاران [7] فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی فنجان مخروطی با مقطع مربعی را به صورت تجربی و عددی مطالعه کرده و پدیده گلوبی شدن، توزیع ضخامت و چروکیدگی را بررسی کردند. در تحقیقی دیگر باقرزاده و همکاران [8] بررسی تجربی و عددی بر پارامترهای مؤثر بر ناحیه کاری فنجان استوانه‌ای دولایه آلومینیوم 1050- فولاد St13 انجام دادند و تأثیر پارامترهای فرآیند را بر ناحیه کاری و توزیع کرنش بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ناحیه ایمن کاری با افزایش نسبت کشش و کاهش ضخامت فولاد محدودتر می‌شود.

هدف این مقاله تعیین ناحیه ایمن کاری برای شکل‌دهی فنجان مخروطی دو لایه آلومینیوم 3003/ فولاد IF در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی است. اثر پارامترهای فرآیند شامل فشار محفظه‌ای، ضریب اصطکاک، نسبت ضخامت‌ها و چیدمان لایه‌ها بر ناحیه کاری بررسی می‌شود.

2- شبیه‌سازی اجزای محدود

ارائه یک مدل صحیح و تأیید شده با نتایج تجربی جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد در شبیه‌سازی‌های عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. این عمل برای امکان‌سنجی تولید، تحلیل و بهینه‌سازی کیفیت محصول نهایی و قابلیت اطمینان بودن فرآیند انجام می‌شود [9]. شبیه‌سازی عددی فرآیند با استفاده از حلگر صریح¹ در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس² انجام می‌شود. شکل 1 مجموعه شبکه‌بندی شده ورق و قالب را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن شکل نهایی نسبت به دو صفحه XY و YZ تنها یک چهارم از قالب و ورق مدل‌سازی می‌شود. ورق به صورت جسم سه‌بعدی³ و تغییر شکل‌پذیر با المان‌های از نوع C3D8R بوده و المان‌های اجزای صلب قالب از نوع R3D4 است. از نمودار نیروی سنبه برحسب تعداد المان‌ها برای بهینه‌سازی تعداد المان‌های مورد استفاده در ورق‌ها استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل 2

¹ Explicit

² Abaqus

³ Solid

متفاوت برای تولید قطعه بدون پارگی انجام شده است. فشار نهایی محفظه و فشار پیش بالچ توسط شیرهای محدودکننده فشار تنظیم می‌شود. آزمایش‌ها بر ورق دولایه ساخته شده از لایه‌های آلومینیوم 3003-IF و فولاد انجام گرفته است. خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده با استفاده از آزمون کشش استاندارد مطابق جدول 1 استخراج شده است. جهت اتصال ورق‌های آلومینیوم 3003-IF و فولاد و ساخت ورق دولایه، ابتدا سطوح ورق‌ها اکسیدزدایی، پلیسه‌گیری و چربی‌زدایی شده و سپس با استفاده از چسب پلی‌اورتان یکدیگر متصل شده‌اند.

آزمایش‌ها برای بررسی اهمیت ترتیب چیدمان لایه‌ها در دو حالت Al/St (آلومینیوم به‌عنوان لایه‌ای که با سنبه در تماس است) و St/Al (فولاد IF به عنوان لایه در تماس با سنبه) انجام شده است. شکل 6 تعدادی از نمونه‌های شکل‌داده شده به‌صورت تجربی و عددی را در هر دو حالت ترتیب چیدمان لایه‌ها نشان می‌دهد.

5- بحث و نتیجه‌گیری

1-5- ناحیه کاری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

در شکل 7 نمونه‌ای از قطعات مخروطی دولایه Al/St شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شده است. با هدف تعیین ناحیه ایمن کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ورق دولایه، مقادیر مجاز فشار محفظه در نسبت‌های کشش مختلف برای جلوگیری از بروز پارگی در قطعه به‌صورت تجربی و عددی استخراج شد. فشار پیش‌بالچ اعمال ده در این آزمایش‌ها مقدار ثابت 4 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. شکل‌های 8 و 9 ناحیه ایمن کاری یا محدوده قابل قبول فشار سیال به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی برای تولید قطعه بدون پارگی در نسبت‌های کشش مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است با

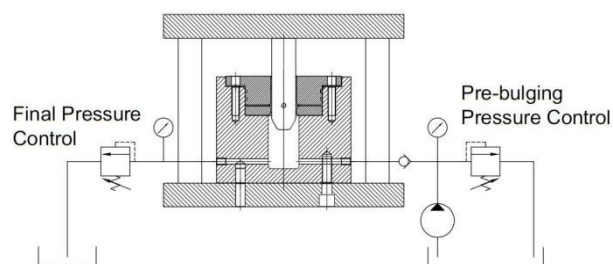
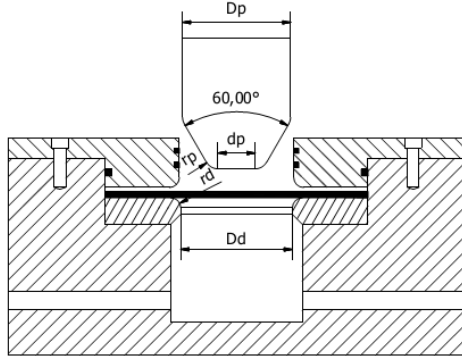


Fig. 4 a- The geometry of used die set, b- Hydraulic circuit of process

شکل 4 الف- هندسه مجموعه قالب مورد استفاده، ب- مدار هیدرولیکی فرآیند

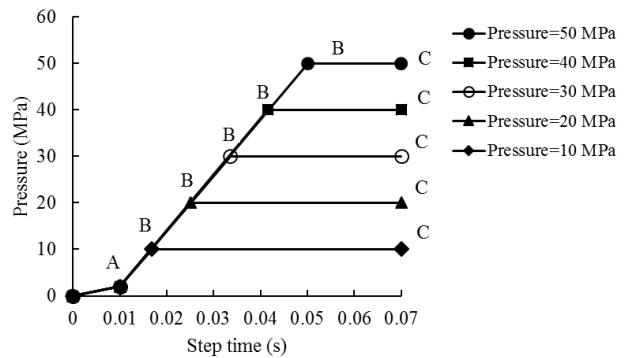


Fig. 3 Employed pressure paths in the numerical simulations

شکل 3 مسیرهای فشار سیال در شبیه‌سازی‌های عددی

جدول 1 خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیوم 3003 و فولاد IF

Table 1 Mechanical properties of Al-3003 and IF steel sheets

خواص (یکا)	نماد	آلومینیوم 3003	فولاد IF
ضخامت (mm)	t	0.6	0.7
مدول یانگ (GPa)	E	70	210
ضریب پواسون	ν	0.33	0.3
تنش تسلیم (MPa)	σ_y	62	140
استحکام کششی (MPa)	σ_{UT}	116	289
توان کرنش سختی	n	0.25	0.3

جدول 2 ابعاد مجموعه قالب و سنبه

Table 2 Dimensions of die set and the Punch

بعد (یکا)	نماد	اندازه
قطر بزرگ سنبه (mm)	D_p	32
قطر کوچک سنبه (mm)	d_p	16
زاویه راس سنبه (degree)		60
شعاع سر سنبه (mm)	r_p	3
قطر دهانه ی ورودی ماتریس کشش (mm)	D_d	37
شعاع ورودی ماتریس کشش (mm)	r_d	3.5

نظر گرفته شده است [12]. حداکثر مقدار نازک‌شدگی با محاسبه کرنش ضخامتی بیشینه (ϵ_t) مطابق رابطه (1) تعیین شده است.

$$\epsilon_t = \ln \left(\frac{t_f}{t_0} \right) \tag{1}$$

در رابطه (1) t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی ورق پس از شکل‌دهی است.

با توجه به برقراری شرایط کرنش صفحه‌ای در دیواره قطعه ($d\epsilon_\theta = 0$), حداکثر کرنش در راستای ضخامت ورق (ϵ_{tMax}) مطابق رابطه (2)

$$\epsilon_{tMax} = \ln \left[1 + (23.3 + \frac{360}{25.4} t_0) \left(\frac{n}{0.21} \right) \right] \tag{2}$$

محاسبه می‌شود [13].

در آن n توان کرنش سختی ورق است.

4- مطالعه تجربی

شکل و ابعاد قالب و مدار هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مطابق جدول 2 و شکل 4 بوده، تصویر تجهیزات مورد استفاده در شکل 5 نشان داده شده است. فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی با کمک دستگاه پرس هیدرولیک 40 تن و با سرعت 4mm/s انجام گرفته است. فرآیند برای نسبت‌های کشش مختلف و تحت فشارهای

ملاحظه نسبت به بیشینه نسبت کشش قابل دستیابی در فرآیند کشش عمیق سنتی (فشار محفظه‌ای صفر) در هر دو حالت Al/St و St/Al بهبود یافته است. در شکل 10 نیز مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی در حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها ارائه شده که نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج تجربی و عددی است.

2-5- بررسی اثر اصطکاک بر ناحیه مجاز کاری

اصطکاک بین ورق با اجزاء مختلف قالب اثرات متفاوتی بر محدوده کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی دارد. شکل 11 تأثیر ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین ورق و ورقگیر را بر محدوده مجاز فشار محفظه نشان می‌دهد. مطابق نتایج افزایش اصطکاک بین ورق و ورقگیر نسبت حدی کشش

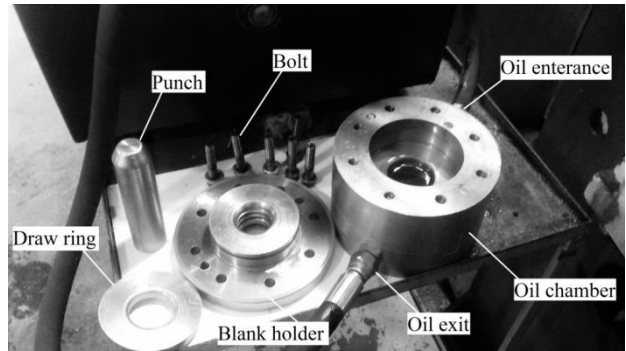


Fig. 5 Experimental setup

شکل 5 تجهیزات تجربی

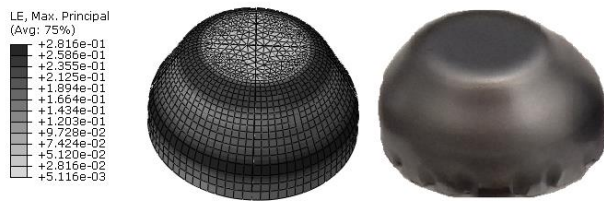


Fig. 7 Comparison of specimens formed in experiment and numerical simulation (Al/St , Pre-bulging pressure: 3MPa, Final pressure: 20MPa, Drawing ratio: 2)

شکل 7 مقایسه نمونه شکل داده شده در بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی (حالت Al/St ، فشارپیش بالچ: 3 MPa، فشار نهایی: 20MPa، نسبت کشش: 2)

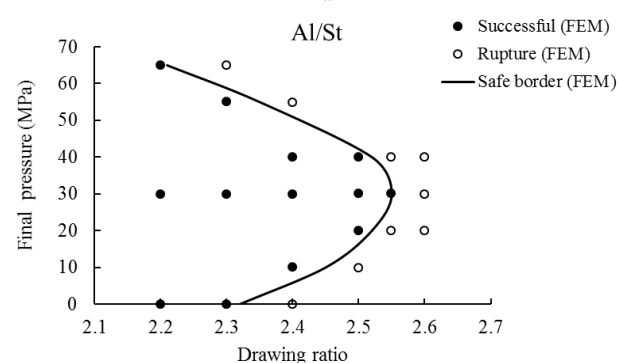
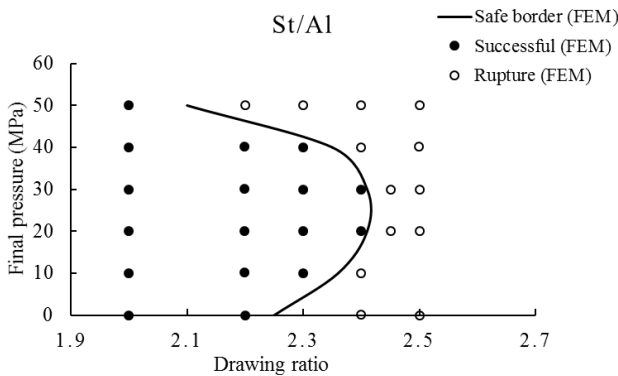


Fig. 8 Working zones extracted from numerical simulations in cases of: (a) St/Al , (b) Al/St .

شکل 8 نواحی کاری استخراج شده از شبیه‌سازی‌های عددی برای حالت‌های الف- Al/St ، ب- St/Al

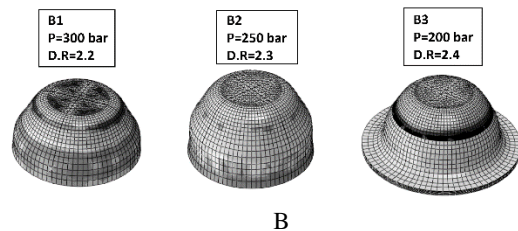
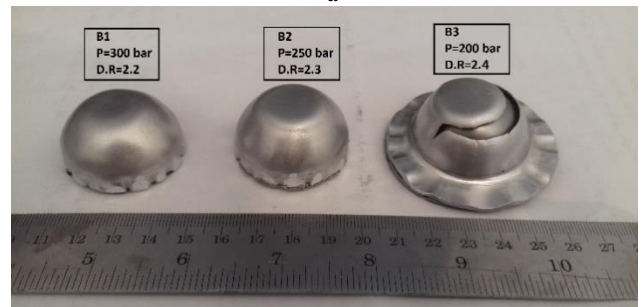
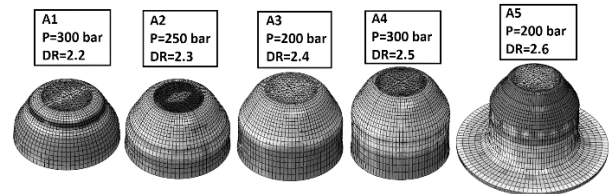
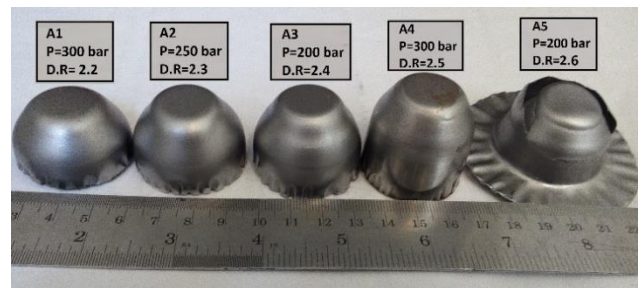


Fig. 6 Some specimens formed in experimental and numerical studies in cases of, a- Al/St , b- St/Al .

شکل 6 برخی نمونه‌های شکل داده شده در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در حالت‌های الف- Al/St ، ب- St/Al

افزایش نسبت کشش، بازه قابل قبول فشار محفظه برای تولید قطعه سالم بدون پارگی محدودتر شده، کنترل فرآیند جهت جلوگیری از بروز پارگی دشوارتر می‌شود. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل‌های 8 و 9 نسبت کشش به‌دست‌آمده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به‌طور قابل

شکل 14 به نواحی مختلف تقسیم شده است.

در شکل 15 توزیع ضخامت لایه‌ها در دو حالت مختلف قرارگیری لایه‌ها نشان داده شده است. مطابق نتایج در هر دو حالت St/Al و Al/St بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک مخروط (ناحیه B) اتفاق می‌افتد و از این رو این ناحیه را می‌توان به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه قطعه در نظر گرفت. دلیل این مسئله می‌تواند برای اثرات خم‌کاری ایجادشده در این ناحیه باشد [14]. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه‌ای که در تماس با سنبه نیست) در هر دو حالت St/Al و Al/St بیشتر بوده؛ بنابراین قرارگیری لایه با استحکام بالاتر به‌عنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسب‌تر است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند شکل‌دهی قطعه مخروطی دولایه آلومینیوم 3003-Al و فولاد IF به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. محدوده فشار مجاز کاری جهت جلوگیری از بروز پارگی در قطعه با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تعیین و اثر عوامل مختلف فرآیند بر ناحیه مجاز فشار محفظه بررسی شد. همچنین توزیع ضخامت لایه‌ها در قطعه مخروطی دولایه شکل داده شده مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارت است از:

- 1- مقایسه محدوده مجاز کاری در هر دو حالت قرارگیری لایه‌ها نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج تجربی و عددی بوده است.
- 2- با افزایش نسبت کشش، بازه قابل قبول فشار محفظه برای تولید

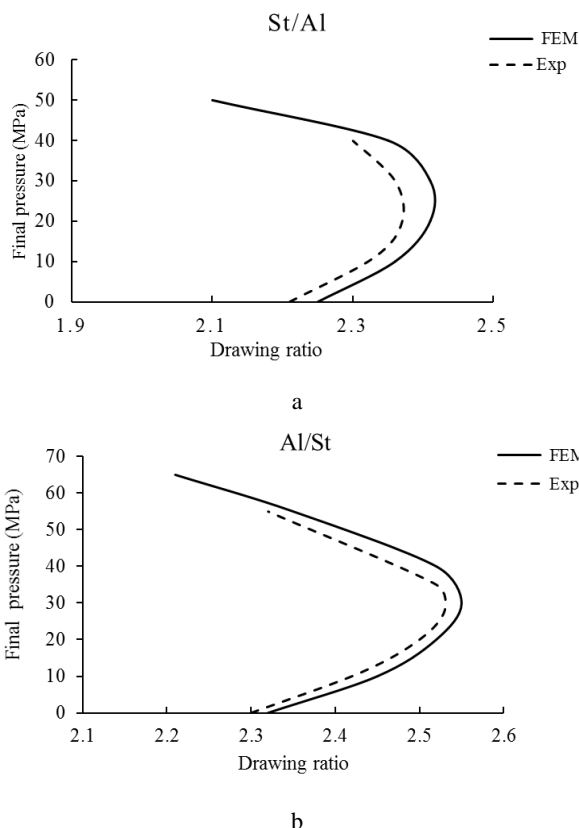


Fig. 10 Comparison of working zones obtained from experiments and numerical simulations in cases of a- St/Al, b- Al/St.

شکل 10 مقایسه نواحی کاری به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St.

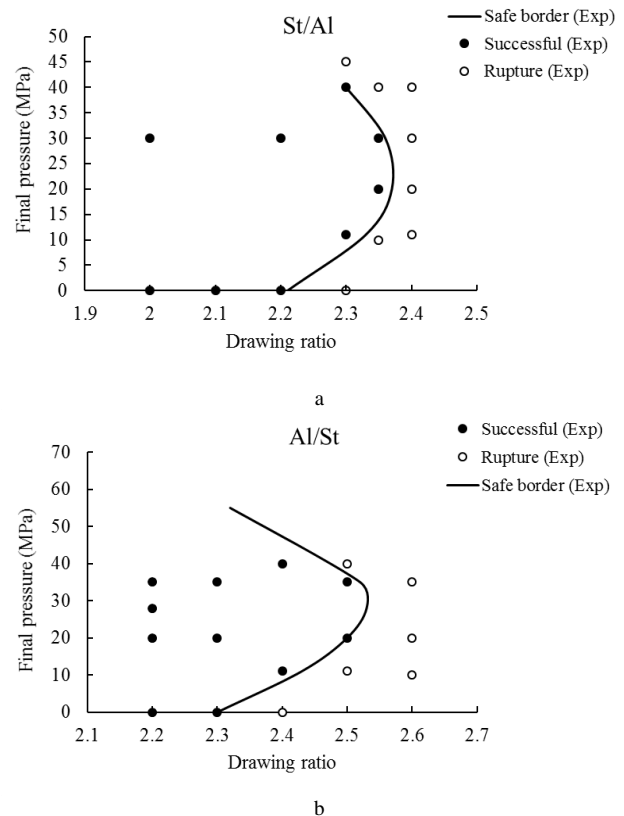


Fig. 9 Working zones extracted from experiments in cases of: a- St/Al, b- Al/St.

شکل 9 نواحی کاری استخراج شده از آزمایش‌های تجربی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St.

را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده، ناحیه کاری برای تولید قطعه سالم را محدودتر می‌کند. کاهش نسبت کشش حدی با دلیل افزایش اصطکاک در ناحیه فلنج ناشی از ممانعت ایجادشده در جریان ورق و در نتیجه افزایش نازک‌شدگی و احتمال پارگی است. چنان‌که در شکل 11 دیده می‌شود اثر اصطکاک بر محدوده مجاز کاری در فشارهای محفظه‌ای بالا مشهودتر است. همان‌گونه در شکل 12 نشان داده شده اصطکاک بین سنبه و ورق اثر متفاوتی بر محدوده کاری و نسبت حدی کشش دارد. افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق، سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده‌تر شدن محدوده فشار کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می‌شود. دلیل این امر گیرش بهتر ورق توسط سنبه هنگام انجام فرآیند و در نتیجه کاهش نازک‌شدگی و درنهایت به تعویق افتادن پارگی است.

3-5- بررسی اثر نسبت ضخامت ورق دولایه بر روی ناحیه مجاز کاری

شکل 13 ناحیه مجاز کاری در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعه مخروطی دولایه را در نسبت‌های ضخامت مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ناحیه ایمن کاری با افزایش ضخامت لایه با استحکام بالاتر (فولاد IF) بزرگ‌تر شده و دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر امکان‌پذیر خواهد شد.

4-5- بررسی توزیع ضخامت در کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعه

مخروطی دولایه

هندسه قطعه جهت بررسی توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه مطابق

محدودتر می‌کند.

4- افزایش ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق سبب افزایش نسبت حدی کشش و گسترده‌تر شدن محدوده فشار کاری مجاز جهت تولید قطعه مخروطی دولایه بدون پارگی می‌شود.

5- نتایج نشان داد با افزایش ضخامت لایه با استحکام بالاتر (فولاد IF)، ناحیه ایمن‌کاری بزرگ‌تر شده، دستیابی به نسبت‌های کشش بالاتر امکان‌پذیر خواهد شد.

6- مطالعه توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه نشان داد بیشترین نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک مخروط در هر دو حالت Al/St و St/Al اتفاق می‌افتد، از این‌رو این ناحیه را می‌توان به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه قطعه در نظر گرفت.

7- براساس نتایج به‌دست‌آمده میزان کاهش ضخامت لایه بیرونی (لایه‌ای که در تماس با سنبه نیست) در هر دو حالت Al/St و St/Al بیشتر بوده؛ بنابراین قرارگیری لایه با استحکام بالاتر به‌عنوان لایه بیرونی جهت دستیابی به قطعه مخروطی دولایه با نسبت کشش بالاتر مناسب‌تر است.

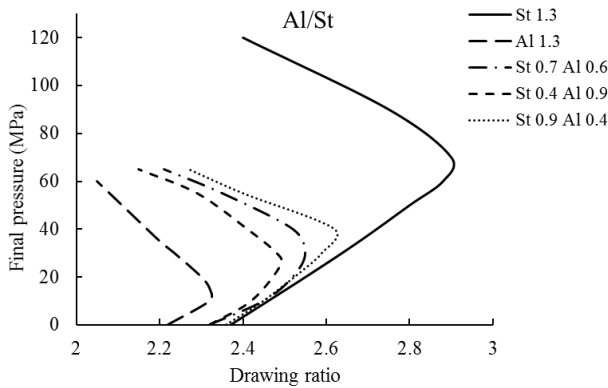


Fig. 13 The effect of thickness ratio of two-layer sheet on working zone in numerical approach

شکل 13 اثر نسبت ضخامت ورق دولایه بر ناحیه کاری در روش عددی

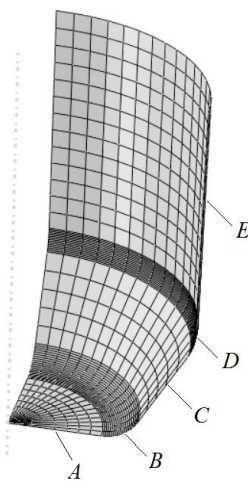


Fig. 14 Various regions of formed conical specimen

شکل 14 نواحی مختلف قطعه مخروطی شکل داده‌شده

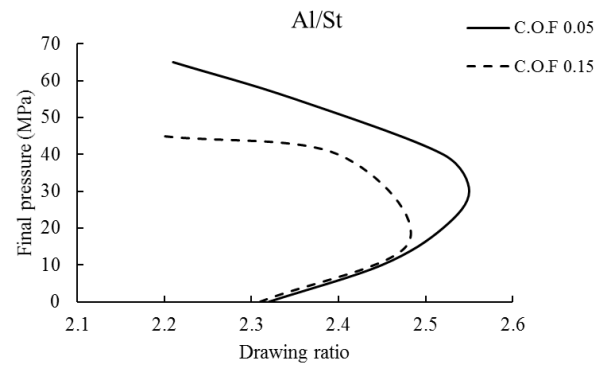
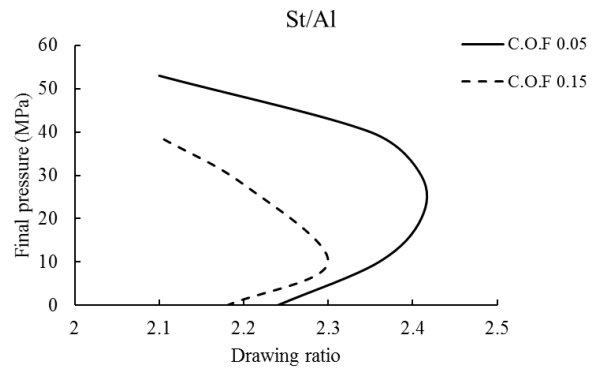


Fig. 11 The effect of friction coefficient between blank and blank holder on working zone in numerical approach in cases of a- St/Al, b- Al/St.

شکل 11 اثر اصطکاک بین ورق و ورقگیر بر ناحیه کاری در روش عددی برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St

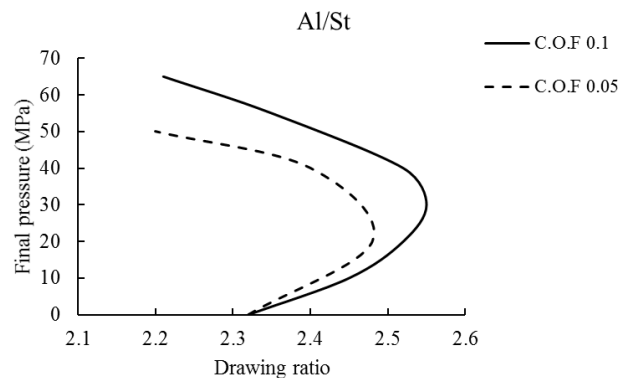


Fig. 12 The effect of friction coefficient between blank and punch on working zone in numerical approach

شکل 12 اثر اصطکاک بین ورق و سنبه بر ناحیه کاری در روش عددی

قطعه سالم بدون پارگی محدودتر شده، کنترل فرآیند جهت جلوگیری از بروز پارگی دشوارتر می‌شود، همچنین نسبت کشش به‌دست‌آمده در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به‌طور قابل ملاحظه نسبت به حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی در فرآیند کشش عمیق سنتی بهبود می‌یابد.

3- افزایش اصطکاک بین ورق و ورقگیر نسبت حدی کشش را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده، ناحیه کاری برای تولید قطعه سالم را

properties of components on formability of two-layer metallic sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 809–823, 2013.

[2] M. H. Parsa, K. Yamaguchi, N. Takakura, Redrawing analysis of aluminum-stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments, *Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 10, pp. 2331–2347, 2001.

[3] S. Bagherzadeh, B. Mollaei Dariani, K. Malekzadeh, Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations, *Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 9, pp. 1840–1849, 2012.

[4] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle, *Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 3, pp. 524–535, 2005.

[5] M. R. Morovvati, A. Fatemi, M. Sadighi, Experimental and finite element investigation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheet metals in deepdrawing process, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 113–121, 2011.

[6] A. Jalil, M. Hoseinpour Gollo, M. M. Sheikhi, S. M. H. Seyedkashi, Hydrodynamic deep drawing of double layered conical cups, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No. 1, pp. 237–247, 2016.

[7] S. H. Zhang, J. Danckert, Development of Hydro-mechanical Deep Drawing, *Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1-3, pp. 14–25, 1998.

[8] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131–140, 2015.

[9] J. O. Hallquist, *LS-Dyna 970 theoretical manual*, pp. 1.1-1.10, California: Livermore Software Technology Corporation, 1998.

[10] A. Fazli, B. Mollaei Dariani, Parameter study of the axisymmetric hydromechanical deep drawing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 12, pp. 1937–1944, 2006.

[11] S. H. Zhang, M. R. Jensen, K. B. Nielsen, J. Danckert, L. H. Lang, D. C. Kang, Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 2, pp. 544–550, 2003.

[12] A. Yingyot, N. Gracious, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137–143, 2004.

[13] S. B. Levy, A comparison of empirical forming limit curves for low carbon steel with theoretical forming limit curves of Ramaekers and Bongaerts, *International Deep Drawing Research Group, WG3*, Hungary, June 13-14, 1996.

[14] A. Gorji, H. Alavi-Hashemi, M. Bakhshi-jooybari, S. Nourouzi, S. J. Hosseinpour, Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups, *The Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 9, pp. 915–927, 2011.

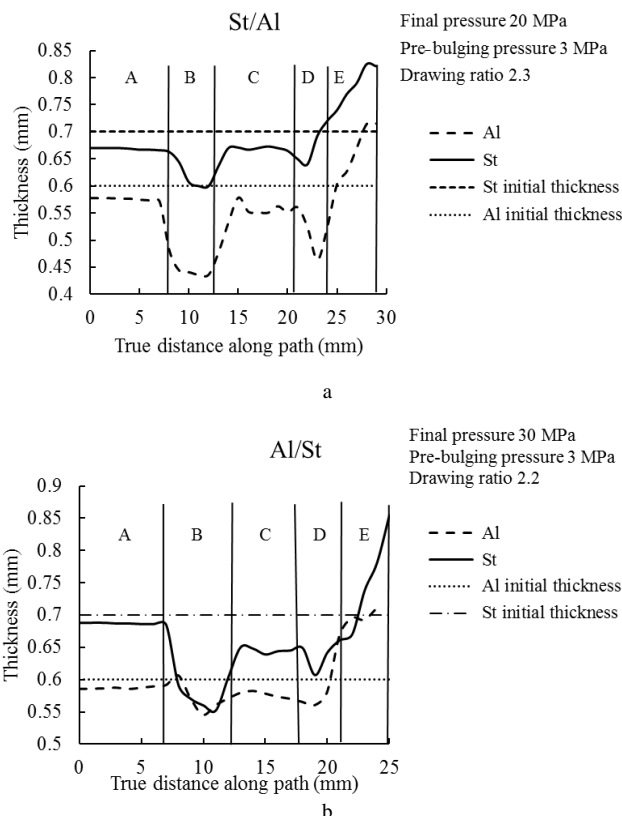


Fig. 15 Thickness distribution of two-layer conical specimen in cases of a- St/Al, b- Al/St.

شکل 15 توزیع ضخامت قطعه مخروطی دولایه برای حالت‌های الف- St/Al، ب- Al/St

7- مراجع

[1] A. Jalali Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei Dariani, Influences of material