مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1394، دوره 15، شماره 4، ص‌ص 177-187

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی و شبیه سازی پارامترهای مؤثر در شکل دهی قطعات دو پله ای و بهینه سازی ابعاد ورق اولیه

رضا موسوی پور[1]، عبدالحمید گرجی[2*]، محمد بخشی[3]، قربان محمد علی‌نژاد[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
4- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
* بابل، صندوق پستی 71167- 47148، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 آذر 1393
پذیرش: 11 بهمن 1393
ارائه در سایت: 06 اسفند 1393

کلید واژگان:
هیدروفرمینگ ورق
محفظه روغن خودرو
قطعات دو پله ای
هیدرودینامیکی فشار شعاعی
بهینه سازی

چکیده

تولید قطعات ورقی فلزی دو پله‌ای در صنایع امری دشوار و پیچیده تلقی می‌شود. محفظه روغن خودرو از جمله قطعات دو پله‌ای است که در صنعت خودروسازی جز، قطعات پیچیده محسوب می‌شود که تولید آن با روش‌های سنتی با مشکلات زیادی همراه می‌باشد. در این مقاله، قابلیت شکل‌پذیری این قطعات به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شده است که می‌توان محفظه روغن خودرو را در طی یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ با موفقیت شکل داد. بعلاوه، اثر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت و پرشدگی قالب، تاثیر پارامترهای هندسی مانند شعاع گوشه سنبه و ارتفاع پله بر روی نازک‌شدگی و نیز تعیین شکل بهینه ورق اولیه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. این نتیجه حاصل شد که با انتخاب فشار شکل‌دهی مناسب می‌توان شکل‌پذیری را بهبود بخشید و میزان پرشدگی قالب را افزایش داد. با بررسی تاثیر شعاع گوشه سنبه مشاهده شد که با افزایش شعاع گوشه سنبه، حداکثر نازک‌شدگی کاهش و توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. با افزایش ارتفاع پله، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش می‌یابد و هر چه ارتفاع پله کاهش داده شود، موقعیت نازک‌شدگی به سمت پله دوم جابه‌جا می‌شود. همچنین با بهینه‌سازی ورق اولیه این نتیجه حاصل شد که بهینه‌سازی شکل ورق اولیه تاثیر زیادی بر روی جریان مواد و تاخیر در پارگی خواهد داشت.

Experimental and Numerical Study of Effective Parameters in Forming of Double-Stepped Parts and Optimization of the Initial Blank Shape

Reza Mousavipoor, Abdolhamid Gorji*, Mohammad Bakhshi, Ghorban Mohammad Alinejad

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 December 2014
Accepted 31 January 2015
Available Online 25 February 2015

Keywords:
Sheet hydroforming
Crankcase
double-stepped parts
hydrodynamic radial pressure
optimization

ABSTRACT

Production of double-stepped metal sheet parts is considered a complex and difficult task in industries. The crankcase is such a complex double-stepped part for the automobile industry and its production with traditional methods is associated with many problems. In this paper, the formability of this stepped part has been studied experimentally and by simulation using hydrodynamic deep-drawing with radial pressure. It is shown that the crankcase can be formed successfully in one step by the hydroforming process. Moreover, the effect of fluid pressure on the thickness distribution and die filling and the effect of geometric parameters such as punch corner radius and the height of the steps on the thinning, and also optimal shape design of the original blank were investigated. The study showed that choosing the correct forming pressure can improve formability and increase the amount of die filling. It is also illustrated that by increasing the punch corner radius, the maximum thinning is reduced and the thickness distribution is improved and, by increasing the height of the steps, thinning in the wall of the first step and the punch corner radius increase; by decreasing the height of the steps, thinning position will be shifted toward the second step. Also, by optimizing the original blank, it has been concluded that the optimization of the shape of original blank has a major impact on the material flow and will delay the sheet rupture.

1- مقدمه

کشش عمیق به فرآیند تبدیل گرده فلزی اولیه (بلانک) به حجم‌های توخالی و یا به فرآیند تبدیل گرده به شکلی مرتفع در جهت عمق، بدون هرگونه چروکیدگی و یا پارگی، اطلاق می‌شود [1]. در فرآیند کشش عمیق، یک ورق گیر لبه ورق را به ماتریس فشار داده و آن را محکم نگه می‌دارد. همزمان با آن، سنبه کشش، ورق را به داخل ماتریس کشانده و یک قطعه توخالی بوجود

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
R. Mousavipoor, A. Gorji , M. Bakhshi, Gh. M. Alinejad, Experimental and Numerical Study of Effective Parameters in Forming of Double-Stepped Parts and Optimization of the Initial Blank Shape, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 4, pp. 177-187, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]

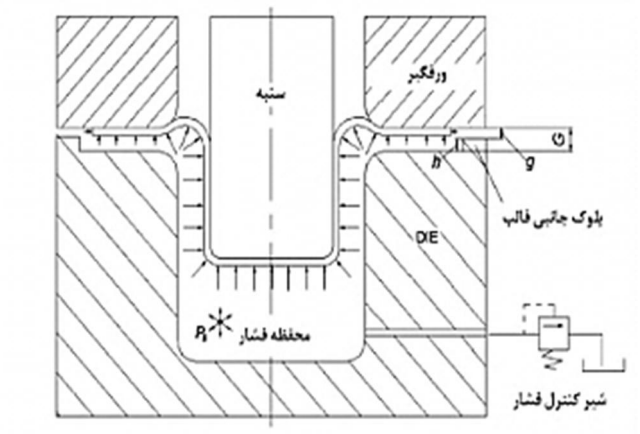
می‌آید. فرآیند هیدروفرمینگ ورق از فرآیندهای متداول کشش ورق بوده که قبل از جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در تولید قطعات خودرو و بدنه هواپیما در سال 1980 مورد استفاده قرار گرفت [2]. در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ از فشار سیال برای شکل‌دهی ورق استفاده می‌شود. در این فرآیند، همزمان با حرکت سنبه به داخل حفره قالب، سیال درحفره قالب فشرده شده و به ورق نیرو وارد می‌کند. در اثر نیروی وارد شده، ورق شکل سنبه را به خود می‌گیرد.

فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یکی از انواع فرآیندهای هیدروفرمینگ است که دارای مزایای زیادی از جمله استفاده از ابزاربندی ساده‌تر، عدم نیاز به آب بند و افزایش در میزان شکل‌پذیری ورق است. شکل 1 شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را نشان می‌دهد [3]. در این فرآیند وقتی سنبه به سمت پایین (حفره قالب) حرکت می‌کند، مایع در حفره قالب فشرده شده و ورق را محکم به سطح سنبه می‌چسباند. با توجه به عدم استفاده از آب بند مقداری از مایع در حفره قالب از فاصله بین ورق‌گیر و قالب به صورت دینامیکی به بیرون می‌ریزد. چون لقی بین ماتریس و ورق‌گیر (گپ[1]) خیلی کوچک است، مایع کمی از این فاصله به خارج جریان یافته در نتیجه از طرف سیال بر لبه ورق فشار اعمال می‌شود. فشار شعاعی در این فرآیند می‌تواند نیروی کشش را کاهش و نسبت کشش را افزایش دهد [4]. از مزایای دیگر این فرآیند می‌توان به شکل‌دهی قطعات پیچیده، کیفیت سطح خوب، نسبت کشش بیشتر و دقت ابعادی بالا اشاره کرد [4]. در این پژوهش با توجه به مزایای زیاد فرآیند هیدروفرمینگ هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، برای شکل‌دهی قطعه دوپله استفاده شده است.

قطعات ورقی پله‌ای[2] از جمله قطعات پیچیده هستند که توسط فرآیند های شکل‌دهی تولید می‌شوند. این گونه قطعات دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف بخصوص صنعت خودروسازی می‌باشند. از جمله کاربردهای این قطعات می‌توان به محفظه روغن خودرو (کارتر) و در مواردی باک بنزین اشاره نمود. در تولید این گونه قطعات از روش‌های متداول سنتی همانند استمپینگ[3] استفاده می‌شود. در تولید به روش سنتی، بدلیل پیچیدگی هندسه، دست‌یابی به توزیع ضخامت یکنواخت و کیفیت بالای تولید، امری بسیار دشوار می‌باشد. تولید قطعه با این روش‌ها نیاز به چندین مرحله شکل دهی می‌باشد. با استفاده از روش‌های جدید در تولید این گونه قطعات ورقی، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و کیفیت بالاتر قابل دست‌یابی است.

در قطعات پله‌ای با توجه به پیچیده بودن هندسه و اختلاف اندازه در طول و عرض، شکل‌دهی یک قطعه سالم با پرشدگی کامل در گوشه‌ها، مشکل می‌باشد و سبب تمایز آن با انواع دیگر قطعات ورقی می‌شود. در این مقاله به بررسی امکان شکل‌گیری قطعات مستطیلی دوپله پرداخته می‌شود. تعریف هندسه مستطیلی، شکل‌گیری و پرشدگی قالب در گوشه‌ها را دشوار می‌سازد.

در تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه توسط محققان [5]، قطعه دو پله تعریف شده، با استفاده از روش هیدروفرمینگ در طی سه مرحله با موفقیت شکل گرفت، اما محققان موفق به شکل‌دهی کامل قطعه در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ نشده‌اند. در این تحقیق به بررسی شکل‌پذیری کامل قطعه در طی یک مرحله پرداخته می‌شود.



شکل 1 شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [3]

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات پله‌ای (دوپله) تحقیقات محدودی انجام گرفته است. کیم و همکاران [5] شکل‌دهی یک قطعه مستطیلی پله‌ای را در فرآیند هیدروفرمینگ چند مرحله‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. این محققان در ابتدا قطعه را در سه مرحله شبیه‌سازی کرده و شکل‌پذیری قطعه را مورد آزمایش قرار دادند. با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که با بکارگیری روش هیدروفرمینگ سه مرحله‌ای، نازک‌شدگی در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد. در ادامه، شکل‌دهی تک مرحله‌ای قطعه مذکور را بررسی و مشاهده کردند که با توجه به پیچیدگی هندسه تعریف شده، بدلیل نازک‌شدگی شدید در ناحیه شعاع سنبه، قطعه دچار پارگی خواهد شد. همچنین آنان به این نتیجه رسیدند که با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ سه مرحله‌ای، حداکثر نازک‌شدگی در نواحی بحرانی به مقدار 6 درصد کاهش می‌یابد.

ئو و همکاران [6] شکل‌دهی یک فنجان پله‌ای (دوپله) را در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. این محققان شکل‌پذیری قطعه را در ارتفاع‌های پله 20، 10و 40 میلی‌متر در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در فشار بیشینه 25 مگاپاسکال، با افزایش ارتفاع پله به اندازه 40 میلی‌متر، قطعه دچار پارگی می‌شود. اما در فشار بین 25 تا 46 مگاپاسکال، بدلیل افزایش سطح تماس بین ورق و سنبه، قطعه با موفقیت و بدون پارگی شکل می‌گیرد. این محققان با بررسی تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت دریافتند که در ارتفاع پله 10 و 20 میلی‌متر، تغییرات نازک‌شدگی مانند یک فنجان ساده (بدون پله) می‌باشد و حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع فصل مشترک پله ایجاد می‌شود. اما با افزایش ارتفاع تا 40 میلی‌متر، حداکثر نازک-شدگی در ناحیه شعاع و دیواره پله اول (پله‌پایینی) رخ می‌دهد.

کوین و همکاران [7] یک بررسی عددی از پارامترهای طراحی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی برای فنجان پله‌ای (دوپله) انجام دادند. این محققان در شبیه‌سازی عددی، در ابتدا شکل‌پذیری ورق را برای پرشدگی کامل، مطابق با هندسه تعریف شده مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که در طی شکل‌دهی فنجان پله‌ای، به منظور شکل‌گیری کامل ورق، فشار بیشینه باید در ناحیه فصل مشترک بین پله‌ها اعمال گردد تا ورق شکل کامل سنبه را در این ناحیه به خود بگیرد. این محققان با بررسی توزیع ضخامت نمونه در مسیر فشارهای مختلف به این نتیجه رسیدند که بیشترین نازک‌شدگی در یک ارتفاع پله مشخص، در ناحیه شعاع سنبه و در فصل مشترک پله اول و دوم اتفاق می‌افتد.

1- Gap
2- Stepped sheet parts
3- Stamping

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]

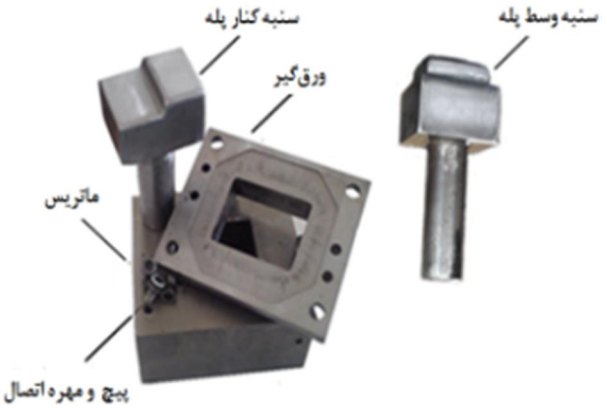
کانگ و همکاران [8] یک مطالعه مقایسه‌ای از فرآیندهای هیدروفرمینگ و استمپینگ برای شکل‌دهی مخزن سوخت خودرو با استفاده از تحلیل المان محدود انجام دادند. این محققان علاوه بر مقایسه فرآیند هیدروفرمینگ و استمپینگ، به بررسی تاثیر فشار شکل‌دهی بر روی پرشدگی قالب و توزیع ضخامت پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش فشار شکل‌دهی، بدلیل چسبندگی بیشتر ورق به سنبه، میزان پرشدگی قالب در گوشه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نازک‌شدگی در نواحی مختلف قطعه شکل گرفته به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار شکل‌دهی، نازک‌شدگی در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه فرآیند استمپینگ و هیدروفرمینگ نشان داده شد که با به‌کارگیری فرآیند هیدروفرمینگ، نازک‌شدگی به میزان 12 درصد کاهش می‌یابد.

شیم و همکاران [9] از روش آنالیز حساسیت برای بهینه‌سازی شکل ورق اولیه استفاده نمودند. محققین یاد شده جهت بررسی روش ارایه شده، بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه را در قطعات با سطح مقطع مربعی، شبدر مانند وL شکل مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که با توجه به هندسه قطعات تعریف شده، در طی چند مرحله می‌توان بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه را انجام داد.

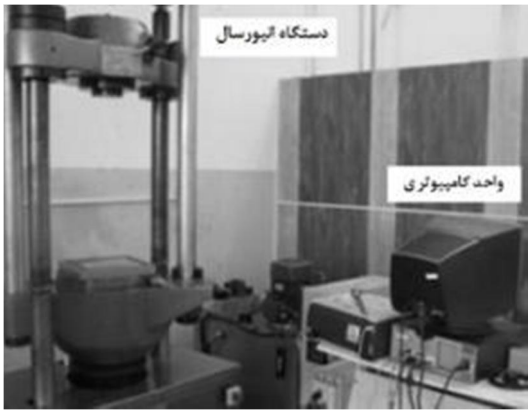
2- مراحل آزمایشگاهی

مجموعه قالب استفاده شده در این تحقیق، از سنبه، ماتریس و ورق‌گیر تشکیل شده است. شکل 2 مجموعه قالب استفاده شده را نشان می‌دهد. در مراحل ساخت قالب، به منظور افزایش دقت همراستایی سنبه و ورق‌گیر، از راهنما استفاده شده که بر روی ورق‌گیر نصب شده است. در شکل 3 دستگاه انیورسال و سیستم کامپیوتری متصل به آن نشان داده شده است. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده و سرعت آن تا $200\ mm.min^{-1}$ قابل تغییر می‌باشد. آزمایش‌ها در سرعت $150\ m.min^{-1}$ انجام شده است. برای تامین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی استفاده گردیده است که قابلیت اعمال فشار تا حداکثر 50 مگاپاسکال را دارد.

ورق استفاده شده از جنس فولاد st13 می‌باشد که مشخصات و خواص آن در جدول 1 آمده است. به منظور آزادسازی تنش‌های پسماند، یکنواختی ساختار و افزایش شکل‌پذیری، عملیات آنیل‌کاری بر روی ورق اولیه انجام شد. برای انجام این عملیات، با توجه به جنس مورد نظر برای ورق، دمای آستنیته 700 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان نگه‌داری 30 دقیقه در نظر گرفته شده



شکل 2 مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل 3 دستگاه آزمایش انیورسال و سیستم کامپیوتری متصل به آن

است. با توجه به مقدار ناچیز بدست آمده برای ضریب ناهمسانگردی، ورق به صورت همسانگرد در نظر گرفته شده است. در شکل 4 نمودار تنش- کرنش حقیقی ورق مورد استفاده نشان داده شده است.

به منظور بررسی شکل‌پذیری قطعات پله‌ای، از مسیر فشار نشان داده شده در شکل 5 استفاده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل، بخش OA فشار پیش بشکه‌ای است که توسط واحد هیدرولیک ایجاد می‌شود، AB مسیر فشار تا رسیدن به حداکثر فشار و BC مسیر فشار ثابت را نشان می‌دهد. در این مسیر شیر کنترل فشار باز شده و سیال از طریق آن خارج می‌شود. شیب خط AB با سرعت سنبه، شکل سنبه، نوع سیال و ضخامت ورق مربوط می‌شود.

در این مقاله، دو هندسه از قطعات پله‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. شماتیک این دو قطعه در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در قطعه (الف)، ارتفاع پله در وسط زیاد و در کناره‌های قطعه، پله کوتاه‌تر ایجاد شده است. این قطعه از این پس قطعه وسط پله نامیده می‌شود. به منظور بررسی یک قطعه با هندسه دو پله که دارای کاربرد صنعتی باشد، محفظه روغن خودرو (کارتر) بعنوان هندسه دوم انتخاب گردید. در شکل (ب) هندسه محفظه روغن خودرو نشان داده شده است، پله سمت راست دارای ارتفاع بیشتری است که در ادامه قطعه کنار پله نامیده می‌شود. در این شکل دو قطعه مورد نظر به منظور بررسی دقیق‌تر ناحیه‌بندی شده و ابعاد هر قطعه نیز بر روی آن نشان داده شده است.

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

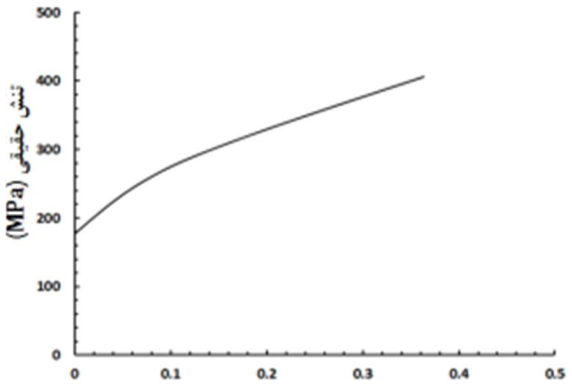
در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه[1] 6.10.1 برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. در شبیه‌سازی با توجه به متقارن بودن هندسه قطعه‌ها نسبت به محور طولی، فقط یک دوم مجموعه قالب و ورق مدل شده است. از آنجایی که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی

جدول 1 خواص مکانیکی و فیزیکی ورق فولادی st13

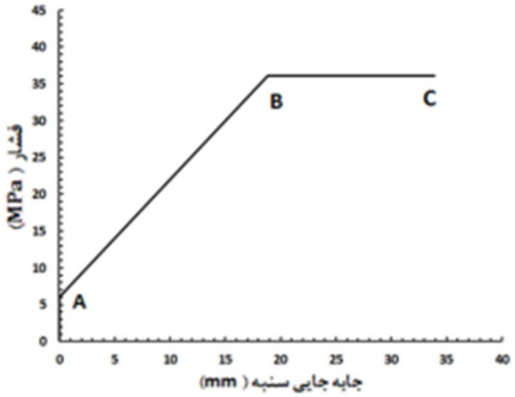
مشخصه	مقدار
استحکام تسلیم (MPa)	116
چگالی (kg/m^3)	8750
مدول‌الاستیسیته (GPa)	210
ضریب پواسون	0/33
توان کرنش سختی (n)	0/44
ناهمسانگردی (جهت نود درجه)	1/04
ناهمسانگردی (جهت صفر درجه)	1

1- ABAQUS 6.10 .1

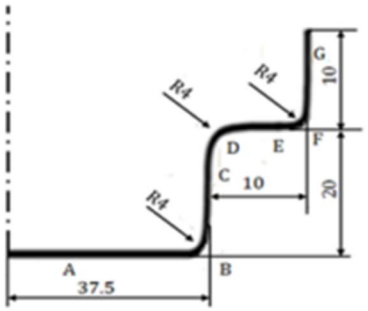
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]



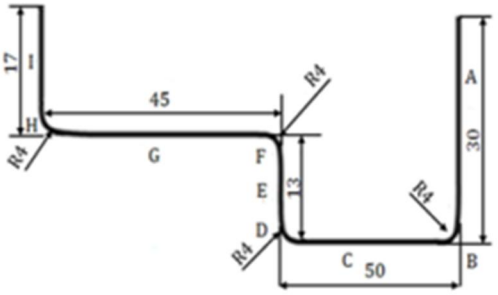
شکل 4 نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



شکل 5 مسیر فشار مورد استفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی



الف

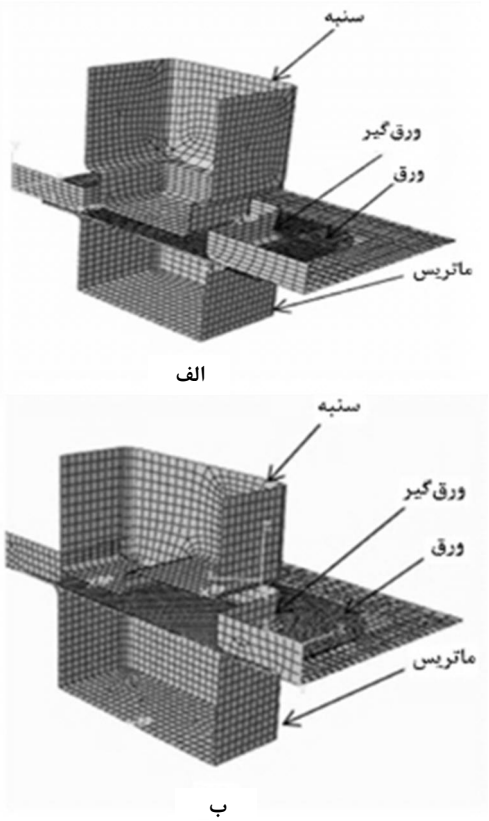


ب

شکل 6 ناحیه‌بندی قطعات دو پله، الف) قطعه وسط پله، ب) قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)

به آن نسبت داده نشد. به منظور بررسی چروکیدگی و اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر[1] و مجموعه قالب به صورت صلب گسسته[2] در نظر گرفته شده است. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح[3] و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی[4] تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب[5] و شرایط تماسی پنالتی[6] برای سطوح استفاده شده است. شکل 7 مدل مونتاژ قالب‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در جدول 2 مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه وسط پله و قطعه کنار پله نشان داده شده است.

براساس مرجع [10]، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق 0/15 در نظر گرفته شده است. در آغاز شکل‌دهی، به دلیل اعمال سیال به زیر ورق، ورق با ورق‌گیر تماس داشته و با ادامه شکل‌دهی، با حرکت سنبه به سمت پایین، ورق با ناحیه شعاع ورودی محفظه و دیواره قالب در تماس قرار می‌گیرد. در



الف

ب

شکل 7 مدل مونتاژ شده و نحوه مش‌بندی اجزا در شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ الف- قطعه وسط پله، ب- قطعه کنار پله

جدول 2 مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه وسط پله و قطعه کنار پله

مشخصه	مقدار
ابعاد سنبه (قطعه وسط پله و کنار پله)	95×75
ابعاد سنبه پله دوم (قطعه وسط پله)	75×55
ابعاد سنبه پله دوم (قطعه کنار پله)	75×50
ابعاد ماتریس	98/4×78/4
شعاع ماتریس	4
لقی بین ورق‌گیر و ماتریس	0/25
فاصله گپ	1/75

1- Deformable

2- Discrete rigid
3- Surface to Surface
4- Kinematic Contact method
5- Colomb
6- penalty

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]

نتیجه برای این سطوح مطابق مرجع [10]، ضریب اصطکاک 0/04 تعریف می‌شود. در شبکه‌بندی ورق نوع المان هشت گره‌ای[1] انتخاب شد. تعداد المان ورق در امتداد ضخامت چهار می‌باشد. نوع المان ابزارها از نوع چهارگره‌ای[2] می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین موارد در شبیه‌سازی‌ها، پیش‌بینی پارگی است. در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای تعیین پارگی ورق استفاده شده است [10]. درصد نازک‌شدگی با معادله (1) قابل محاسبه است.

$$\text{درصد نازک‌شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_f} \quad (1)$$

در رابطه (1)، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی ورق می‌باشد. مقدار ضخامت نهایی ورق t_f، با استفاده از مقدار کرنش ضخامتی εt بصورت معادله (2) محاسبه می‌شود.

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \text{ یا } \varepsilon_t = \ln[\frac{t_f}{t_0}] \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی e_r نیز در شرایط کرنش صفحه‌ای از معادله (3) تخمین زده می‌شود.

$$e_r = \text{FLD}_0 = (23.3 + \frac{360}{25.4} t_0)(\frac{n}{0.21}) \quad (3)$$

که در آن n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه برحسب میلی‌متر می باشد. با توجه به معادله‌های (4) و (5) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ε_r وکرنش ضخامتی ε_t تعیین می‌شود [10].

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \frac{r}{100}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_r \quad (5)$$

با استفاده از رابطه‌های (4) و (5) و محاسبه ε_t و ε_r و با جاگذاری ε_t در معادله (2)، مقدار t_f بدست می‌آید و طبق رابطه (1)، حداکثر مقدار نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. حداکثر نازک‌شدگی برای ورق فولادی st13 استفاده شده 30% بدست آمده است. با توجه به معیار پارگی بدست آمده، وقتی ضخامت ورق از 1/5 به 1/05 میلی‌متر برسد، قطعه دچار پارگی می‌شود.

4- بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق

بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه با هدف کاهش چروکیدگی و نازک‌شدگی دیواره ها، بهبود جریان مواد و افزایش کیفیت قطعه تولیدی انجام می‌شود. تعیین شکل بهینه ورق اولیه، بدلیل پیچیدگی رفتار مواد بسیار مشکل است. در این پژوهش، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق در طی چند مرحله به روش آنالیز حساسیت انجام گردید.

4-1- روش آنالیز حساسیت

با توجه به الگوریتم روش آنالیز حساسیت، پس از معین شدن منحنی هدف مربوط به ناحیه فلنجی، یک ورق اولیه حدس زده می‌شود. با حدس زدن ابعاد ورق اولیه، شبیه‌سازی انجام می‌شود و در انتهای فرآیند شکل‌دهی، میزان انحراف همه گره‌ها نسبت به منحنی هدف بدست می‌آید. فرض می‌شود X نشان‌دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع درخارجی‌ترین گره ورق اولیه قبل از تغییرشکل و X نشان‌دهنده بردار موقعیت همان نقطه مادی پس از تغییر شکل نهایی باشد. با ورق اولیه تعریف شده توسط بردار موقعیت X، فرآیند تغییر شکل به روش المان محدود تجزیه و تحلیل می‌شود. اگر پس از تجزیه و تحلیل، بردار موقعیت X بر روی منحنی هدف XT منطبق نشود، موقعیت آن نقطه مادی قبل از تغییرشکل X باید به منظور ایجاد منحنی شکل یافته منطبق با منحنی هدف XT انتقال یابد. انتقال X، یعنی تغییر شکل ورق اولیه، با معرفی مفهوم حساسیت شکل صورت می‌گیرد.

حساسیت شکل به صورت عددی با در نظرگرفتن دو ورق، یعنی ورق اصلی و ورق آفست یافته، بدست می‌آید. بردار موقعیت نقاط مادی بر روی منحنی ورق آفست یافته، از اطلاعات تجزیه و تحلیل تغییرشکل با ورق اولیه تعریف شده توسط X به صورت معادله (6) تعیین می‌شود [11]

$$X_\delta = X + \delta N \quad (6)$$

که در آن $\boldsymbol{X_\delta}$ نشان دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع درخارجی‌ترین گره ورق آفست یافته قبل از تغییرشکل، N بردار واحد درجهت تغییرشکل در مرحله اول و δ مقدار آفست است. با ورق آفست یافته تعریف شده توسط $\boldsymbol{X_\delta}$، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییرشکل برای به دست آوردن $\boldsymbol{x_\delta}$ بردار موقعیت نقاط مادی تغییر شکل یافته با $\boldsymbol{X_\delta}$، مجددا صورت می‌گیرد. حساسیت به تغییر شکل در هر گره به صورت معادله (7) تعریف می‌شود.

$$S = \frac{|X_\delta - X|}{|x_\delta - x|} \quad (7)$$

تا زمانی که x بر روی منحنی هدف منطبق شود، موقعیت اولیه هر گره بر طبق معادله (8) انتقال می‌یابد [11].

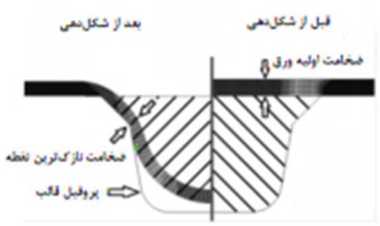
$$X^i = X^{i-1} - \varepsilon S N \quad (8)$$

در معادله (8)، ε خطای انحراف از منحنی هدف بوده و با فاصله بین X و x تعریف می‌شود. N بردار واحد در جهت تغییر شکل در حالت اولیه است و بالا نویس i نیز به معنی تعداد تکرارها می‌باشد. در این بررسی تعداد 60 گره با فاصله مساوی در محیط ورق مشخص شده (تعداد گره‌ها در محیط ورق 120 گره بوده) و کلیه محاسبات در نرم‌افزار اکسل صورت گرفته است. در نهایت منحنی جدید ورق بهینه شده با توجه به مختصات بدست آمده، به کمک نرم‌افزار رسم شده و مجدداً به نرم‌افزار آباکوس ارسال گردید. پس از اصلاح شکل ورق، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل تا رسیدن مقدار خطای انحراف از منحنی هدف، $\boldsymbol{\varepsilon}$ ، به مقدار تعیین شده در هر گره خارجی، مجددا تکرار می‌شود [11].

5- معیار پرشدگی

برای بررسی دقیق‌تر پرشدگی در گوشه قالب، از معیار درصد پرشدگی استفاده گردید. درصد پرشدگی برمبنای مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده به مساحت کل حفره قالب در ناحیه بحرانی می‌باشد که در شکل 8 به صورت هاشور خورده نشان داده شده است [12]. این معیار مطابق معادله (9) تعریف شده است.

$$\text{درصد پرشدگی} = \frac{\text{مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \quad (9)$$



شکل 8 شماتیک روش تعیین درصد پرشدگی برحسب مساحت اولیه و پرشده قالب [12]

1- C3D8R
2- R3D4

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]

6- نتایج

6-1- بررسی امکان شکل‌دهی قطعه وسط پله

در بررسی امکان شکل‌پذیری قطعات ورقی پله‌ای، پرشدگی در ناحیه گوشه فصل مشترک بین پله‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد و از دلایل اصلی دشوار بودن شکل‌دهی اینگونه قطعات می‌باشد

یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر روی پرشدگی گوشه فصل مشترک بین دو پله، فشار شکل‌دهی می‌باشد. فشار شکل‌دهی بر روی میزان پرشدگی، منحنی توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی تاثیر گذار می‌باشد. افزایش فشار، از یک طرف باعث افزایش پرشدگی و از طرف دیگر باعث افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شود. اثر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت، در هندسه‌ها و فرآیندهای مختلف متفاوت است. در این تحقیق به منظور رسیدن به مسیر فشار مطلوب برای شکل‌گیری دو قطعه تعریف شده، مسیر فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

قطعه وسط پله در فشارهای بیشینه 26، 30و 35 مگاپاسکال به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شدند. در فشار بیشینه 26 مگاپاسکال به دلیل کم بودن فشار شکل‌دهی، در ناحیه شعاع گوشه فصل مشترک پله اول و دوم (ناحیه D در شکل 6- الف)، پرشدگی کامل حاصل نشد. عدم پرشدگی در گوشه قطعه بخاطر وجود مواد اضافی در ناحیه فلنج و جریان نیافتن مواد می‌باشد. با افزایش فشار بیشینه به 30 مگاپاسکال، پرشدگی افزایش می‌یابد اما ورق به طور کامل شکل قالب را به خود نگرفت. میزان پرشدگی در فشار 26و 30 مگاپاسگال بترتیب 66 و 74 درصد بدست آمد. در شکل 9 قطعه بدست آمده در فشار 30 مگاپاسگال نشان داده شده است. با افزایش فشار به 35 مگاپاسگال مشاهده گردید که پرشدگی در ناحیه D افزایش یافت. در شکل 10 پرشدگی قطعه در این فشار نشان داده شده است. شکل 11 اثر فشار شکل‌دهی را بر روی درصد پرشدگی قالب نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش فشار شکل‌دهی، میزان پرشدگی قالب افزایش می‌یابد. حداکثر پرشدگی بدست آمده در این فشار 83 درصد می‌باشد.

6-2- بررسی امکان شکل‌دهی قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)

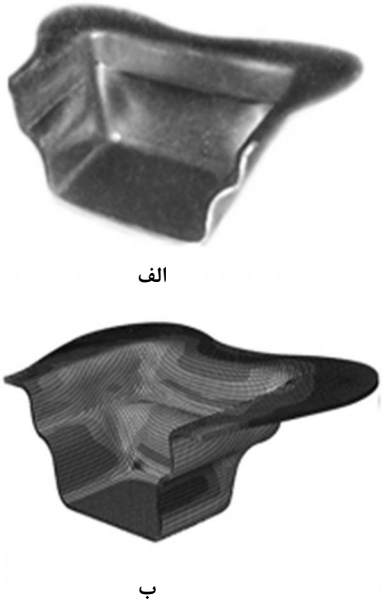
برای بررسی شکل‌پذیری قطعه کنار پله، فشارهای 26، 30، 35و 40 مگاپاسگال استفاده شده است. با بررسی شکل‌پذیری در فشارهای مختلف، میزان پرشدگی در فشارهای 26، 30 و 35 مگاپاسگال به‌ترتیب 68، 76 و 81 درصد بدست آمد.

به منظور افزایش پرشدگی قالب، فشار بیشینه به اندازه 40 مگاپاسگال افزایش یافت. شکل 12 پرشدگی قطعه در این فشار را نشان می‌دهد. میزان پرشدگی در این فشار 90 درصد می‌باشد. در شکل 13 قطعه بدست آمده در فشار 40 مگاپاسگال نشان داده شده است. در شکل 14 نمودار تاثیر فشار شکل‌دهی بر روی پرشدگی قالب برای قطعه کنار پله نشان داده شده است.

6-3- بررسی تاثیر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت

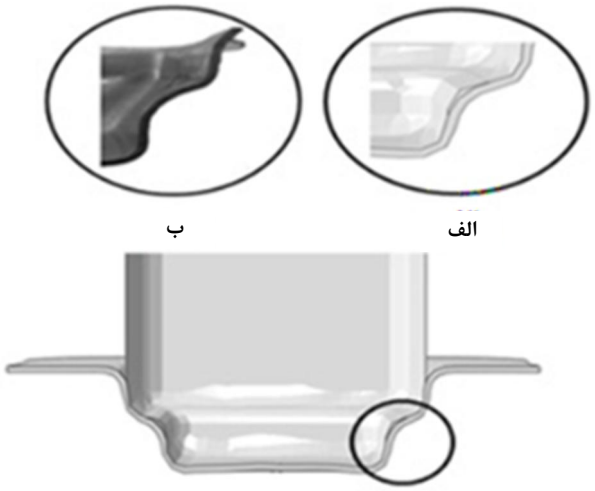
در شکل 15 و 16 نمودار توزیع ضخامت بدست آمده در فشار 30 مگاپاسگال برای قطعه وسط پله و 40 مگاپاسگال برای قطعه کنار پله نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، مشاهده می‌شود مطابقت قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود دارد. مقدار بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حدود 6 درصد می‌باشد.

با بررسی نمودارهای بدست آمده، در ناحیه‌های کف پله‌های اول و دوم (ناحیه‌های A و E در شکل 6- الف) و (ناحیه‌های C و G در شکل 6- ب)، با



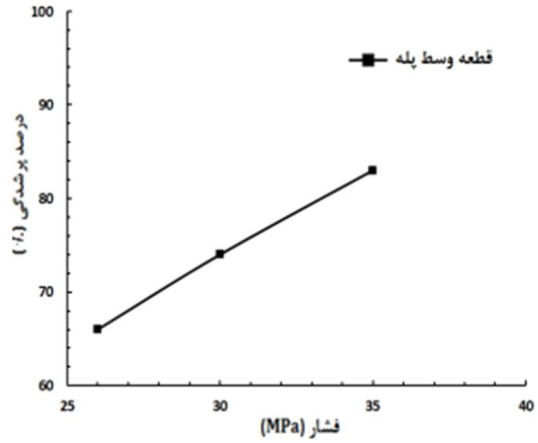
الف ب

شکل 9 قطعه وسط پله بدست آمده در فشار MPa 30، الف- آزمایشگاهی، ب-شبیه‌سازی



الف ب ج

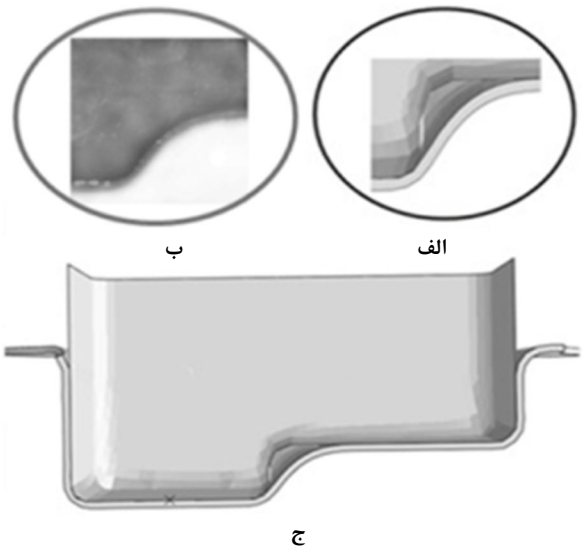
شکل 10 پرشدگی قطعه وسط پله در فشار MPa 35، الف- بدست آمده از شبیه‌سازی، ب- بدست آمده از آزمایش، ج- شبیه‌سازی شکل‌پذیری ورق در این فشار



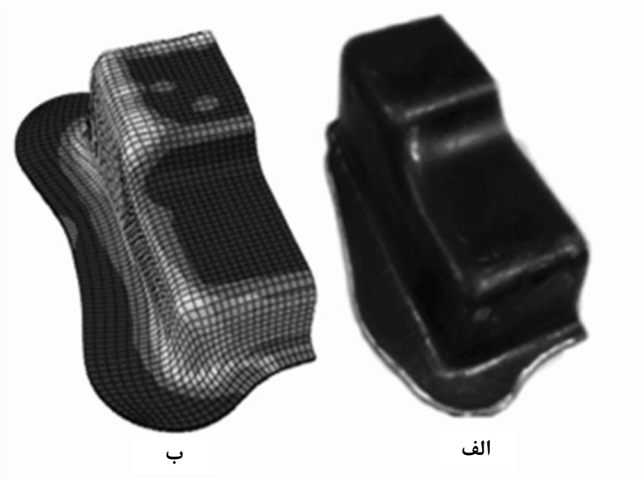
شکل 11 نمودار تاثیر فشار شکل‌دهی بر روی درصد پرشدگی قالب در گوشه (ناحیه D در شکل 6- الف)، قطعه وسط پله، بدست آمده از شبیه‌سازی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

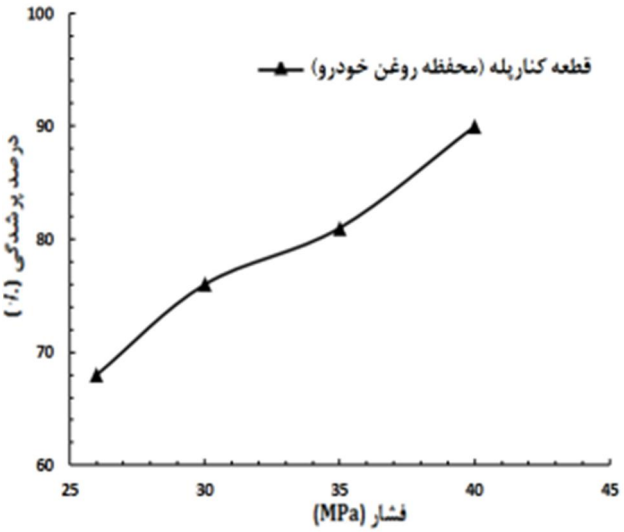
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]



شکل 12 پرشدگی قطعه در فشار MPa 40، الف- بدست آمده از شبیه‌سازی، ب- بدست آمده از آزمایش، ج- شبیه‌سازی شکل‌پذیری ورق در این فشار



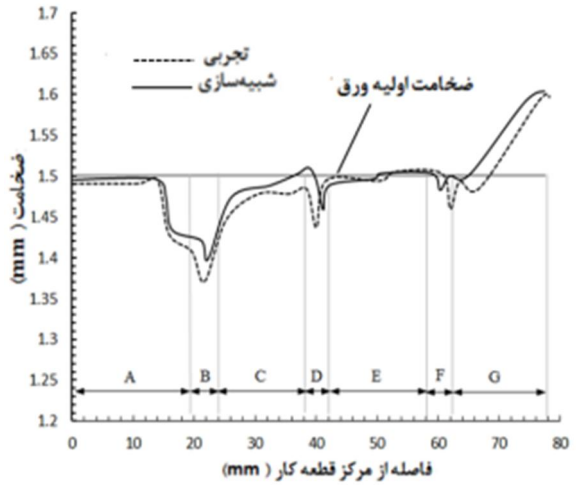
شکل 13 قطعه کنار پله بدست آمده در فشار 40، الف- آزمایشگاهی، ب- شبیه‌سازی



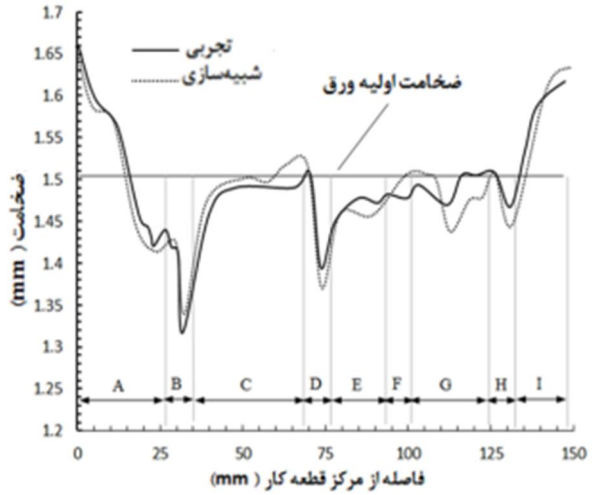
شکل 14 نمودار تاثیر فشار شکل‌دهی بر روی درصد پرشدگی قالب در گوشه (ناحیه F در شکل 6- ب)، قطعه کنار پله، بدست آمده از شبیه‌سازی

توجه به اعمال فشار سیال در زیر ورق، سنبه با ورق در تماس بوده و نازک‌شدگی ناچیز می‌باشد. در سه ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه‌های B، D و F در شکل 6- الف و ب) به دلیل خمش کششی[1] ایجاد شده در ناحیه شعاع خم، نازک‌شدگی حداکثر می‌باشد. در ناحیه دیواره پله‌اول (ناحیه C در شکل 6- الف) و (ناحیه A در شکل6- ب)، بدلیل کشش بیشتر ورق در این نواحی، نازک‌شدگی بیشتری نسبت به دیواره پله دوم (ناحیه G در شکل 6- الف) و (ناحیه E در شکل6- ب) ایجاد می‌شود.

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند هیدروفرمینگ، فشار شکل‌دهی می‌باشد. استفاده از مسیر فشار مطلوب در شکل‌پذیری قطعه و توزیع ضخامت یکنواخت حائز اهمیت می‌باشد. در شکل 17 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله در فشارهای 26، 30 و 35 مگاپاسگال نشان داده شده است. با توجه به هندسه تعریف شده برای قطعه وسط پله، با افزایش فشارشکل‌دهی، بدلیل افزایش سطح تماس بین سنبه و ورق، اصطکاک افزایش می‌یابد و با کاهش لغزش بین ورق و سنبه، نازک‌شدگی کاهش می‌یابد. در شکل 18 تاثیر مسیر فشارهای مختلف بر روی توزیع ضخامت در قطعه کنار پله نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش فشار شکل‌دهی، حداکثر نازک‌شدگی بحرانی کاهش می‌یابد.



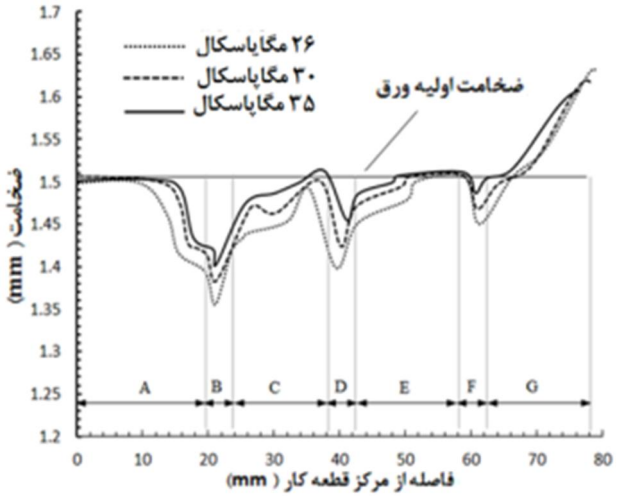
شکل 15 نمودار توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *G* در شکل 6- الف)، در فشار MPa 30



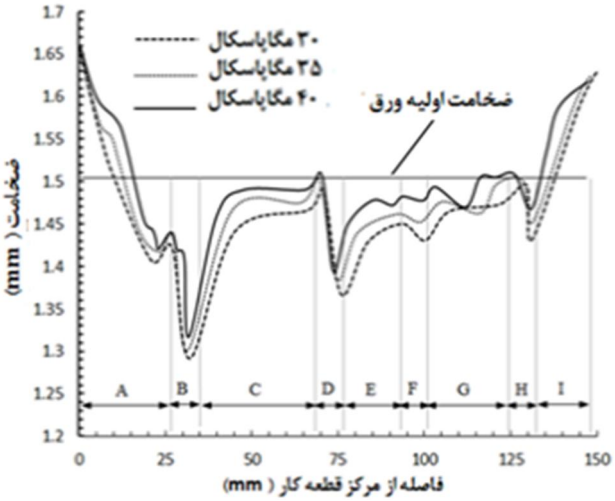
شکل 16 نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار MPa 40، در جهت طولی (از نقطه *A* تا *I* در شکل 6- ب)، بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش

1- Tensile bend

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]



شکل 17 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *G* در شکل 6- الف)، بدست آمده از شبیه‌سازی



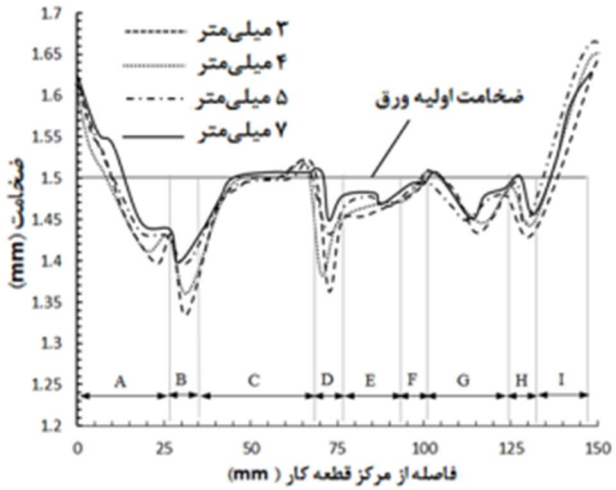
شکل18 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *I* در شکل 6- ب) ، بدست آمده از آزمایش

6-4- بررسی‌تاثیر شعاع گوشه سنبه بر روی توزیع ضخامت

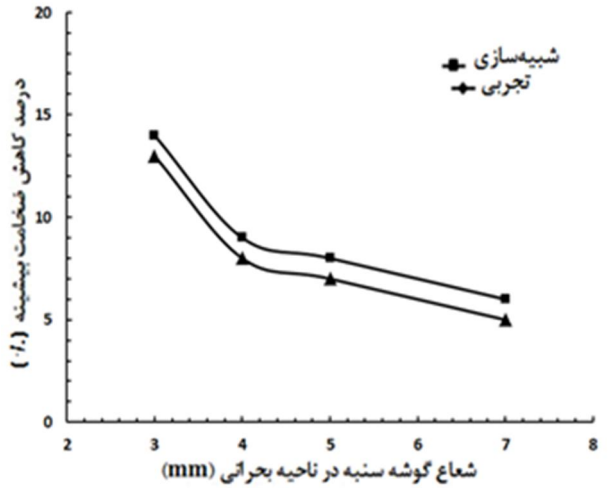
به منظور بررسی تاثیر شعاع گوشه سنبه، قطعه کنار پله با شعاع گوشه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی شعاع‌های 3، 4، 5، و7 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نمودار شکل 19، مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع گوشه سنبه، در یک فشار ثابت، حداکثر نازک‌شدگی کاهش و توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. با افزایش شعاع گوشه سنبه ، خمش کاهش یافته و جریان مواد راحت‌تر انجام می‌گیرد. همچنین مشاهده گردید که در شعاع گوشه کوچکتر از 3 میلی‌متر، درصد کاهش ضخامت قطعه به بیشتر از 33 درصد می‌رسد که قطعه در ناحیه شعاع سنبه دچار پارگی می‌شود. در شکل 20 نمودار درصد کاهش ضخامت برای شعاع گوشه در ناحیه بحرانی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش شعاع گوشه سنبه، نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی کاهش می‌یابد. مشخص گردید که کمترین کاهش ضخامت در اثر افزایش شعاع سنبه به اندازه 5 درصد می‌باشد.

6-5- تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت

به منظور بررسی تاثیر ارتفاع پله بر روی نازک‌شدگی، ارتفاع پله در اندازه‌های



شکل 19 نمودار تاثیر شعاع گوشه سنبه بر روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *I* در شکل 6- ب)، فشار MPa 40، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل 20 نمودار درصد کاهش ضخامت برحسب شعاع گوشه در ناحیه بحرانی، قطعه کنارپله، فشار MPa 40

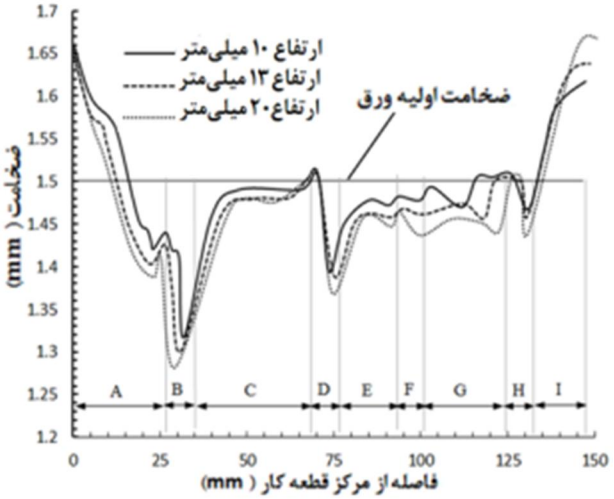
10، 13و20 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل 21 مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش کرنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش یافت. با بررسی مقدار درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله مختلف مشخص گردید که درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله 10، 13 و20 میلی‌متر به ترتیب 7، 11و 13 درصد می‌باشد که با توجه به معیار نازک‌شدگی در نظر گرفته شده مشاهده می‌شود در قطعه پارگی رخ نمی‌دهد. در شکل 22 قطعه کنار پله بدست آمده با ارتفاع پله مختلف در فشار 40 مگاپاسگال نشان داده شده است. همچنین در شکل 23 نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش ارتفاع پله، نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. در انجام شبیه‌سازی و آزمایش همانگونه که بیان گردید حداکثر نازک شدگی ورق در قطعه کنار پله، با ارتفاع پله 20 میلی‌متر به مقدار 13 درصد بدست آمد.

6-6- بررسی تاثیر بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه بر روی توزیع ضخامت

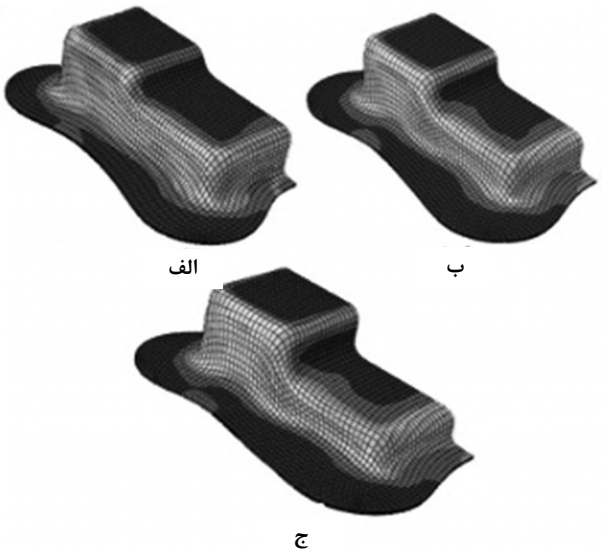
با انجام مراحل بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه، تاثیر مراحل بهینه‌سازی بر روی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

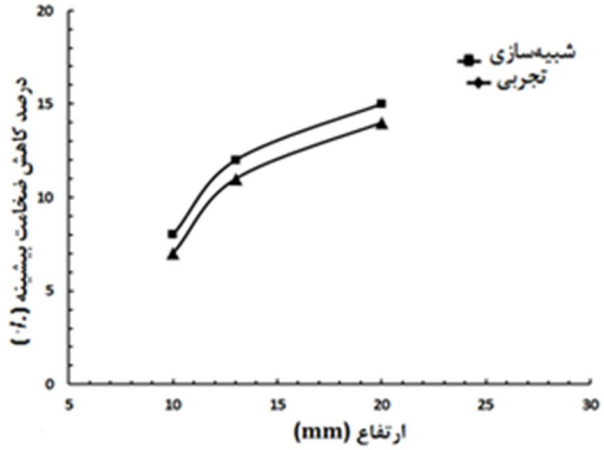
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]



شکل 21 نمودار تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت قطعه کنارپله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *I* در شکل 6- ب)، بدست آمده از آزمایش



شکل 22 قطعه کنار پله بدست آمده در ارتفاع پله مختلف، الف- 10 میلی‌متر ب- 13 میلی‌متر و ج- 20 میلی‌متر، فشار 40 MPa ، بدست آمده از شبیه‌سازی



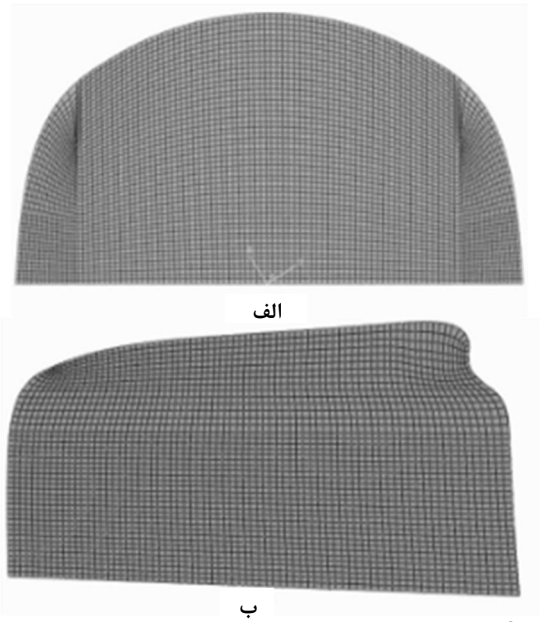
شکل 23 نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در ارتفاع پله مختلف در قطعه کنارپله

توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفت. دررمراحل بهینه‌سازی، ورق اولیه قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب در 2 و 3 مرحله بهینه‌سازی شدند. در شکل 24 ورق اولیه بهینه‌سازی شده برای قطعه وسط پله و کنار پله نشان داده شده است. همچنین در شکل 25 قطعه وسط پله و کنار پله بدست آمده از ورق اولیه بهینه‌سازی شده نشان داده شده است. شکل 26 و 27 نمودارهای تاثیر بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه بر روی توزیع ضخامت را نشان می‌دهد.

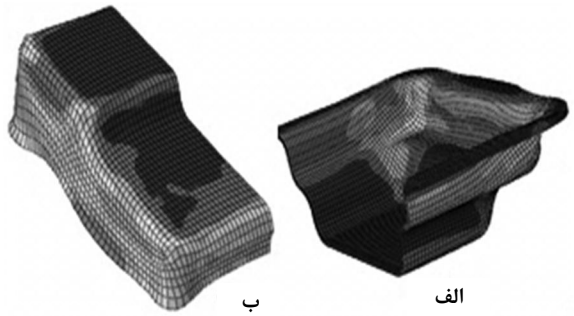
با توجه به نمودارهای نشان داده شده، با تغییر ابعاد ورق اولیه به شکل بهینه، به دلیل افزایش جریان مواد، نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه و در دیواره‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش جریان مواد در گوشه‌ها و کشیدگی کمتر ورق در این ناحیه می‌باشد. با انجام مراحل بهینه‌سازی انجام شده، مقدار نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی در قطعه کنار پله و وسط پله به اندازه 8 درصد کاهش یافت.

6-7- بررسی تاثیر نیروی سنبه

در شکل 28 نمودار نیروی سنبه برحسب جابجایی قطعه کنار پله در فشارهای 30، 35 و40 مگاپاسگال نشان داده شده است. در انجام آزمایش‌ها، مشاهده گردید که با افزایش فشار سیال به زیر ورق، بدلیل افزایش نیروی عمودی وارد بر سنبه، نیروی مورد نیاز شکل‌دهی افزایش یابد. در شکل 29 نمودار نیرو برحسب جابجایی قطعه کنار پله در فشار 40 مگاپاسگال، قبل و

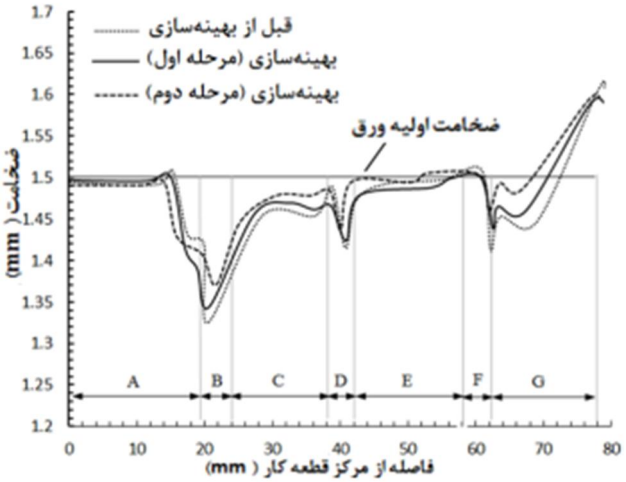


شکل 24 ورق اولیه بهینه‌سازی شده، الف- قطعه وسط پله بدست آمده در دو مرحله، ب- قطعه کنارپله بدست آمده در سه مرحله

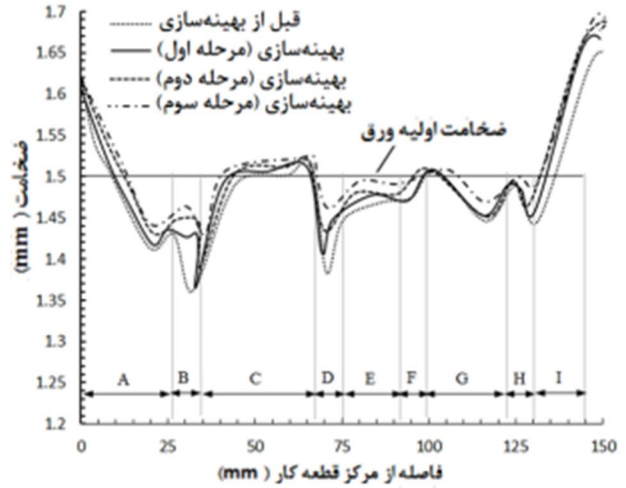


شکل 25 الف- قطعه وسط پله، ب- قطعه کنار پله، بدست آمده با ورق اولیه بهینه-سازی شده

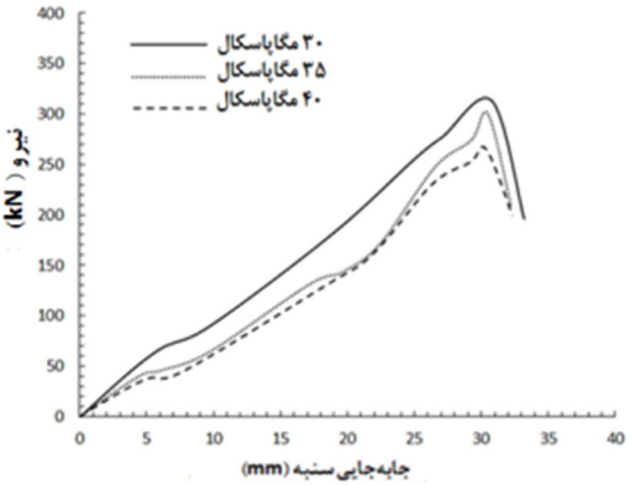
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]



شکل 26 نمودار توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *G* در شکل 6- ب)، در مراحل بهینه‌سازی، بدست آمده از شبیه‌سازی

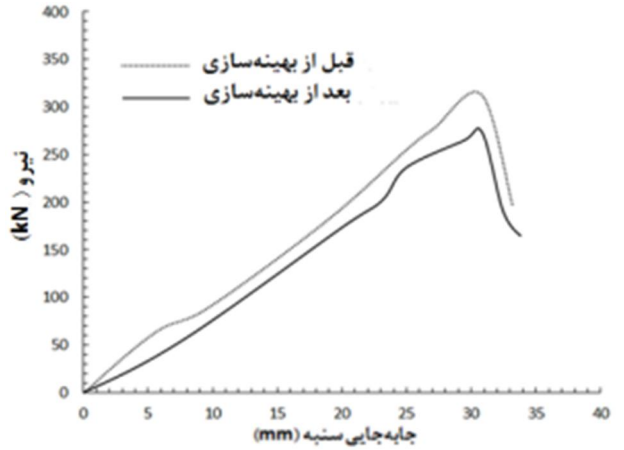


شکل 27 نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه *A* تا *I* در شکل 6- ب)، در مراحل بهینه‌سازی، بدست آمده از شبیه‌سازی

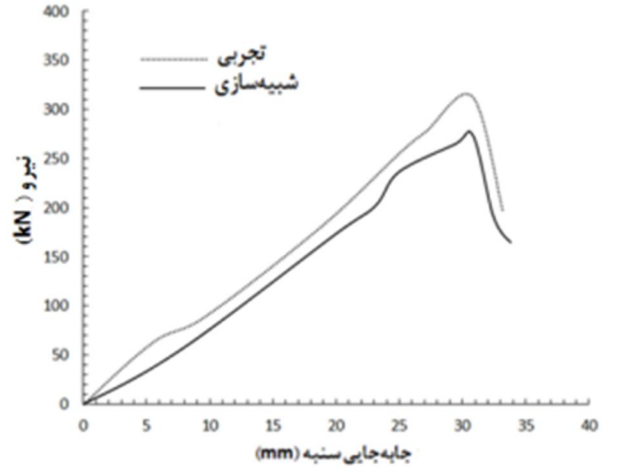


شکل 28 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 MPa

بعد از بهینه‌سازی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با انجام مراحل بهینه‌سازی، به دلیل افزایش در جریان مواد در گوشه‌های ورق اولیه، حداکثر نیروی مورد نیاز به منظور شکل‌گیری ورق کاهش می‌یابد. مقدار کاهش نیرو



شکل 29 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 MPa، قبل و بعد از بهینه‌سازی، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل 30 نمودار نیروی سنبه برحسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 مگاپاسکال

با انجام مراحل بهینه‌سازی به اندازه 17 درصد می‌باشد. شکل 30 نمودار نیرو برحسب جابجایی برای قطعه کنار پله در فشار 40 مگاپاسگال را نشان می‌دهد.

7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان تولید محفظه روغن خودرو (کنار پله) و قطعه دو پله (وسط پله) با استفاده از روش کشش‌عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی تحقیقاتی که در پژوهش‌های پیشین صورت گرفته، تولید محفظه روغن خودرو در طی سه مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ انجام شد. در این تحقیق شکل‌پذیری قطعات مورد نظر در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت قطعه با موفقیت شکل یافت. همچنین با بررسی پارامترهای موثر در شکل‌پذیری و انجام بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه، نتایج زیر حاصل شد:

1. شکل‌پذیری قطعه دو پله با دو هندسه قطعه وسط پله و قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو) در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت. این نتیجه حاصل شد که با افزایش فشار بیشینه به اندازه 35 مگاپاسگال، پرشدگی قالب برای قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب 83 و 81 درصد بدست

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]

آمد. هچنین با بررسی شکل‌پذیری قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو) در فشار 40 مگاپاسکال، میزان پرشدگی به 90 درصد افزایش یافت.

2. مشاهده شد که بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه موجب می‌شود تا جریان مواد بهبود یافته و همچنین نازک‌شدگی در ناحیه شعاع سنبه و دیواره پله‌ها کاهش یابد. در این تحقیق حداکثر کاهش نازک‌شدگی بدست آمده حاصل از بهینه‌سازی، 8 درصد بدست آمد.

3. با افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش تنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش می‌یابد و هر چه ارتفاع پله کاهش یابد، نازک‌شدگی به سمت پله اول جابجا می‌شود. حداکثر نازک‌شدگی بدست آمده، در ارتفاع پله 20 میلی‌متر به اندازه 13 درصد حاصل شد.

8- مراجع

[1] P.H.Joshi, *Design manual jig and fixture,* second edition, pp. 9.32-9.43, New York: McGRAW-Hill, 2003.

[2] S.H.Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology,* vol.91. pp. 236–244, 1999.

[3] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 148, pp. 119-131, 2004.

[4] B.N.Huiting-Wang, B.LinGao, B.Minghe-Chen, Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, pp. 793–799, 2011.

[5] T.Kim, D.Yang, S.Han, Numerical modeling of the Multi-stage sheet pair hydroforming process, *Journal of materials processing technology*, vol. 151, pp. 48-53, 2004.

[6] J.Wua, R.Balendra, Y. Qinb, A study on the limits of the hydromechanical deep drawing of with stepped geometries, Journal *of Materials procces Technology*, vol.145, pp.242–246, 2004.

[7] Y.Qin, Balendra.*R,* Design considerations for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features, features *, Journal of Materials Processing Technology,* vol.145,pp. 163–170, 2004.

[8] B.S. Kang , B.M. Sona, J. Kim, A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM, *International Journal of Machine Tools Manufacture,* vol. 44, pp. 87-94, 2004.

[9] H. B. Shim, Determination of optimal blank shape by the radius vector of boundary nodes, *Engineering Manufacture,* vol. 218, pp. 1099-1111, 2004.

[10] S.H.Zhang, M.R.Jensen, j.Danckert, K.B.Nielsen, L.H.Lang, D.C .Kang, analysis of the mechanical deep drawing of cylindric cups, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp.367-373 , 2000.

[11] S. Hyunbo, S. Kichan, K. Kwanghee, Optimum blank shape design by sensitivity analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 104, pp. 191-199, 2000.

[12] N.Mohammadtabar, M. Bakhshi, S.J. Hosseinipour, A.H. Gorji, study ofeffective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (In Persian).

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.4.25.7]