

Mechanics of Advanced and Smart **Materials Journal** 

http://masm.araku.ac.ir



## **Design and Manufacture of Low-Pressure Hydroforming Machine** for Aluminum Tubes and Production of Rectangular Cross Section

Seyed Jalal Hashemi <sup>a\*</sup>, Alireza Bahadory<sup>b</sup>, Sadegh Mirzamohammadi <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran ,Iran. <sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. <sup>c</sup> Department of Mechanical engineering, Technical and Vocational University (TVU),, Tehran ,Iran.

### **Original Article**

Use your device to scan and read the article online



### **KEYWORDS**

Tube forming, Hydroforming, Thickness distribution, Corner radius.

Citation: Hashemi S H, Bahadory A, Mirzamohammadi S. Design and Manufacture of Low-Pressure Hydroforming Machine for Aluminum Tubes and Production of Rectangular Cross Section. Mechanics of Advanced and Smart Materials. 2022; 2(2): 156-171.

https://10.52547/masm.2.2.156.

### ABSTRACT

In tube hydroforming, internal pressure is used to deform tube cross section. Internal pressure causes plastic deformation and conforming external surface of tube to die cavity. Low-pressure tube hydroforming is one category of this process. The method of performing low-pressure hydroforming of the tube is like to compressing a solid object, in which, unlike high-pressure hydroforming, the upper mold is not fixed during the process and moves and presses the tube at the same time as internal pressure is applied to the tube. In this paper, firstly a low-pressure tube hydroforming machine have been designed and fabricated and then, the low-pressure hydroforming process of aluminum tube is performed and the round section of the tube is transformed into a rectangular cross section by the hydroforming process. Also, the thickness distribution and the values of the radius of the formed corner are investigated under three different loading paths. The results show that by increasing the internal pressure, a smaller corner radius can be achieved but the thinning increases. Also, the maximum flat surface of the upper part is obtained when the upper mold is displaced after the internal pressure reaches its maximum value.

### **Extended Abstract**

### 1. Introduction

ube hydroforming process is used for forming complicated parts in many industries including automative industry, aerospace, military industry and home appliance industry. Although this process has been noticed in the industry since recent decades, its experimental and theoretical developments date back to 1940. Gray et al. [1] published a paper about producing T-shape copper tubular parts using internal pressure and axial feed in 1940. The use of hydrostatic pressure in metal forming processes for tubular parts was first presented by Fuchs [2]. In 1999, Asnafi [3] analyzed the tube hydroforming process analytically and obtained relations for the material deformation behavior during the process based on the material properties, die shape and loading curve. Usually, high internal pressure is used in the hydroforming process to shape the pipe and ensure the formation of the corners of the part. In high pressure tube hydroforming (HPTH), two halves of the die is closed and forming is done by applying high pressure [4]. But in HPTH, there are problems such as the need for a high pressure supply system and high force to keep the two halves of the die closed. In order to eliminate HPTH problems, a new process called low pressure pipe hydroforming (LPTH) has been considered. In general, in this process, the internal pressure used for forming of the tube is defined by the Tube and Pipe Fabricators Association as less than 83 MPa [5]. In LPTH, the tube is filled by low pressure fluid while the upper die is movable and the dies are closed during the process [6]. Hashemi et al. [7] conducted a research on the prediction of bursting in pipe hydroforming.

\* Corresponding author. Tel.: 02166319882 E-mail address: j hashemi@tvu.ac.ir DOI: https://10.52547/masm.2.2.156.

Received: April 7, 2022; Received in revised form: July 8, 2022; Accepted: August 16, 2022. 2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



#### 157 Seyed Jalal Hashemi, Alireza Bahadory

#### 2. Procedure

In this experimental study, circular cross section of an aluminum tube has been changed to rectangular form by applying three different loading paths. One of the innovations of this experiment is to achieve the optimal loading path for changing the tubular form of AA6063 aluminum alloy. One of the objectives of this experimental study is to investigate the outer and middle profile, surface flatness, upper and lower corner radius, and appropriate thickness distribution of the formed part by applying three different loading paths and finally achieving the optimal loading path.

The scheme of how to perform LPTH in this research is shown in two-dimensional form in Figure 1. In this process, the lower die is fixed and the tube is placed inside it. The upper die is movable and by moving downwards, it changes the shape of the tube. In order to prevent indentation in the upper wall of the tube and also to create corners with a smaller radius, internal pressure is used. The ratio of changes in the internal pressure of the tube to the displacement of the upper die during process will greatly affect the shape and quality of the final product.



Figure 2 shows all the components used in the die and Figure 3 shows the final view of the experimental setup.



Figure 2. components of experimental LPTH setup



Figure 3. final setup

Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal 2(2) (2022) 156-171

Three methods of applying load are considered for the forming of the part, which are mentioned below:

1- Apply pressing force and move the upper die by 10 mm without applying internal pressure

2- Applying internal pressure of 100 bar after applying pressing force and moving the upper die by 10 mm.

3- Touching the upper die with the tube and providing tangential force, then applying 100 bar internal pressure, applying pressing force and moving the upper die by 10 mm.

The parts produced by all three loading curves are shown in Figure 4.



Figure 4. Formed parts using different loading curves

### 3. Conclusios

The upper and lower corners of the part are important parameters in the production of the part. Also the optimal corners are the corners with a smaller and sharper radius. As a result, the third type path of loading curve means applying the initial internal pressure and then moving the upper die with an upper is suggested. One of the important parameters of the part production is the profile of the uniform cross-section without dents. According to the profiles obtained in the experimental method and comparing these three profiles, the internal pressure of 100 bar is the optimal pressure loading curve and the uniform cross-sectional area profile is obtained.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند، دوره ۲، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۵۶ تا ۱۷۱



مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند



# طراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

سید جلال هاشمی<sup>الف\*</sup>، علیرضا بهادری<sup>ب</sup>، صادق میرزامحمدی <sup>ج</sup> <sup>الف</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنیوحرفهای کشور، تهران، ایران، ایران، <u>i\_hashemi@tvu.ac.ir ا</u> - دانشجوی کارشناسیارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، <u>a-bahadory@email.kntu.ac.ir</u> - تاستادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنیوحرفهای کشور، تهران، ایران، <u>S-Mirzamohammadi@tvu.ac.ir</u>

چکیدہ	واژگان کلیدی
در فرآیند هیدروفرمینگ لوله برای تغییر شکل سطح مقطع، از فشار داخلی یک سیال استفاده میشود. فشار	شکلدهی لوله،
داخلی باعث تغییر شکل پلاستیک و منطبق شدن سطح خارجی لوله با شکل حفره قالب میشود. یکی از	هيدروفرمينک، توزيع ضخامت،
دسـتههای این فرآیند، هیدروفرمینگ فشار پایین میباشد. روش انجام هیدروفرمینگ فشار پایین لوله، شبیه	شعاع گوشه.
فشـردن جسـم جامد است و در آن برخلاف هیدروفرمینگ فشار بالا، قالب بالایی در طول فرایند ثابت نبوده و	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷
همزمان با اعمال فشـار داخلی به لوله، حرکت کرده و لوله را تحتفشـار قرار میدهد. در این مقاله، ابتدا یک	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷
دسـتگاه هیدروفرمینگ فشـار پایین طراحی و سـاخته شـده است و سپس فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین	تا بغیند ش ۸/۲۸
لولههای آلومینیومی انجام شده و مقطع دایروی لوله بهوسیلهٔ فرایند هیدروفرمینگ به مقطع مستطیلی تغییر	کاریج پدیرش: ۲۵/۱۵۰۱۰
شـکل داده اسـت. همچنین توزیع ضـخامت و مقادیر شـعاع گوشهٔ شکل دادهشده، تحت سه مسیر بارگذاری	
متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان میدهد که با افزایش فشار داخلی میتوان به شعاع گوشه کمتری	
دســت پیدا کرد اما نازکشــدگی افزایش پیدا میکند. همچنین بیشــترین تختی ســطح بالایی قطعه، زمانی	
حاصل میشود که جابجایی قالب بالایی بعد از رسیدن فشار داخلی به مقدار ماکزیمم خود انجام شود.	

### ۱– مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله، در بسیاری از صنایع از جمله صنایع خودروسازی، هوافضا، لوازم خانگی و صنایع نظامی برای شکلدهی قطعات پیچیده به کار میرود. اگر چه این فرایند از دهههای اخیر در صنعت مورد توجه قرار گرفته است ولی پیشرفتهای تجربی و نظری آن به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی گردد. گری و همکاران [۱] در سال ۱۹۴۰ مقالهای در مورد تولید قطعات T شکل مسی بهوسیلهٔ فشار داخلی و تغذیه محوری منتشر کردند. استفاده از فشار هیدرواستاتیک در فرایندهای شکلدهی فلزات برای قطعات لولهای شکل، اولین بار توسط فوخس [۲] ارائه شد. استافی [۳] در سال ۱۹۹۹ فرایند هیدروفرمینگ لوله را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد و روابطی برای رفتار تغییر شکل ماده حین فرایند براساس خواص ماده، شکل قالب و منحنی بار گذاری بهدست آورد. معمولاً در فرایند هیدرفرمینگ برای شکلدهی لوله و اطمینان از شکل گیری گوشههای قطعه از فشار بالای داخلی استفاده می شود. در هیدروفرمینگ لوله فشار بالا<sup>۱</sup> دو نیمهٔ قالب بسته شده و با اعمال فشار زیاد، شکل دهی انجام

> \* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۲۱۶۶۳۱۹۸۸۲ • فکس: ۲۲۱۶۶۳۱۹۸۸۲ آدرس پست الکترونیک: <u>j\_hashemi@tvu.ac.ir</u>



### ۱۶۰ مراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

می شود [۴]. اما در HPTH مشکلاتی مانند نیاز به یک سیستم تأمین کننده فشار بالا و نیروی زیاد برای بسته نگهداشتن دو نیمهٔ قالب وجود دارد. در راستای حذف مشکلات HPTH، فرایند جدیدی به نام هیدروفرمینگ لوله فشار پایین<sup>۱</sup> مورد توجه قرار گرفته است. بهطورکلی در این فرایند فشار داخلی مورد استفاده برای شکلدهی لوله توسط انجمن سازندگان لوله<sup>۲</sup>، کمتر از ۸۳ مگاپاسکال تعریف شده است [۵]. در LPTH، لوله بهوسیلهٔ سیال با فشار پایین پر می شود درحالی که قالب بالایی متحرک بوده و در طول انجام فرایند قالبها بسته میشوند [۶]. هاشمی و همکاران [۷]، تحقیق بر روی پیشبینی ترکیدگی در هیدروفرمینگ لوله انجام دادند. بر اساس نتایج آنها معیار آیادای اصلاحشده بهترین پیشبینی را برای مقاطع مربعی در فرآیند هیدروفرمینگ دارد. برخلاف HPTH، تحقیقات زیادی بر روی LPTH انجام نشده است. هوانگ و آلتان [٨] تبدیل مقطع گرد لوله را به مثلث با استفاده از LPTH مورد بررسی قرار دادند. همچنین این دو در مطالعهٔ دیگری [۹] تولید مقطع مستطیلی را بهوسیلهٔ LPTH مطالعه کردهاند. نیخاره و همکاران [۱۰] نیز یک مدل تحلیلی برای تعیین نیروی بستن قالب در LPTH توسعه دادند. ژانگ و همكاران [۱۱, ۱۲] بهصورت تحلیلی روی گشتار خمشی ایجادشده ناشی از حركت قالب بالایی در فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین کار کردند و نشان دادند که با حرکت همزمان دو قالب بالا و پایین می توان به توزیع ضخامت و شعاع گوشهٔ بهتری دست یافت. نیخاره و همکاران [۱۳] مدلی برای پیشبینی کمانش سطح بالایی لوله در زمان پایین آمدن قالب بالایی در هیدروفرمینگ فشار پایین پیشنهاد دادند. این مدل نشان داد که حداقل فشار لازم، بیشترین وابستگی را به تنش تسلیم جنس لوله دارد. چو و همکاران [۱۴] بر روی به دست آوردن فشار بحرانی در جهت کاهش برگشت فنری در هیدروفرمینگ لوله فشار پایین کار کردند. نتایج نشان داد که یک مقدار بحرانی برای فشار داخلی وجود دارد که براثر آن کمترین برگشت فنری رخ خواهد داد و در فشارهای بالاتر و کمتر از مقدار بحرانی، برگشت فنری افزایش می یابد. تروت و نیخاره [۱۵] با استفاده از شبیهسازی دوبعدی برای به دست اًوردن پیشفرم مناسب جهت استفاده در هیدروفرمینگ فشار پایین تحقیق کردند که نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش فشار داخلی میتواند کمانش سطح بالایی لوله و مشکل ضخیم شدن دیواره را کمتر کند. نیخاره و همکارانش [۱۶] نشان دادند که سرعت حرکت قالب بالایی بهشدت میتواند روی نازکشدگی، پرشدگی گوشهٔ قالب و کمانش لوله تأثیرگذار باشد. این مطالعه بر روی تغییر شکل مقطع گرد لوله در حالت مربعی انجام شد. نیخاره در تحقیق دیگری [۱۷] روش هیدروفرمینگ فشار پایین ا را بر روی لوله با ابعاد میکرو آزمایش کرد. در این تحقیق بالج آزاد لولههای با قطر خارجی اولیهٔ ۲ میلیمتری بهطوری انجام شد كه قالب انتهايي متحرك باشد و ارتفاع بالج با فشار كمتر داخلي، تا نسبتهاي بالج بالا افزايش يابد.

## ۲- بیان مسئله، نوآوری و اهداف

در این آزمایش تجربی با اعمال سه مسیر بارگذاری متفاوت بر روی لولهای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر خارجی ۴۰ میلیمتر، قطر داخلی ۳۷ میلیمتر، ضخامت ۱/۵ میلیمتر و طول ناحیه پرسکاری ۱۰۰ میلیمتر برای تغییر شکل مقطع از دایره به مستطیل در داخل حفرهٔ قالب مستطیلی با گوشههای تیز، انجام شده است. از نوآوری این آزمایش دستیابی به مسیر بارگذاری بهینه برای تغییر فرم لولهای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 میباشد. از اهداف این آزمایش تجربی نیز بررسی پروفیل بیرونی و میانی، تختی سطح، شعاع گوشهٔ بالایی و پایینی و توزیع ضخامت مناسب قطعهٔ تغییر فرم دادهشده با اعمال سه مسیر بارگذاری متفاوت و درنهایت دستیابی به مسیر بارگذاری بهینه میباشد.

## ۳- روش تحقيق

طرحوارهٔ نحوه انجام LPTH در این پژوهش بهصورت دوبعدی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این فرایند، قالب پایین ثابت میباشد و لوله درون آن قرار میگیرد. قالب بالا متحرک بوده و با حرکت به سمت پایین باعث تغییر شکل لوله میشود. بهمنظور جلوگیری از فرورفتگی در قسمت بالای لوله و همچنین ایجاد گوشههای با شعاع کمتر، فشار داخلی درون لوله ایجاد میشود. نسبت تغییرات فشار داخلی لوله به جابجایی قالب بالایی در زمان بسته شدن تأثیر زیادی بر شکل و کیفیت محصول نهایی خواهد داشت.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> LPTH

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Tube and Pipe Fabricators Association





شكل ۱ طرحوارهٔ نحوهٔ انجام LPTH

در این آزمایش تجربی از یک قالب هیدروفرمینگ با یک ماتریس و دو عدد اینسرت<sup>۱</sup> استفاده شده است. ماتریس بر روی کفشک پایینی مونتاژ شده و اینسرتها نیز بهوسیلهٔ پیچ و پین بر روی ماتریس نصب می شوند. هنگام جایگذاری لوله داخل قالب، این اینسرتها باز می شود و بعد از جایگذاری لوله بسته می شود. در پایان عملیات هیدروفرمینگ لوله، با باز کردن اینسرتها، لوله از داخل قالب خارج می شود. در این قالب برای تأمین نیروی تغییر فرم، از یک سنبه که بهوسیلهٔ توپی به گلویی دستگاه پرس هیدرولیک وصل شده، استفاده شده است. همچنین از دو عدد سنبه محوری جهت تأمین نیروی محوری، آببندی و اعمال فشار داخلی به همراه دو عدد سنبه گیر هم جهت نگهداری سنبهها استفاده می شود. سنبه گیرها باید نیروی عکس العمل سنبهها را تحمل کنند. نیروی محوری و نیروی مورد نیاز جهت آببندی نیز بهوسیلهٔ دو عدد پیچ ۲۰۲۰ که بر روی سنبه گیر مونتاژ شده تأمین می گردد. درنهایت، یک پمپ هیدرولیک دستی با ظرفیت ۲۰۰ بار جهت پمپ روغن به داخل لوله و یک پرس هیدرولیکی ۲۰ تنی نیز جهت عملیات پرسینگ در این فرآیند به کار گرفته شده است.

## ۴- شبیهسازی اجزاء محدود

بهمنظور بررسی بیشتر تغییر شکل لوله طی فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین از شبیهسازی اجزاء محدود در نرمافزار آباکوس<sup>۲</sup> استفاده شده است. در شکل ۲، مدل سهبعدی بهصورت برش خورده نشان داده شده است. در این شبیهسازی، قالب بالایی و قالب پایینی بهصورت صلب گسسته و لوله بهعنوان یک سطح شکل پذیر مدل شدهاند. بهمنظور مش بندی لوله از المان S4R با اندازهٔ المان ۲ میلی متر استفاده شده است. در زمان انجام شکل دهی، قالب پایین در مکان خود ثابت بوده و قالب بالایی مطابق با منحنی بارگذاری از پیش تعریف شده باعث تغییر شکل مقطع لوله می شود. منحنی تنش-کرنش حقیقی ساده حاصل از نتایج کشش تک محوری در دمای محیط، در بخش خواص پلاستیک نرمافزار وارد شده است. برای شرایط تماسی سطح خارجی لوله و قالب در این تحقیق، مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک مطابق با مدل اصطکاکی کولمب<sup>۳</sup> با مقدار ۲۰استفاده شده است. در هنگام شکل دهی لوله تحت تمام منحنیهای بارگذاری، دو انتهای لوله مقید بوده و تغذیه محوری اعمال نشده

## ۵- آزمایشهای تجربی

### ۵-۱- قطعهٔ مورد بررسی

قطعهٔ مورد استفاده برای شکلدهی، لولهای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر خارجی ۴۰ میلیمتر، ضخامت ۱/۵ میلیمتر و طول ۱۴۰ میلیمتر میباشد. قطعه پس از شکلدهی به یک مقطع مستطیل شکل مطابق شکل ۳ تبدیل میشود. در این شکل

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Insert

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Abaqus

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Coulomb friction model

### ۱۶۲ طراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

شعاع گوشهٔ بالایی مقطع با R<sub>2</sub> و شعاع گوشه پایینی مقطع با R<sub>1</sub> نشان داده شده است. نمونهای از قطعهٔ شکلدهی شده به وسیلهٔ این فرایند در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲ مدل سهبعدی شبیهسازی



شکل ۳ سطح مقطع قطعه پس از شکلدهی



شکل ۴ فرم نهایی قطعهٔ شکلدهیشده

۵-۲- خواص لوله

بهطور معمول، برای تشخیص رفتار تغییر شکل مادهٔ مورداستفاده برای ساخت لوله از آزمون کشش تکمحوری استفاده می شود. بدین منظور، این آزمون مطابق با استاندارد ASTM-E8M، در آزمایشگاه شکل دهی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از این آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است و در جدول ۱ مشخصات و خواص لوله آورده شده است.

188



جدول أخواص والمسخصات لوله جدول أخواص والمسخصات لوله	
مقدار	پارامتر (واحد)
۴۷۴/۳	ضریب استحکام (MPa)
•/٣٣٩١	ضريب كارسختى
۶۵	تنش تسلیم (MPa)
188	استحکام نهایی (MPa)

## ۵-۳- طراحی اجزاء مکانیکی

در طراحی و ساخت ابزار و قالب هیدروفرمینگ لوله، پارامترهای فراوانی دخیل بوده که در زیر مهمترین آنها ذکر شده است:

- استحکام اجزاء در برابر نیروها و تنشهای موجود در فرایند
- پرداخت سطوح در گیر با قطعه جهت کاهش اصطکاک و کمک به جریان مواد در قالب
  - به کار گیری تلرانس های دقیق ابعادی و هندسی
    - آببندی مناسب
    - طراحی سیستم و نیروی پرسینگ قالب
  - طراحی سیستم اعمال نیروی محوری در دو طرف لولهها و اعمال فشار داخلی

قالب مدنظر در نرمافزار کتیا<sup>۱</sup> V5R20 طراحی شده که طرحوارهٔ آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در این قالب از شش عدد پیچ M۱۰ دو عدد پیچ M۸ و مجموعاً ده عدد پین که دو عدد جهت بستن قسمت پایینی ماتریس به کفشک، دو عدد جهت مونتاژ هرکدام از اینسرتها به ماتریس و دو عدد پین برای هرکدام از سنبهگیرها جهت بستن به ماتریس استفاده شده است تا قطعات بتوانند تنشهای وارده در عملیات هیدروفرمینگ لوله را تحمل کنند. در شکل ۷ تمام اجزای بهکاررفته در قالب و در شکل ۸ نمای نهایی قالب نشان داده شده است.

در این قالب مقدار طول ناحیهٔ پرسکاری ۱۰۰ میلیمتر و نشیمنگاه لوله از هر طرف ۲۰ میلیمتر میباشد. همچنین از یک مقطع مخروطی جهت آببندی سنبهها و سوراخ محوری ماتریس در هنگام اعمال فشار داخلی به لوله استفاده شده است. لازم به ذکر است که یکی از قسمتهای مهم در ساخت این قالب، هممحوری دقیق بین نشیمنگاه چپ و راست قالب و سنبههای محوری میباشد.

1 Catia

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

### ۱۶۴ مراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی



شكل ۶ طرحوارهٔ قالب هيدروفرمينگ طراحي شده

99.9 500



شکل ۷ اجزای قالب هیدروفرمینگ لوله



شکل ۸ نمای نهایی قالب

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

 $F = P \times A$ 

سید جلال هاشمی، علیرضا بهادری ۱۶۵

### ۵-۴- محاسبه نیروی پرس قطعه

در ابتدا به منظور اینکه فشار داخلی به تنهایی دچار تغییر شکل پلاستیک لوله نشود و محیط لوله براثر فشار داخلی تغییری نداشته باشد، فشار داخل لولهٔ آلومینیومی AA6063، ۱۰۰ بار فرض شده است. سپس با در نظر گرفتن این فرض، برای غلبه بر نیروی عکس العمل ناشی از تغییر فرم باید از پرس استفاده کنیم که می توان نیروی پرس را از رابطهٔ ۱ محاسبه کنیم که در این رابطه، F نیروی مورد نیاز برحسب نیوتون، P فشار داخلی برحسب بار و A مساحت سطح مقطع ناحیهٔ پرسکاری برحسب میلی متر مربع می باشد.

(1)

با جایگذاری مقادیر P و A که به ترتیب برابر ۱۰۰ بار و ۴۰۰۰ میلیمتر مربع میباشد در رابطهٔ ۱، مقدار F، ۴ تن به دست میآید. درنتیجه پرس ۴ تن به بالا مورد نیاز میباشد. در این آزمایش تجربی از پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰ تن استفاده شده است.

## ۵-۵- محاسبهٔ نیروی محوری وارده به سنبهها، پیچها و آببندی

برای تأمین نیروی آببندی محوری، از دو پیچ M۲۰ خشکه فولادی با درجهٔ استحکام ۸٫۸ استفاده شده است. مقدار استحکام کششی آنها ۸۰۰ مگاپاسکال میباشد. مقدار نیرویی وارده از طرف این پیچها به سنبهها از دو طرف راست و چپ محور، باید از نیروی وارده از طرف سنبهها به پیچها در هنگام اعمال فشار داخلی و عملیات پرسینگ، بیشتر باشد. مقدار نیرو از رابطهٔ زیر به دست میآید.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{(1)}$$

که در این رابطه، A سطح مقطع سنبه محوری برحسب میلیمتر مربع، F نیروی وارده به سنبه برحسب نیوتن و σ تنش وارده به سنبهٔ محوری برحسب مگاپاسکال میباشد. از آنجایی که شعاع سنبه برابر ۲۲/۵ میلیمتر بوده و تنش وارده بر سنبهٔ محوری برابر ۱۰۰ بار میباشد، مطابق رابطهٔ ۲ مقدار F، ۱۵۸۹۶/۲۵ نیوتون به دست می آید.

اکنون برای محاسبهٔ تنش وارده بر پیچ M۲۰ محوری، نیاز به قطر ریشه پیچ داریم که برای محاسبهٔ آن از رابطهٔ زیر استفاده میکنیم:

 $d_1 = D - 1.082P \tag{(Y)}$ 

که در این رابطه، P گام پیچ، D قطر بزرگ پیچ و  $d_1$ قطر ریشه پیچ بوده و هر سه برحسب میلیمتر میباشند. با قرار دادن مقادیر مربوطه در رابطهٔ ۳،  $d_1$  برابر ۱۷/۳ میلیمتر میشود. اکنون با داشتن قطر ریشه پیچ، نیروی وارد بر پیچ و استفاده از رابطهٔ ۲ مقدار تنش وارد بر پیچ برابر ۶۷/۶۰ مگاپاسکال به دست میآید. پس با توجه به استحکام تسلیم پیچهای استفاده شده و مقدار تنش ایجادشده روی این پیچهای استفاده تک در پیچ به وجود نخواهد آمد.

## **۵-8- محاسبه نیروی برشی وارد بر پیچ M۲۰ محوری**

مقدار تنش برشی پیچ مطابق رابطهٔ ۴ محاسبه می شود که در این رابطه F نیروی وارد بر پیچ برحسب نیوتون،  $d_1$  قطر ریشه  $g_1$  بیچ برحسب میلی متر، n ارتفاع مهره (طول در گیری پیچ با مهره) برحسب میلی متر و  $\tau$ تنش برشی برحسب مگاپاسکال می باشد.

$$\tau = \frac{2F}{\pi \times d_1 \times h} \tag{(f)}$$

با جایگذاری مقادیر در رابطهٔ بالا، تنش برشی که به هرکدام از پیچهای M۲۰ چپ و راست محوری وارد میشود، برابر ۲۹/۲۶ مگاپاسکال به دست میآید.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

### ۱۶۶ مراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

### ۵-۷- جنس ابزار و قالب

در طراحی و ساخت قالب در این آزمایش، کفشک پایین، سنبه گیر چپ و راست و توپی سنبهٔ قالب از جنس فولاد ساده ساختمانی ST37 در نظر گرفته شده است. این اجزاء مجموعهٔ شکل دهی در تماس با لوله نبوده و دچار ساییدگی نمی شوند به همین دلیل از جنس با سختی بالا برای آن ها استفاده نشده است. سنبه، اینسرتهای چپ و راست و قسمت پایینی قالب (ماتریس) از جنس فولاد سخت VCN150 ساخته شده است تا دقت ابعادی آن ها در سایش از بین نرود. همچنین تمامی پیچهای بکار رفته در دستگاه از نوع خشکه فولادی ۸٫۸ هستند.

## ۵-۸- تعیین نوع آببندی

کوچک ترین نشتی در دو انتهای لوله سبب افت فشار داخلی و عدم موفقیت در فرایند هیدروفرمینگ می گردد. به این دلیل از یک مقطع مخروطی در آببندی بین سنبه محوری و سوراخ (حفره) ماتریس استفاده شده است و از دو پیچ M۲۰ هم جهت تأمین نیروی محوری آببندی استفاده شده است (شکل ۹).



شکل ۹ محل قرارگیری پیچ M۲۰ جهت تامین نیروی محوری آببندی

## ۵-۹- سیستم هیدرولیک تغذیه محوری و آببندی

برای سیستم اعمال فشار به داخل لوله از یک پمپ هیدرولیک دستی ۴۰۰ بار استفاده شده است. در خروجی این پمپ یک شیر یک طرفه جهت اعمال فشار به داخل لوله به کار رفته است. شیر یک طرفه توسط شلنگ به شیر فشارشکن که مجهز به گیج اندازه گیری فشار میباشد متصل می گردد. سپس مطابق شکل ۱۰، شیر فشار شکن توسط شلنگی به سنبهٔ محوری سمت راست که دارای سوراخ محوری به قطر ۳ میلی متر است، جهت اعمال فشار سیال ورودی به داخل لوله پیچ شده است. در شکل ۱۱ نیز نحوهٔ کار سیستم هیدرولیک در حین انجام فرایند هیدروفرمینگ را نشان داده شده است.



شکل ۱۰ اتصال شلنگ پمپ دستی به سنبهٔ محوری

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

سید جلال هاشمی، علیرضا بهادری ۱۶۷



شکل ۱۱ نمایی از پرس و قالب در آزمایش تجربی

۵-۱۰- منحنی بارگذاری در آزمایش تجربی

سه روش برای اعمال بار برای ساخت قطعه در نظر گرفتهشده که در زیر به آنها اشاره شده است:

۱- اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلیمتر بدون اعمال فشار داخلی

۲- اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار پس از اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلیمتر بعد از مماس شدن با لوله

۳- مماس کردن سنبه با لوله و تأمین نیروی مماس سپس اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار ، اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلیمتر



قطعات تولیدشده بهوسیلهٔ هر سه روش بارگذاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

شکل ۱۲ قطعات تولید شده بهوسیلهٔ هر سه روش بارگذاری

۵-۱۱- پروفیل محیط بیرونی قطعات تولید شده با مسیر بارگذاری متفاوت در فرایند تجربی

با توجه به سه منحنی بارگذاری ۱، ۲ و ۳ در آزمایش تجربی، پروفیل سطح مقطع بیرونی قطعات در شکل ۱۳، ۱۴ و ۱۵

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

### ۱۶۸ طراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لولههای آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

نشان داده شده است. برای به دست آوردن پروفیلهای محیط بیرونی از دستگاه اندازه گیری CMM ونزل<sup>۱</sup> در مرکز تحقیقات موتور ایرانخودرو استفاده شده است. همانطور که در شکلها نشان داده شده، هنگام استفاده از منحنی بارگذاری ۱، به دلیل اینکه فشار داخلی صفر میباشد قرشدگی در بالای قطعه اتفاق افتاده ولی هنگام استفاده از منحنی بارگذاری ۲ و ۳ به دلیل وجود فشار داخلی و تنش در داخل لوله، پروفیل محیط بیرونی قطعه، صاف تر به دست آمده است.



شکل ۱۳ پروفیل محیط بیرونی بهدست آمده از منحنی بارگذاری ۱



شکل ۱۴ پروفیل محیط بیرونی بهدست آمده از منحنی بارگذاری ۲



شکل ۱۵ پروفیل محیط بیرونی بهدست آمده از منحنی بارگذاری ۳

<sup>1</sup> Wenzel

سید جلال هاشمی، علیرضا بهادری ۱۶۹

۵-۱۲- بررسی توزیع ضخامت در روش تجربی

به منظور بررسی نتایج تجربی، قطعهٔ شکل داده شده به وسیلهٔ منحنی بار گذاری ۲، مطابق شکل ۱۶ از مقطع میانی با استفاده از دستگاه وایر کات<sup>۱</sup> بریده شده و توزیع ضخامت و پروفیل سطح بیرونی آن بررسی شده است. شکل ۱۷ توزیع ضخامت به دست آمده را نشان می دهد. در این نمودار مقادیر ضخامت برای ۳۵ نقطه بافاصله برابر از نقطه میانی سطح بالایی مقطع تا نقطهٔ میانی سطح پایینی نشان داده شده است که به علت تقارن توزیع ضخامت فقط در یک نیمهٔ مقطع نشان داده شده است.



شکل ۱۶ سطح مقطع میانی قطعه شکل دادهشده



شکل ۱۷ توزیع ضخامت در مقطع میانی برای منحنی سوم با فشار حداکثر ۱۰۰ بار

با بررسی توزیع ضخامت در آزمایش تجربی در صفر بار، بیشترین ضخامت ۱/۵۵ میلیمتر و کمترین ضخامت ۱/۴۸ میلیمتر و اختلاف این دو نقطه ۰/۰۷ میلیمتر میباشد. همچنین لازم بهزور است که ضخامت بیشتر نقاط ۱/۴۸ میلیمتر میباشد. در روش تجربی با فشار داخلی ۱۰۰ بار، بالاترین ضخامت ۱/۵۶ میلیمتر و کمترین ضخامت ۱/۴۵ میلیمتر است و اختلاف این دو نقطه ۱/۱۰ میلیمتر میباشد. با توجه به اینکه در فشار ۱۰۰ بار کمترین اختلاف بیشینه و کمینه نقاط (شکم) در طول و عرض قطعه تولیدی بهدستآمده است و ازآنجاییکه در فشار ۱۰۰ بار کمترین اختلاف بیشینه و کمینه نقاط (شکم) در طول و عرض فشار داخلی ۱۰۰ بار، هم در شبیهسازی عددی و هم روش تجربی تولید قطعه مستطیل شکل، بهینه میباشد.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Wirecut

## ۶- نتیجهگیری

با بررسی روش تجربی انجامشده در این تحقیق نتایج زیر حاصل شدهاند:

- ۱- با توجه به اینکه گوشههای بالایی و پایینی قطعه از پارامترهای مهم در تولید قطعه میباشد همچنین گوشههای بهینه، گوشههای با شعاع کمتر و تیزتر بوده، درنتیجه مسیر منحنی بارگذاری نوع سوم یعنی اعمال فشار داخلی ابتدایی و سپس جابجایی قالب با شعاع گوشه بالایی ۵ میلیمتر و شعاع گوشه پایینی ۶ میلیمتر پیشنهاد میشود.
- ۲- اختلاف بیشینه و کمینه نقاط (شکم)، روی عرض و طول قطعه باید حداقل باشد. هرچه این اختلاف کمتر باشد درنتیجه پروفیل یکنواخت با محیط سطح مقطع مناسب تولید خواهد شد و در روش تجربی اول اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار سپس جابجایی قالب پیشنهاد میشود. در این روش اختلاف شکم عرضی ۲۰/۴ میلیمتر و اختلاف طول شکم ۱۰ میلیمتر به دست میآید.
- ۳- با توجه به اینکه توزیع ضخامت در روش تجربی پارامتر مهمی میباشد. در روش اول اعمال فشار داخلی و بعد جابجایی قالب، روش بهینه میباشد.

۴– یکی از پارامترهای مهم تولید قطعه، پروفیل سطح مقطع یکنواخت بدون قرشدگی و فرورفتگی میباشد. با توجه به پروفیلهای بهدستآمده در روش تجربی و مقایسه این سه پروفیل، فشار داخلی ۱۰۰ بار منحنی بارگذاری فشار بهینه میباشد و پروفیل سطح مقطع یکنواخت بهدستآمده میآید.

## ۷- مراجع

- [1] Gray J E, Devereaux A P, Parker W M. Apparatus for making wrought metal T's. Google Patents; 1940.
- [2] Fuchs F. Hydrostatic pressure--its role in metal forming. Mech Eng. 1966;88:34-40.
- [3] Asnafi N. Analytical modelling of tube hydroforming. Thin-walled structures. 1999;34:295-330.
- [4] Zafar N. Optimization of tube hydroforming process. Michigan State University. 2002.
- [5] Singh H. Fundamentals of hydroforming. Society of Manufacturing Engineers. 2003.
- [6] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. Computational Materials Science. 2009;47:146-152.
- [7] Hashemi S J, Naeini H M, Liaghat G, Karami J S, Roohi A H. Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria. Modares Mechanical Engineering. 2015;14.
- [8] Hwang Y-M, Altan T. FE simulations of the crushing of circular tubes into triangular cross-sections. Journal of materials processing technology. 2002;125:833-838.
- [9] Hwang Y-M, Altan T. Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die. Finite Elements in Analysis and Design. 2003;39:1071-1082.
- [10] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. Die closing force in low pressure tube hydroforming. Journal of materials processing technology. 2010;210:2238-2244.
- [11] Zhang X, Chu G, He J, Yuan S. Research on a hydro-pressing process of tubular parts in an open die. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;104:2795-2803.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲

سید جلال هاشمی، علیرضا بهادری ۱۷۱

- [12] Zhang X, He J, Chu G, Yuan S. Experimental research on deformation and dimensional accuracy of rectangular-section tubular part during open die hydro-pressing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2021;235:705-714.
- [13] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. Buckling in low pressure tube hydroforming. Journal of Manufacturing Processes. 2017;28:1-10.
- [14] Chu G-n, Lin C-y, Li W, Lin Y-l. Effect of internal pressure on springback during low pressure tube hydroforming. International Journal of Material Forming. 2018;11:855-866.
- [15] Trott A, Nikhare C P. Effect of preform during low pressure tube hydroforming.52019;V002T002A023.
- [16] Nikhare C P, Buddi T, Kotkunde N, Singh S K. Effect of Die Velocity on Tube Deformation Mechanics During Low Pressure Tube Hydroforming Process Sequence Variation.85550;V02AT02A051.
- [17] Nikhare C P. A numerical analysis on microtube hydroforging. Advances in Materials and Processing Technologies. 2021:1-22.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند/ سال ۱۴۰۱/ دوره ۲/ شماره ۲