



Numerical and experimental comparing deep drawing square section with metal and rubber die

Hamid Golmakani ^a, Siamak Mazdak ^{a*}, Saman Moradi Besheli^a, Ebrahim Sharifi^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tafresh University, Tafresh, 79611-39518, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Golmakani H, Mazdak S, Moradi Besheli S. Numerical and experimental comparing deep drawing square section with metal and rubber die. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;2: 172-187.

 <https://10.52547/masm.2.2.172>.

KEYWORDS

Rubber die,
Deep drawing,
Finite element.

ABSTRACT

The deep drawing process is a widely used method for producing metal sheet parts. The main cost of the die in this method is to make the matrix. Using rubber matrix saves construction time and production cost. Controlling the deformation of rubber and blank is one of the important issues in this method. Therefore, in this article, a comparison has been made between the parts produced by metal and rubber dies. In the following, three-dimensional simulations have been performed using the finite element method and hyper elastic model. The simulation results showed that placing an intermediate ring between the rubber and the blank causes a significant improvement in the production parts and better control of the behavior of the blank and rubber during deformation. For verification, a die with rubber components and also a die with a metal matrix were made, and experimental tests were performed for the steel material. The dies were made based on the primary spacing technique instead of the spring and blank holding system. The maximum percentage of thinning, the percentage of equivalent plastic strain, shrinkage, tearing, and the force on the metal mandrel have been investigated and compared in two types of dies for steel workpieces.

Extended Abstract

1. Introduction

Deep drawing is a metal forming process used to form flat sheets into cup-shaped products such as bathtubs and shell casings. The rubber forming method has advantages compared to conventional deep drawing, such as making only half of the die, in which case the other half will be replaced by rubber. Since high precision must be used in the manufacture of punch or matrix, in the deep drawing die, it can be said that in die with rubber components, the cost and time of manufacturing a component, was saved. In deep drawing with rubber, due to the flexibility of a component, the stress applied to the metal components during the process is significantly reduced, which increases the life of the metal components. In this paper, the experimental and numerical investigation of the process of deep drawing a square sample was carried out by two methods, metal die and die with rubber components. For validation, a die with metal and rubber components was made. The test conditions were the same in the two types of die, with the difference that the rubber matrix was placed in the die instead of the metal matrix, and the rubber was placed inside a chamber to prevent the rubber from escaping during the process. In the rubber matrix method, after many tests, a thick metal sheet was used as an intermediary between the rubber and the sheet to complete the forming process. Simulation of the processes has also been done in 3D using Abaqus finite element software. Finally, thinning, tearing, and maximum equivalent plastic strain and forming force were compared and investigated for different situations

2. Experimental setup

In this paper, two dies were made with rubber and metal matrix. In the rubber die, silicone rubber was used to determine the properties of the rubber, uniaxial compression test was performed according to ASTM D575 standard.

* Corresponding author. Tel.: 09183636009

E-mail address: s.mazdak@tafreshu.ac.ir.

DOI: <https://10.52547/masm.2.2.172>.

Received: July 4, 2022; Received in revised form: August 12, 2022; Accepted: August 16, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



Punch and blank-holder for two types of dies were the same. Four springs were used to apply blank holding force. To control the sheet, the intermediate ring technique according to figure (1-c) was used.

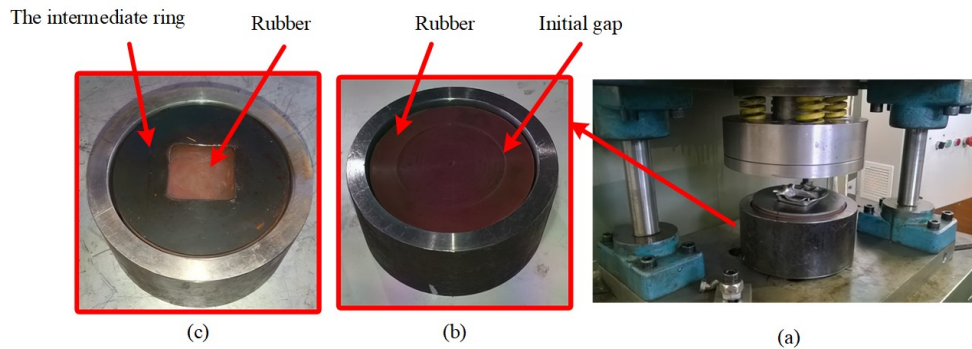


Figure 1. Die with rubber matrix a) Die set b) Matrix without intermediate ring c) Rubber matrix with intermediate ring

In the metal die, the rubber matrix was replaced with a metal matrix. Figure (2) shows the fabricated die.



Figure 2. The fabricated die with the metal die.

3. Finite element Simulation

The deep drawing process was simulated using Abaqus version 6.14 finite element software. The simulation is three-dimensional and due to the symmetry in the geometry of the sample, constraints, and boundary conditions, a quarter of the real model is studied.

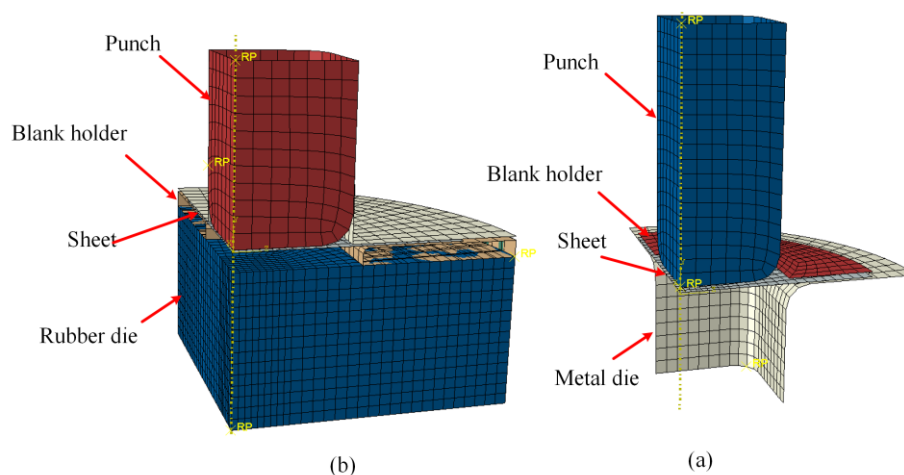


Figure 3. 3D model simulated with a) metal matrix b) rubber die

4. Results

Figure 4 shows an example of parts shaped by this technique. As it can be seen, by using the intermediate ring between the rubber and the sheet, the force contribution is more uniform and the wrinkling has been transferred from the corners to the flange part of the sample. Also, the depth of tension and other specifications of the part are acceptable.



Figure 4. Steel sample formed with rubber matrix die and intermediate ring

The results showed that the use of an intermediate ring between sheet and rubber in a die with a rubber matrix improves the tensile conditions. Also, using a die with a rubber matrix reduces thinning, the forming force, and the maximum equivalent plastic strain.



مقایسه عددی و تجربی فرآیند کشش عمیق نمونه مربعی با ماتریس لاستیکی و ماتریس فلزی

حمید گلمکانی^{الف}، سیامک مزدک^{ب*}، سامان مرادی بشلی^پ، ابراهیم شریفی^ت

^{الف} کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، h67.golmakani@gmail.com

^ب استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، s.mazdak@tafreshu.ac.ir

^پ کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، saman.mb91@gmail.com

^ت استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، sharifi@tafreshu.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>فرآیند کشش عمیق، روشی پرکاربرد برای تولید قطعات از ورق فلزی می‌باشد. هزینه اصلی قالب در این روش ساخت ماتریس می‌باشد. استفاده از ماتریس لاستیکی سبب صرفه‌جویی در زمان ساخت و هزینه تولید می‌شود. کنترل تغییر شکل لاستیک و ورق از مسائل مهم در این روش می‌باشد. از این رو در این مقاله مقایسه‌ای بین قطعات تولیدشده توسط قالب فلزی و لاستیکی انجام شده است. در ادامه با استفاده از روش المان محدود و مدل هایپر الاستیک، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که قرار دادن یک ورق فلزی به‌عنوان واسطه بین لاستیک و ورق سبب بهبود چشمگیر در قطعات تولیدی و کنترل بهتر رفتار ورق و لاستیک حین تغییر شکل می‌شود. در ادامه برای صحت‌سنجی کار، یک قالب با اجزای لاستیکی و یک قالب با ماتریس فلزی ساخته و برای جنس فولاد، آزمایش‌هایی عملی انجام شد. قالب‌ها بر اساس تکنیک فاصله اولیه به جای سیستم فنر و ورق‌گیر ساخته شده‌اند. حداکثر درصد نازک‌شدگی، درصد کرنش معادل پلاستیک، چروکیدگی، پارگی و نیروی وارد بر سنبه فلزی، در دو حالت برای نمونه فولادی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.</p>	<p>ماتریس لاستیکی، کشش عمیق، المان محدود.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵</p>

۱- مقدمه

فرآیند کشش عمیق، نوعی فرآیند فلزکاری است که برای شکل دادن ورق صاف به محصولات فنجانی شکل مانند وان حمام و محفظه‌های پوسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای شکل دادن ورق روش‌های مختلفی وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از شکل‌دهی غلتکی سرد [۱]، کشش عمیق^۱ هیدروفرمینگ^۲ و روش‌های دیگری که هرکدام معایب و مزایای خود را دارند. کشش عمیق روشی پرکاربرد است که عمده هزینه آن مربوط به قالب آن می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کاهش هزینه این فرآیند پیشنهاد شده است از جمله استفاده از ورق‌های تیلور^۳ [۲] یا استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی در ورق‌های تیلور [۳].

^۱ Deep drawing

^۲ Hydroforming

^۳ Taylor welded blank

از مزایای کشش عمیق می‌توان به شکل‌دهی ورق دولایه [۴] اشاره کرد که کاربرد زیادی در صنعت دارد. روش شکل‌دهی با لاستیک، در مقایسه با کشش عمیق معمولی دارای مزایایی است که از آن جمله می‌توان به مورد نیاز بودن ساخت تنها نیمی از قالب فلزی اشاره کرد که در این صورت، نیمه دیگر با لاستیک جایگزین خواهد شد. از آنجاکه در ساخت سنبه یا ماتریس، در قالب کشش عمیق باید دقت بالایی بکار رود، زمانی که تنها فقط نیاز به ساخت یک ابزار صلب باشد، می‌توان گفت که در این حالت یعنی قالب با اجزای لاستیکی، در هزینه و زمان ساخت یک جزء با دقت بالا صرفه‌جویی می‌شود. در کشش عمیق با لاستیک، به علت انعطاف‌پذیر بودن یک جزء، فشار وارده به جزء فلزی در طی فرآیند، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که باعث بالا رفتن عمر اجزای فلزی می‌شود. گلمکانی و همکاران [۵] پارامترهای مهم را در کشش عمیق با ماتریس لاستیکی را برای کشش عمیق ورق‌های دولایه فولاد-آلومینیوم بررسی کردند نشان دادند که با استفاده از ماتریس لاستیکی از جنس سیلیکون می‌توان ورق‌های دولایه با عمق کم شکل داد. همچنین جایگشت ورق تأثیر مهمی بر روی توزیع ضخامت قطعه دارد. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۶] اثر ارتعاشات فراصوت را در کشش عمیق با ماتریس لاستیکی را بررسی کردند نشان دادند که با اعمال فراصوت اصطکاک بین ورق و لاستیک کاهش می‌یابد در نتیجه عمق کشش افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دامنه ارتعاشات اعمالی عمق کشش افزایش می‌یابد.

ارتیا و همکاران [۷] کشش عمیق میکرو از جنس فویل استیل ۳۰۴ به روش عددی و تجربی را با استفاده از ابزار انعطاف‌پذیر بررسی کردند. در این بررسی از تکنیک فاصله اولیه به‌جای فنر برای نگه‌داری ورق‌گیر استفاده شد. نشان داده شد که با استفاده از تکنیک فاصله اولیه و سنبه لاستیکی می‌توان فولاد ۳۰۴ را شکل داد. رضانی و همکاران [۸] کشش عمیق با سنبه لاستیکی از جنس‌های مختلف را به روش عددی و تجربی بررسی کردند. سرعت نفوذ سنبه، تأثیر جنس لاستیک روی فشار وارده به سنبه و نازک‌شدگی نمونه توزیع تنش، کرنش در قطعه، قالب و سنبه بررسی شد. یاماشیتا و همکاران [۹] اثر سنبه لاستیکی را در کشش عمیق ورق‌های از آلیاژ آلومینیوم-منگنز بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از سنبه لاستیکی سبب بهبود کیفیت سطح قطعه تولیدی می‌شود. یانکسیونگ و همکاران [۱۰]، انواع شکل‌دهی با لاستیک را برای ساخت صفحات شیاردار به‌صورت شبیه‌سازی عددی و تجربی بررسی کردند. همچنین در این بررسی شکل‌دهی با روش‌های محدب و مقعر را در تولید صفحات شیاردار را بررسی و بهترین حالت را برای تولید این قطعات، معرفی کرده‌اند. پنگ و همکاران [۱۱] کشش عمیق با سنبه لاستیکی را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. سختی سنبه، شرایط روغن‌کاری، شرایط روغن‌کاری را بررسی کردند. نشان دادند که ضریب اصطکاک و سختی لاستیک تأثیر مهمی در کیفیت قطعه تولیدشده دارند. تیرووارودچلوان و همکاران [۱۲] کشش عمیق نمونه‌های نیم‌کره‌ای را با استفاده از سنبه از جنس اورتان^۴ بررسی کردند. برای کنترل جریان ورق از تکنیک ترمز ورق استفاده کردند. در این بررسی توزیع ضخامت، کرنش پلاستیک معادل، سختی و زبری دیواره‌ها بررسی شد. نشان داده شد با افزایش طول اورتان سبب افزایش حد کشش، افزایش نیروی شکل‌دهی و افزایش فشار در اورتان می‌شود. یونیس و همکاران [۱۳] کشش عمیق مقطع مربعی را به‌صورت عددی و تجربی با شکل‌های مختلف لوح اولیه بررسی کردند. نشان داده شد که لوح اولیه با مقطع دایره‌ای در مقایسه با لوح مربعی و دوزنقه‌ای سبب توزیع یکنواخت‌تر ضخامت در قطعه تولیدشده می‌شود؛ همچنین نیروی شکل‌دهی در حالتی که از لوح اولیه دایره‌ای استفاده می‌شود در مقایسه با لوح مربعی و دوزنقه‌ای کمتر می‌باشد.

در این مقاله، بررسی تجربی و عددی فرآیند کشش عمیق نمونه مربعی به دو روش قالب فلزی و قالب با اجزای لاستیکی انجام شد. برای صحت‌سنجی، یک قالب با اجزای فلزی و لاستیکی، ساخته شد. شرایط آزمایش در دو قالب یکسان بوده با این تفاوت که در قالب با اجزای لاستیکی بجای ماتریس فلزی، لاستیک قرار داده شده است که لاستیک در داخل محفظه‌ای قرار داده شده تا از فرار لاستیک در طی فرآیند جلوگیری کند. در روش ماتریس لاستیکی، پس از آزمایش‌های فراوان، از ورق فلزی ضخیمی به‌عنوان واسطه بین لاستیک و ورق استفاده شده است تا فرآیند شکل‌دهی کامل گردد. شبیه‌سازی فرآیندها نیز به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام گرفته است. در نهایت نازک‌شدگی، پارگی و حداکثر کرنش پلاستیک معادل و نیروی شکل‌دهی برای حالات مختلف مقایسه و بررسی شد.

^۴ Ortan

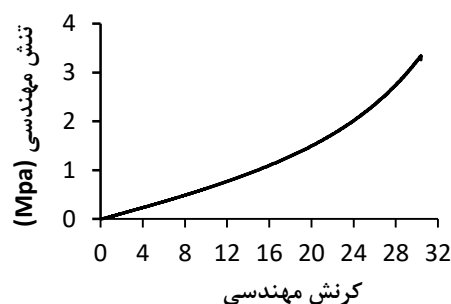
۲- کار تجربی

۲-۱ تعیین خصوصیات ماده

در این مقاله دو قالب با ماتریس لاستیکی و فلزی ساخته شد. در قالب لاستیکی، لاستیک از جنس سیلیکون استفاده شد. برای تعیین خصوصیات لاستیک از آزمایش فشار تک محوره بر طبق استاندارد ASTM D575 انجام شد. سرعت آزمایش برابر 12 mm/min ، ارتفاع نمونه برابر $64/5 \text{ mm}$ و قطر نمونه برابر 120 mm در نظر گرفته شد. نمونه لاستیکی مطابق شکل ۱ تحت آزمون فشار قرار گرفت. سختی لاستیک برابر 60 shore و داده‌های تنش و کرنش مطابق شکل ۲ به دست آمد. ضریب یانگ برای نمونه لاستیکی برابر $3/92 \text{ GPa}$ به دست آمد.



شکل ۱ آزمون فشار برای نمونه لاستیکی



شکل ۲ منحنی تنش کرنش مهندسی لاستیک حاصل از آزمایش کشش

ورق مورد کشش در این مقاله از جنس ST14 بوده برای تعیین نمودار تنش-کرنش از آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM E8 استفاده شد. خصوصیات به دست آمده طبق جدول ۱ استخراج شد.

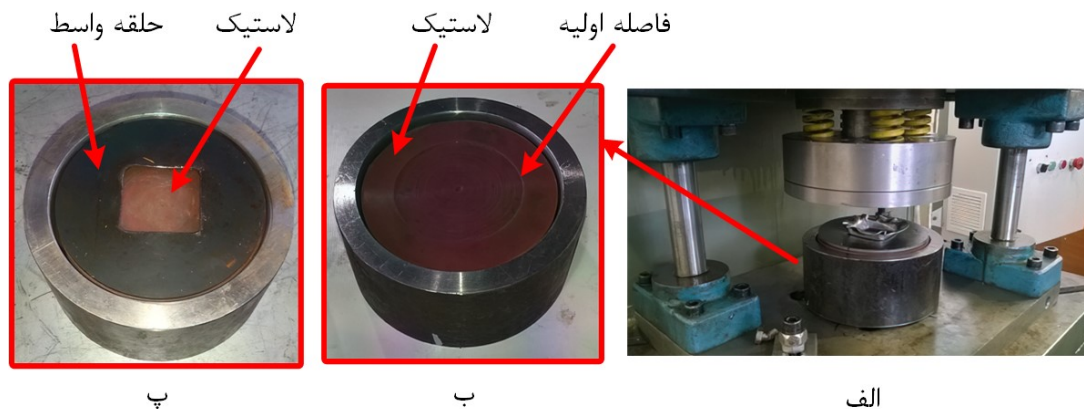
جدول ۱ خصوصیات مکانیکی فولاد ST14 به دست آمده از آزمون کشش

ماده	ضریب یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسان	$\sigma = k(\epsilon_p + \epsilon_0)^n$	
				K (MPa)	n
فولاد ST14	۲۰۰	۱۸۰/۳	۰/۲۹	۳۸۵/۸	۰/۲۳

۲-۲ قالب با ماتریس لاستیکی

در این مقاله برای قالب لاستیکی ماتریس آن از جنس سیلیکون ساخته شد. سنبه و ورق گیر با قالب فلزی مشترک می‌باشد. برای اعمال نیروی ورق گیر از چهار فنر استفاده شد. در شکل ۳ قالب با اجزای لاستیکی نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت نتایج توضیح داده خواهد شد. برای کنترل ورق از تکنیک حلقه واسط که در شکل ۳- پ نشان داده، استفاده شده است.

با پایین آمدن قالب، سطح ورق گیر و سنبه با ورق مماس شده و با حرکت سنبه از داخل ورق گیر، سنبه ورق را به داخل لاستیک فرو می برد. با افزایش پیشروی سنبه به داخل لاستیک، لاستیک به سمت مخالف حرکت سنبه، فشار وارد می کند. با افزایش فشار، ورق گیر نیز به سمت مخالف حرکت کرده و فضایی که تحت عنوان فاصله اولیه تعبیه شده بود را پر می کند. پس از آن، حلقه ثابت از حرکت بیش از حد ورق گیر جلوگیری می کند. وجود این فاصله که قابل تنظیم است، از فشار بیش از حد لاستیک در طی فرآیند کشش و نفوذ سنبه به داخل آن، کاسته و باعث افزایش عمق کشش و کاهش فشار وارد بر نمونه و در نتیجه جلوگیری از اعوجاج و عیب نازک شدگی می شود. فاصله اولیه اعمال شده به قطر 120 mm و عمق 2 mm بر روی لاستیک اعمال شد. فاصله اولیه ایجاد شده در شکل ۳- ب نشان داده شده است.



شکل ۳ قالب با ماتریس لاستیکی (الف) مجموعه قالب (ب) ماتریس بدون حلقه واسط (پ) ماتریس لاستیکی با حلقه واسط

۲-۳ قالب با ماتریس فلزی

در قالب فلزی، ماتریس لاستیکی با ماتریس فلزی جایگزین شد. مکانیزیم ورق گیر و سنبه مشابه قالب با ماتریس فلزی می باشد. در شکل ۴ قالب ساخته شده نشان داده شده است. با توجه به روش اعمال نیروی ورق گیر که روشی مرسوم در اعمال نیروی ورق گیر است؛ در مقایسه با قالب با ماتریس لاستیکی فشار بیشتری را به ورق وارد می کند و دلیل آن عکس العمل نیرویی است که از طرف ماتریس فلزی به ورق وارد می شود، است. پس می توان پیش بینی کرد که در این آزمایش ها در حالت سنتی، چروکیدگی کمتر از حالت لاستیکی اتفاق می افتد. لازم به ذکر است در هر دو حالت قالب با ماتریس لاستیکی و فلزی برای روان کاری بین ورق و ماتریس از روغن SAE20 به عنوان روان کار استفاده شد.

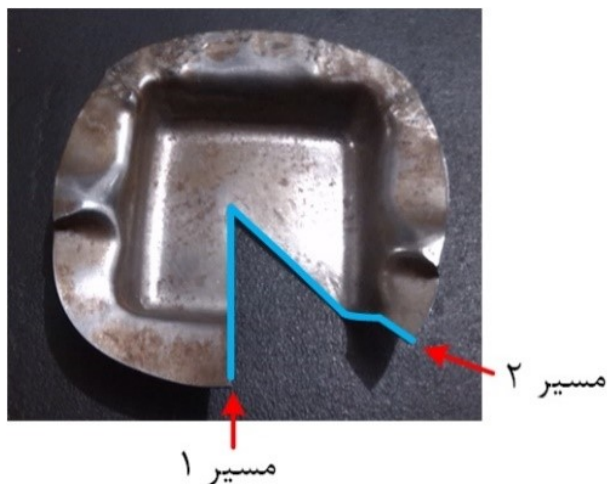


شکل ۴ قالب با ماتریس فلزی برای آزمون تجربی

۲-۴ روش اندازه گیری به صورت عملی

برای اندازه گیری نتایج نمونه های شکل داده شده مطابق شکل ۵ در دو مسیر برش داده شد. با توجه به اینکه در کار تجربی

تنها امکان اندازه‌گیری ضخامت قطعه بود در مسیرهای برش داده‌شده در نواحی مهم توسط میکرومتر با دقت 0.02 mm ضخامت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.



شکل ۵ مسیرهای برش داده جهت اندازه‌گیری ضخامت در کار تجربی

۳- شبیه‌سازی المان محدود

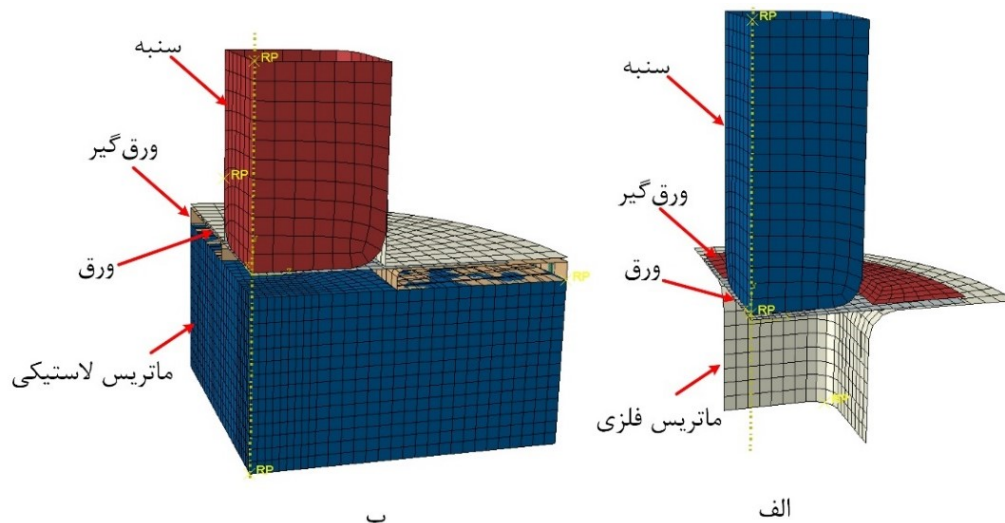
فرآیند کشش عمیق با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس ورژن ۶.۱۴ شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی به صورت سه‌بعدی و به دلیل تقارن در هندسه نمونه، قیدگذاری‌ها و شرایط مرزی، یک‌چهارم از مدل واقعی مدل شده است. لوح اولیه به صورت دایره‌ای و تغییرشکل‌پذیر و به صورت پوسته مدل شد. تمامی اجزای قالب از قبیل سنبه، ورق‌گیر و قالب به صورت صلب مدل‌سازی شده است. تحلیل انجام‌شده به صورت دینامیک صریح و در یک مرحله زمانی انجام شد. برای قالب با ماتریس لاستیکی مشابه ماتریس فلزی شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شد. لاستیک به صورت هایپرلاستیک مونی-ریویل^۵ در آباکوس مدل شد. برای المان‌بندی مطابق جدول ۲ المان‌ها انتخاب شد. عدم وابستگی به مش‌بندی با در نظر گرفتن مقدار انرژی کرنشی انجام شد و در نهایت تعداد المان مطابق جدول ۲ انتخاب شد. لازم به ذکر است در نرم‌افزار آباکوس داده‌های مربوط به منحنی تنش-کرنش لاستیک وارد شد و ثوابت مدل مونی-ریویل توسط نرم‌افزار آباکوس محاسبه و در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. در شکل ۶ مدل‌های قالب با ماتریس لاستیکی و فلزی نشان داده شده است. در هر دو مدل ورق‌گیر در تمام جهات مقید شده است. سنبه در تمام جهات به جز راستای عمودی مقید شده و در راستای عمودی جابجایی 10 mm به صورت خطی نسبت به زمان جابجایی اعمال شد. بر روی لبه ورق قید تقارن در نظر گرفته شد. تماس سطح به سطح برای تمام سطوح درگیر تعریف شد. بین ورق و ورق‌گیر ضریب اصطکاک 0.1 تعریف شد. بین لاستیک و ورق با در نظر گرفتن روغن کاری ضریب اصطکاک 0.07 و بین ورق و ماتریس فلزی ضریب اصطکاک 0.05 در نظر گرفته شد.

جدول ۲ نوع المان اجزاء قالب در مدل المان محدود مورد استفاده در دو قالب

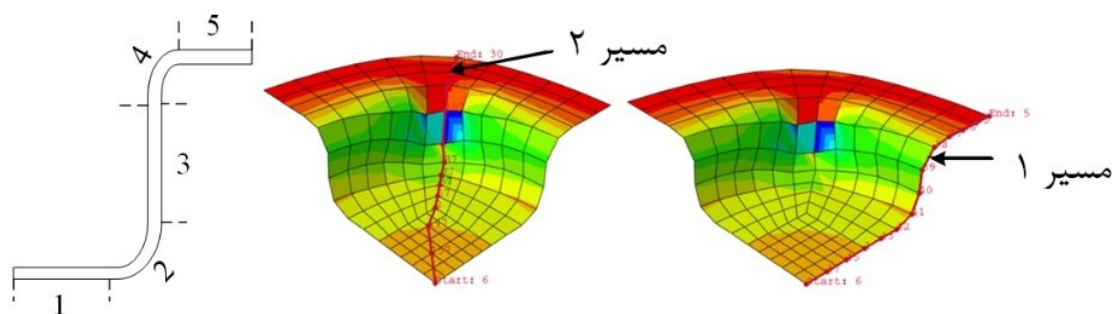
تعداد المان	نوع المان	نوع	نام قطعه
۳۱۸	R3D4	صلب	سنبه
۷۷۰	C3D8RH	تغییر شکل‌پذیر	لاستیک
۱۴۰	S4R	تغییر شکل‌پذیر	ورق
۴۲۰	R3D4	صلب	محفظه لاستیک
۲۴۷	R3D4	صلب	ورق‌گیر
۳۲۰	R3D4	صلب	حلقه وسط
۸۰	R3D4	صلب	ماتریس فلزی

⁵ Mooney – Rivlin Hyperelastic

در این مقاله برای اینکه بتوان نتایج را در دو حالت قالب با هم مقایسه کرد دو مسیر مطابق شکل ۷ تعریف شد. برای مقایسه دقیق تر با نتایج تجربی مسیر تعریف شده به ناحیه مطابق شکل تقسیم بندی شد.



شکل ۶ مدل سه بعدی شبیه سازی شده با الف) ماتریس فلزی ب) ماتریس لاستیکی



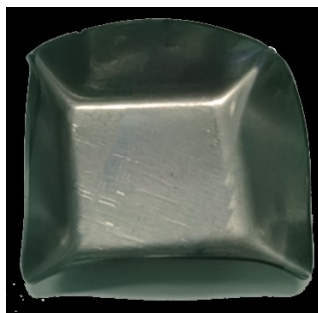
شکل ۷ مسیره های تعریف شده و تقسیم بندی مسیره ها برای تحلیل نتایج

۴- نتایج

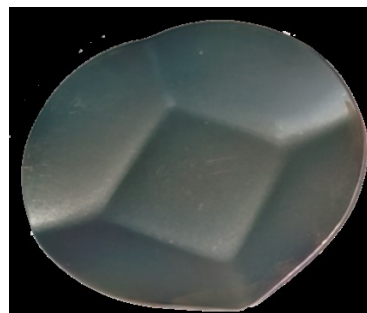
در آزمایش تجربی کشش با ماتریس لاستیکی نتایجی مشاهده شد که منجر به پیشنهاد استفاده از حلقه واسط شد که سبب بهبود در کیفیت کشش با ماتریس لاستیکی شد. از این رو در ادامه ابتدا به این مطلب اشاره می شود.

۴-۱- آزمایش تجربی با ماتریس لاستیکی

در آزمایش تجربی با ماتریس لاستیکی در ابتدا قطر لوح اولیه برابر 80 mm و ضخامت اولیه 0.7 mm ورق فولادی در نظر گرفته شد. در این حالت مقدار فاصله اولیه که بیشتر به آن اشاره شده است برابر 3 mm در نظر گرفته شد و عمق کشش برابر 10 mm در نظر گرفته شد. با این تنظیمات ورقی شکل داده شد. در شکل ۸- الف ورق شکل داده حاصل از اولین آزمون نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود پس از بدست آمدن اولین نمونه، مشاهده شد که نمونه بطور کامل تحت اثر نیرو قرار نگرفته و شکل دهی بطور ناقص انجام شده است با بررسی وضعیت لاستیک و محدوده اثر روی ورق این نتیجه حاصل شد که به دلیل انعطاف لاستیک، فشار و نیروی لازم برای شکل دهی ورق ایجاد نشده است. برای رفع این مشکل، پیشروی پرس به داخل لاستیک بیشتر در نظر گرفته شد تا فضای خالی که در هنگام فشار سنجه، لاستیک ایجاد می کند، پر شود. همچنین مقدار فاصله اولیه بر روی لاستیک به 2 mm تغییر داده شد. پس از تصحیح این مسئله قطعه نشان داده شده در شکل ۸- ب ایجاد شد.



ب



الف

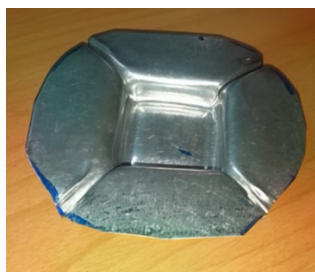
شکل ۸ نمونه فولاد بدست آمده (الف) از اولین آزمایش (ب) دومین آزمایش

همان‌طور که در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود با اصلاح مقدار عمق کشش تا حدودی شکل‌دهی بهتر شد اما لاستیک نتوانسته گوشه‌های نمونه مربعی را شکل دهد. از آنجاکه فشار لاستیک به حد بالایی رسیده بود نمی‌توان گفت که سختی لاستیک کافی نبوده، به همین دلیل برای رفع این مشکل، تصمیم به کاهش ضخامت ورق از 0.7 mm به 0.2 mm گرفته شد که با توجه به ورق در دسترس جهت آزمایش اولیه، از ورق برنج استفاده شد. در شکل ۹ نمونه برنجی با ضخامت 0.2 mm نشان داده شده است.



شکل ۹ نمونه ورق برنجی در آزمون سوم

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در این آزمایش باز هم نمونه مطلوب و مورد نظر حاصل نشد. مشکل نمونه این بود که به دلیل فشار زیاد لاستیک و ضخامت کم ورق، نمونه روی خودش پرس شده بود. از این آزمایش، نتیجه گرفته شد که سختی لاستیک آن قدر کم نیست که نتواند ورق را شکل دهد. با توجه به نمونه اول که عیب آن گوشه‌های شکل نگرفته بود، سعی بر رفع مشکل نمونه با همان ضخامت 0.2 mm شد. در ادامه و آزمون ۴، قطر لوح اولیه از 80 mm به 120 mm افزایش داده شد. با افزایش قطر لوح اولیه سعی شد تا فضای لازم برای شکل‌دهی فراهم شود. در شکل ۱۰ نمونه شکل داده شده برای آزمون ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مشکل پرس شدن نمونه و همچنین عمق کشش حل شده ولی در گوشه‌ها مشکل جریان بیش‌ازحد ورق وجود دارد که منجر به شکل‌دهی نامناسب در گوشه‌ها شده است. جریان نامناسب ورق به علت توزیع نامناسب نیروی ورق‌گیر می‌باشد.



ب

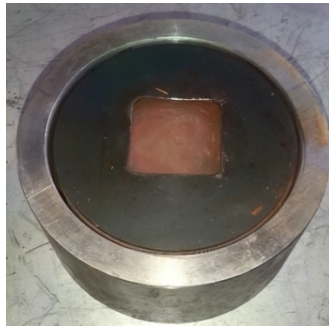


الف

شکل ۱۰ نمونه فولادی به‌دست‌آمده از آزمون ۴ و افزایش قطر اولیه لوح اولیه (الف) نمای پشت (ب) نمای روبرو

برای یکنواخت کردن نیروی ورق‌گیر، از یک قطعه واسطه بین لاستیک و ورق استفاده شد که ورق واسطه با ضخامت 2 mm

با مقطع گرد که مساحت لاستیک را پوشش دهد و سوراخ مربعی در وسط ایجاد شد. در شکل ۱۱ حلقه واسط تعبیه شده بر روی ماتریس نشان داده شده است.



شکل ۱۱ حلقه ماتریس لاستیکی با حلقه واسط

با به کارگیری این تکنیک حلقه آزمایش دیگری انجام شد. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از قطعات شکل داده شده به این تکنیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با به کارگیری حلقه واسطه بین لاستیک و ورق، تمرکز نیرو، یکنواخت‌تر و چروکیدگی از گوشه‌ها به قسمت فلنج نمونه انتقال یافته است. همچنین عمق کشش و سایر مشخصات قطعه قابل قبول می‌باشد.



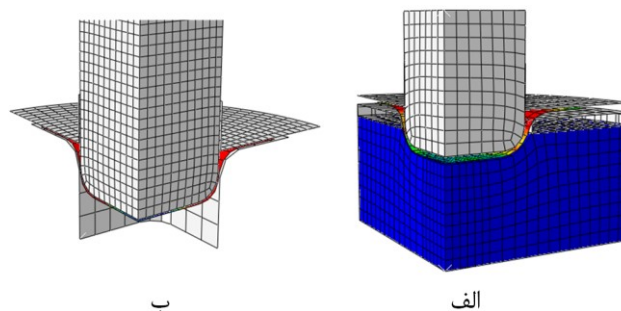
شکل ۱۲ نمونه فولادی شکل داده شده با قالب ماتریس لاستیکی و دارای حلقه واسطه

۲-۴ آزمایش تجربی با ماتریس فلزی

در این مقاله نمونه‌هایی با قالب با ماتریس فلزی شکل داده شد. با توجه به اینکه بر اساس روش استاندارد و متعارف طراحی شده بود؛ شکل‌دهی انجام شد.

۴-۳ مقایسه شکل ظاهری نمونه‌های شبیه‌سازی شده و کار تجربی

در شکل ۱۳ نمونه‌ای از شبیه‌سازی با قالب لاستیکی و فلزی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ورق به شکل مورد نظر در هر دو قالب به شکل مورد نظر شکل داده است.

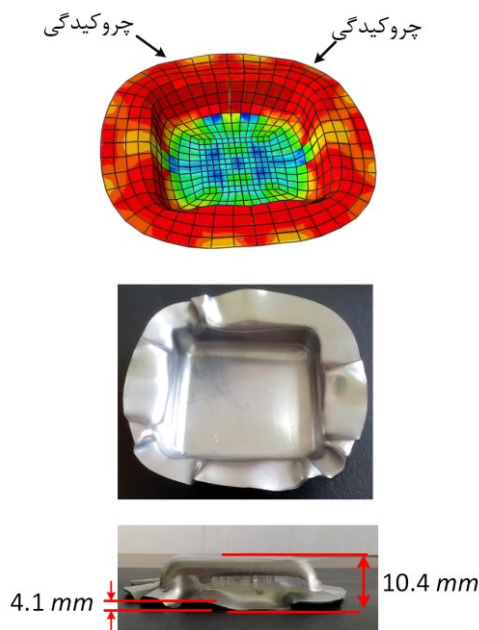


شکل ۱۳ نمونه‌ای از شبیه‌سازی انجام شده (الف) با ماتریس لاستیکی (ب) با ماتریس فلزی

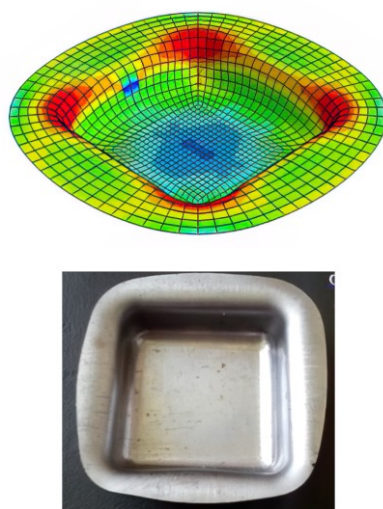
در شکل ۱۴ نمونه‌ای از قطعه شکل داده و شبیه‌سازی شده با ماتریس لاستیکی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه فلنج هم در شبیه‌سازی و هم در کار تجربی چروکیدگی مشاهده می‌شود. عمق کشش برابر $10/4 \text{ mm}$ و بیشینه

ارتفاع چروکیدگی برابر $4/1 \text{ mm}$ می‌باشد. در شبیه‌سازی بیشینه چروکیدگی برابر $2/8 \text{ mm}$ و ارتفاع به‌دست‌آمده برابر $10/3 \text{ mm}$ می‌باشد. از دلایل تفاوت متقارن فرض کردن فرآیند و همچنین همسانگرد فرض کردن ماده می‌باشد. از طرفی در کار تجربی موقعیت‌دهی لوح اولیه به‌صورت دقیق در وسط سنبه امکان‌پذیر نبود در نتیجه اختلافاتی با نتایج شبیه‌سازی اتفاق افتاد.

در شکل ۱۵ نمونه از قطعه شکل داده و شبیه‌سازی شده با ماتریس فلزی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقایسه با نمونه شکل داده شده با ماتریس لاستیکی چروکیدگی در آن رخ نداده است. علت این تفاوت را می‌توان به علت نیروی بیشتر ورق‌گیر به دلیل صلب‌تر بودن ماتریس در مقایسه با لاستیک برشمرد. همچنین نتایج شبیه‌سازی و نمونه شکل داده شده به‌صورت ظاهری شبیه هم هستند.



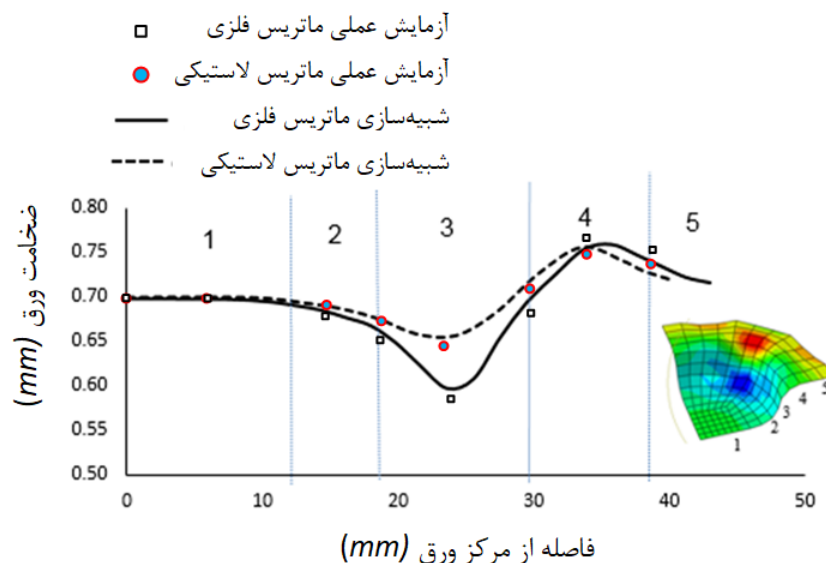
شکل ۱۴ نمونه شکل داده شده و شبیه‌سازی شده با قالب لاستیکی



شکل ۱۵ نمونه شکل داده و شبیه‌سازی شده با قالب فلزی

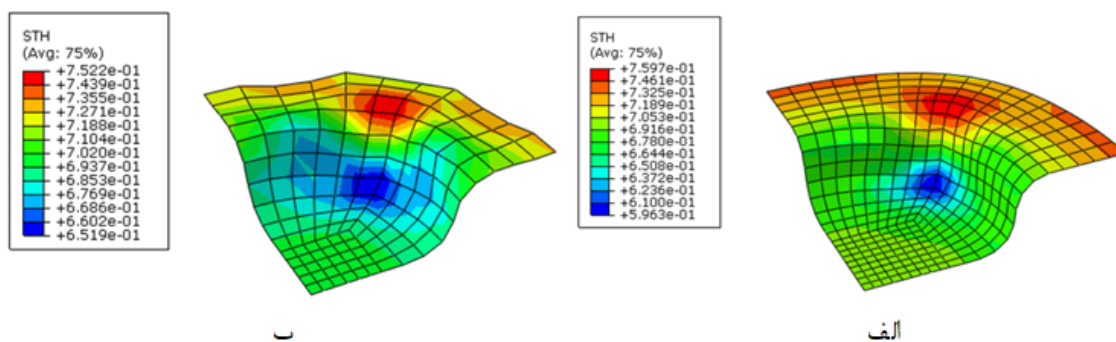
در شکل ۱۶ نازک‌شدگی بر روی مسیر ۱ مطابق شکل ۶ برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده و تجربی با ماتریس فلزی و لاستیکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که مقدار نازک‌شدگی در نمونه‌ای که با ماتریس فلزی شکل داده شده بیشتر

از نمونه‌ای است که با ماتریس لاستیکی شکل داده شده است. همان‌طور که بیان شد، بیشترین مقدار نازک‌شدگی که در نمونه با ماتریس لاستیکی اتفاق افتاده است، ۷ درصد و بیشترین مقدار نازک‌شدگی در نمونه با ماتریس فلزی، ۱۴/۸ درصد است که افزایش دو برابری داشته است.



شکل ۱۶ مقایسه نازک‌شدگی در دو حالت ماتریس فلزی و لاستیکی ورق ST14

در شکل ۱۷ کانتور توزیع ضخامت برای شبیه‌سازی با ماتریس لاستیکی و فلزی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین نازک‌شدگی در روش شکل‌دادن با ماتریس فلزی، در ناحیه گوشه نمونه اتفاق افتاده است ولی در نمونه‌ای که با ماتریس لاستیکی شکل داده شده است این ناحیه به دیواره‌ها نیز سرایت کرده است. دلیل تفاوت در توزیع ضخامت تفاوت در نیروی ورق‌گیر در دو روش است همان‌طور که انتظار می‌رود نیروی ورق‌گیر در نمونه شکل‌داده‌شده با ماتریس فلزی به علت صلبیت بیشتر ماتریس فلزی در مقایسه با ماتریس لاستیکی بیشتر می‌باشد این نیروی بیشتر سبب نازک‌شدگی بیشتر در نمونه شکل‌داده‌شده با ماتریس فلزی می‌شود.

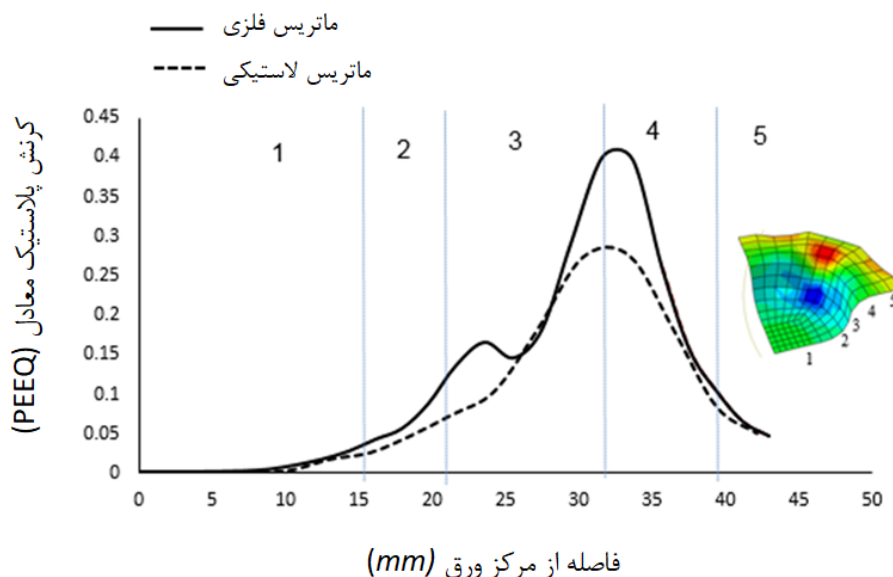


شکل ۱۷ توزیع ضخامت نمونه فولادی با ضخامت اولیه ۰/۷mm برای شبیه‌سازی با (الف) ماتریس فلزی (ب) ماتریس لاستیکی

۴-۴ کرنش پلاستیک معادل

کرنش پلاستیک معادل نشان دهنده مقدار تغییر شکل ماده می‌باشد و معیاری برای مقایسه مقدار تغییر شکل می‌باشد. در شکل ۱۸ توزیع کرنش بر روی مسیر نشان داده‌شده برای دو حالت ماتریس فلزی و لاستیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه لبه فلنج و دیواره مقدار کرنش پلاستیک معادل بیشتری را در حالت ماتریس فلزی را نشان می‌دهد. با افزایش درصد کرنش پلاستیک معادل رابطه مستقیم با افزایش درصد نازک‌شدگی دارد. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های

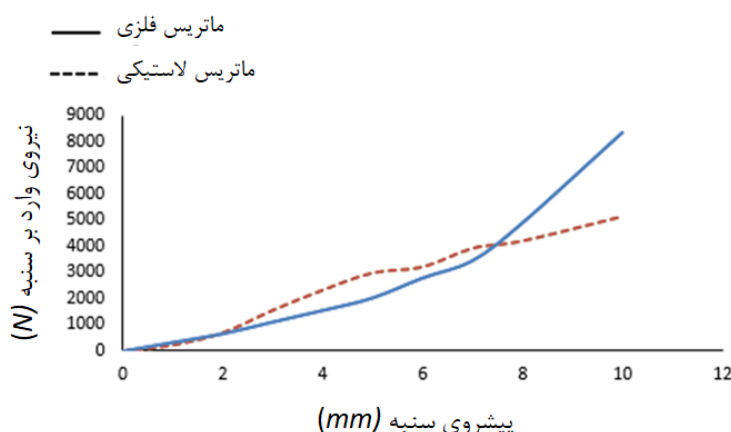
شکل داده شده با روش قالب فلزی، این مقدار به ۴۰ درصد و در نمونه شکل داده شده با ماتریس لاستیکی، ۲۸ درصد است که این تفاوت، در مقدار نازک شدگی نیز مشاهده می شود.



شکل ۱۸ توزیع کرنش پلاستیک در شبیه سازی برای ماتریس فلزی و لاستیکی

۴-۵ نیروی وارد بر سنبه

در شکل ۱۹، مقدار نیرویی که در طی فرآیند شکل دهی به سنبه وارد می شود نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود. تا پیشروی ۲mm نیروی هر دو ماتریس یکی می باشد علت این پدیده وجود فاصله اولیه ۲mm لاستیک تحت فشار قرار نگرفته است و تنها بر مقاومت ورق غلبه می شود. در ادامه در بازه ۲ تا ۷/۵ میلی متر به علت اینکه لاستیک باید حرکتی در خلاف جهت سنبه انجام دهد نیرو شکل دهی ماتریس لاستیکی بیشتر از ماتریس فلزی است در انتهای فرآیند با توجه به اینکه در حالت استفاده از ماتریس فلزی نیروی ورق گیر بیشتر است و جریان ورق سخت تر انجام می شود نیروی شکل دهی در حالت ماتریس لاستیکی کمتر می باشد.



شکل ۱۹ نیروی شکل دهی بر حسب پیشروی سنبه برای شبیه سازی قالب با ماتریس فلزی و لاستیکی

۵- جمع بندی

در این مقاله فرآیند کشش عمیق مقطع مربعی به صورت عددی و تجربی برای دو قالب با ماتریس فلزی و لاستیکی انجام شد. نتایج شبیه سازی توسط آزمایش تجربی برای ورق فولادی صحت سنجی شد. برای دو قالب با ماتریس فلزی و لاستیکی عیوبی از قبیل نازک شدگی، چروکیدگی و همچنین نیروی شکل دهی با هم مقایسه شد و نتایجی به شرح ذیل حاصل شد.

- استفاده از یک واسطه بین ورق و لاستیک در قالب با ماتریس لاستیکی، باعث بهبود شرایط کشش می شود.
- در نتایج شبیه سازی و تجربی، ارتفاع چروکیدگی در نمونه فولاد با ماتریس لاستیک ۴,۱ mm و در روش با ماتریس فلزی، بدون چروکیدگی است.
- حداکثر درصد نازک شدگی در نمونه فولاد که با روش لاستیکی اتفاق افتاده است ۷ درصد و در نمونه فولاد که با ماتریس فلزی شکل داده شده است، ۱۴,۸ درصد است.
- حداکثر درصد کرنش پلاستیک معادل در نمونه فولاد که با روش لاستیکی اتفاق افتاده است ۲۸ درصد و در نمونه فولاد که با ماتریس فلزی شکل داده شده است، ۴۰ درصد است.
- با تغییر ماتریس لاستیکی به ماتریس فلزی، نیروی وارد به سنبه ۶۲ درصد افزایش می یابد.

۶- مراجع

- [1] Mazdak S, Naeni H M, Sheykhosslami M R, Kiuchi M, Validi H. The effect of the roller profile on cave-in defect in reshaping process by considering nonlinear combine strain hardening. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2022;236:509-521.
- [2] Abdolazimzadeh S, Mazdak S, Sharifi E, Sheykhosslami M R. The Prediction of Weld Line Movement in Deep Drawing of Tailor Welded Blanks. Journal of Stress Analysis. 2018;3:1-10.DOI: 10.22084/jrstan.2018.15948.1045.
- [3] Kamalvand E, Jabbari A, Sheykhosslami M R, Mazdak S, Beygi R, Mohammadi S. Effect of friction stir welding parameters on the deep drawing of tailor-welded blanks (TWBs). CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021;33:91-99.
- [4] Besheli S M, Mazdak S, Golmakani H, Sharifi E, Sheykhosslami M. Numerical and experimental investigation of deep drawing process in square section of single-layer and two-layer sheets. Iranian Journal of Materials Forming. 2018;5:58-70.
- [5] Golmakani H, Moradi Besheli S, Mazdak S, Sharifi E. Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square sections two layers sheet with rubber matrix. Modares Mechanical Engineering. 2016;16:79-87.
- [6] Sheykhosslami M, Cinquemani S, Mazdak S. Numerical study of the of ultrasonic vibration in deep drawing process of circular sections with rubber die. SPIE. 2018.
- [7] Irthia I, Green G, Hashim S, Kriama A. Experimental and numerical investigation on micro deep drawing process of stainless steel 304 foil using flexible tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014;76:21-33.
- [8] Ramezani M, Ripin Z M, Ahmad R. Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2010;3:196-203.
- [9] Yamashita M, Hattori T, Kuwahara K. Circular Cup Drawing of Magnesium Alloy Sheet under Cold Condition Using Rubber Tool and Improvement of Surface Appearance. In Materials Science Forum. 2014;773;646-652.
- [10] Liu Y, Hua L, Lan J, Wei X. Studies of the deformation styles of the rubber-pad forming process used for manufacturing metallic bipolar plates. Journal of Power Sources. 2010;195:8177-8184.

- [11] Peng L, Hu P, Lai X, Mei D, Ni J. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process—simulation and experiments. *Materials & design*. 2009;30:783-790.
- [12] Thiruvarudchelvan S, Sritharan T. Properties of hemispherical cups drawn using a flexible tool. *Journal of materials processing technology*. 2003;134:310-317.
- [13] Younis K M, Jaber A S. Experimental and theoretical study of square deep drawing. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011;29:2456-2467.