Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(3) (2020) 139-140
DOI: 10.22060/mej.2018.14436.5861

Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Parameters in Shear Spinning Process of a Conic Sample

T. Bayat Bodaghi, D. Akbari* , H. Moslemi Naeini

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Shear forming is a kind of spinning process which is used for manufacturing of the components that have a high weight to strength ratio. In this paper, the main parameters for manufacturing of a constant thickness conic shaped specimen have been extracted, using shear spinning process. To this regard a pre designed pre-form was used to improve the efficiency of the shear spinning process of the conic sample of this study. So, the main parameters of shear spinning of this specimen are derived using experimental and numerical tries. These parameters include mandrel rotational speed, roller feed rate, tailstock pressure and friction ratio. To this regard, the optimized efficient parameters were extracted and the obtained data has been compared and validated with the experiment. Moreover, a new cup shaped preform has been used. Using of this preform can beneficially improve the quality of the final shape of the specimen. With comparison of the results of the experiments and numerical study, the optimized efficient forming parameters of the offered preform have been derived. It was observed that using of the designed preform will cause in better cone part specifications due to its close dimensional and geometrical specifications. It was shown that the proposed method can beneficially lead to better results in the shear spinning process.

Review History:

Received: 5/13/2018
Revised: 10/15/2018
Accepted: 11/10/2018
Available Online: 11/20/2018

Keywords:

Shear forming
Constant thickness
Preform
Finite element modeling

1. Introduction

The shear forming process is a special form of rotary shaping in which the cross-sectional area of the piece changes during the operation and hence can be used in making variable-thickness parts [1]. In the following, a schematic representation of this process is shown in Fig. 1.

Due to the multiplicity of parameters involved in this process, these parameters should be thoroughly investigated and optimized in order to obtain the appropriate product precision [2]. The most important parameters affecting this process are [3]:

- The shaping tool geometry

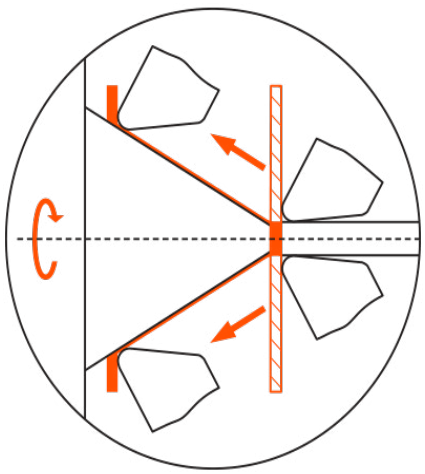


Fig. 1. Schematic of shear forming process

*Corresponding author's email: daakbari@modares.ac.ir

- The initial thickness of the sheet
- Material type and geometry
- The precision of installation and alignment of rollers
- The angle of attack and the angle of the shaping tool
- Preformed geometry (geometric shape preformed before shaping)
- The type of lubricant used and its temperature
- Thickness distribution in sheet or preform

The main purpose of this research is to investigate the creation of an initial preform for the production of samples to improve parameters and production conditions, as well as the final precision in terms of geometric parameters. To this regard, verified finite element model has been used to investigate some of the shear forming parameters.

2. Methodology

For the experimental design, the specimen of the cone sample was determined from a high purity copper grade. First, the raw material of the flat sheet and then the pre-designed form was used. For the experiments, required components of forming mechanism such as forming rollers and mandrel were designed perfectly. After designing and manufacturing the components, the parameters of the forming machine should be adjusted to create the desired sample. The most important parameters in this section are the mandrel rotational speed and the progression of the shaping tools.

According to the results of preliminary experiments in the production of similar components, the mandrel rotational speed was measured in three zones of 195, 340 and 420 rpm and progress rate in three ranges (0-100) , (0-150) and (0-220).

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

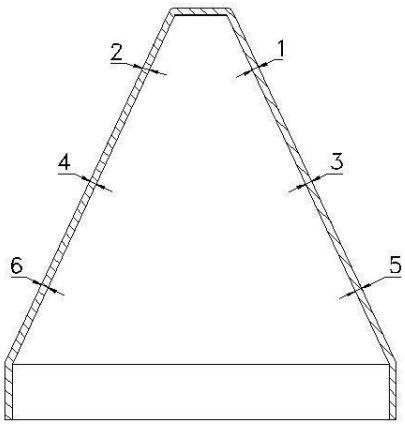


Fig. 2. Measuring points of the wall thickness in produced samples

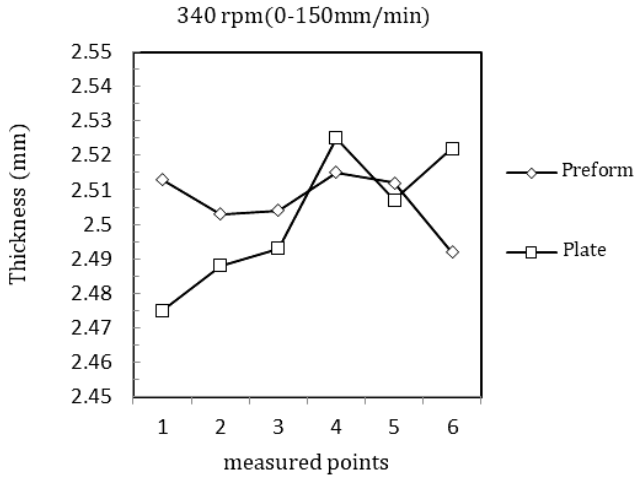


Fig. 3. Variations of the thickness in the both plate and preform shaped samples

The accuracy of the results of the experiments should be compared with the results of the simulations. So, some parameters should be considered for measurement, which can be measured in simulation software. Because of the possibility of accurate measurement of the wall thickness of the cone in different sections, measurements were performed at six points of the cone edge in accordance with Fig. 2 and the results were compared in terms of the graphs.

Due to the shape of the fragment and its high sensitivity as well as the final packet tolerances, a non-destructive ultrasonic measuring instrument is used to determine the thickness of the shell in different regions. By examining the final desired shape of the conic, optimum Rotational speed of the mandrel was selected as 340 rev /min and optimum progression of the shaping tools as 150 mm /min.

To study the effects of using a preform instead of a sample sheet, a pre-designed preform was used to form the final specimen in addition to the simple specimen.

3. Results and Discussion

To measure the uniformity of the produced parts, six points were measured. A closer look at the graphs obtained from various speeds and tool advances, shows that at three speeds with a progression of 150 mm /min, the results are almost the same. It also has been observed that due to the completion of the continuous process on a flat sheet forming, modification of the flat sheet to a pre-formed sheet can beneficially reduce the percentage of changes in the thickness of the piece.

Regarding to the final dimensions of the designed components such as preforms, plain blanks, mandrels, pins, rollers and birdies, the finite element modeling of the process was performed using ABAQUES software. In this manner, some other researchers used numerical simulation to model shear spinning process [4]. After performing simulations and according to the measurements of the thickness of the conical edging wall of the simulated piece, in both the flat panel and the preformed application, the thickness was in the acceptable area, but the wall thickness in the preform has a less dispersion relative to the flat sheet as is shown in Fig. 3.

By examining the parameters, it is shown that with increasing speed of rollers from 100 to 150 mm /min at a constant rotating speed, the internal rigidity values fall from 0.087 to 0.017 and the outer rigidity from 0.118 to 0.0.03 mm. In such a situation, the spring back values of the internal angle have dropped from -7 to zero to a maximum of +1. This reflects the fact that with the increase of the above parameter, the material is more fluid than the pinnacle and has been improved.

It also has been observed that the speed of the shaping tool has a little effect on the straightness of the cone.

4. Conclusions

In this paper, shear spinning of a conic sample was investigated. To study the effects of the main effective parameters, experimental tests and numerical analysis was performed. According to the results, the following conclusions can be pointed:

- Using a pre-formed shape sample instead of a sheet block can be beneficially improve the final quality of the conic product
- The optimal mandrel rotational speed to form the conic sample presented in this study is 340 rev /min.
- A verified finite element model can be used to predict the thickness variation in the presented sample.
- The roller bearing radius, attack and scape angle was derived as 4 mm, 47 ° and 24.5 ° respectively to reach the best production conditions.

References

[1] D. Marini, D. Cunningham, J. Corney, "A Review of Flow Forming Processes and Mechanisms", *Key Engineering Materials*, 651 (2015) 750-758.

[2] L. Wang, H. Long, A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12) (2011) 2140-2151.

[3] M. Guillot, T. McCormack, M. Tuffs, A. Rosochowski, S. Halliday, P. Blackwell, Shear forming of 304L stainless steel – microstructural aspects, *Procedia Engineering*, 207 (2017) 1719-1724.

[4] L.-l. SUN, A.-q. NIE, X.-j. HU, K.-m. XUE, FE numerical simulation of automobile hub spinning forming process [J], *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 4 (2008) 0-14.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۳، سال ۱۳۹۹، صفحات ۵۴۳ تا ۵۵۴
DOI: 10.22060/mej.2018.14436.5861

بررسی تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی قطعه مخروطی شکل در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی

توحید بیات بداقی، داود اکبری*، حسن مسلمی نائینی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ، ایران

خلاصه: شکلدهی چرخشی برشی، نوعی از فرآیند شکلدهی است که برای تولید قطعاتی با نسبت وزن به استحکام بالا کاربرد دارد. در این پژوهش، پارامترهای لازم برای تولید یک نمونه مخروطی شکل با ضخامت ثابت و به کمک طراحی یک پیش فرم مناسب استخراج شده است. پارامترهای مهم در این خصوص شامل مقدار بهینه سرعت چرخشی سنبه، میزان پیشروی غلتکهای شکلدهی، میزان فشار پشت مرغک و ضریب اصطکاک بهینه فرآیند می باشد. در این راستا پارامترهای ذکر شده با استفاده از مدلسازی اجزای محدود، در فرآیند تولید نمونه مزبور پیاده سازی شده و با نتایج تجربی تولید قطعه مقایسه و اعتبارسنجی گردید. در روش تولیدی پیشنهادی، از یک پیش فرم جدید کاپ شکل به جای ورق صاف استفاده شده و نتایج قطعات تولید شده با نتایج قطعات تولید شده از ورق صاف مقایسه گردید. استفاده از این پیش فرم به منظور بهبود فرآیند شکل دهی و جهت مقایسه با روش مرسوم می باشد. با مقایسه نتایج، مقدار بهینه پارامترهای شکلدهی در تولید استخراج گردید و مشاهده شد که استفاده از پیش فرم معرفی شده، بدلیل مشخصات ابعادی و هندسی، نتایج مطلوب تری در قطعه نهایی حاصل می نماید. از این رو و با توجه به نتایج حاصله و همچنین صحه گذاری مناسب نتایج، می توان از آن برای افزایش کیفیت و بهینه سازی این فرآیند در قطعات پیچیده تر بهره برد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۳-۰۲-۱۳۹۷
بازنگری: ۲۳-۰۷-۱۳۹۷
پذیرش: ۲۹-۰۸-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۹-۰۸-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
شکل‌دهی چرخشی برشی
پیش فرم
تحلیل اجزای محدود

۱- مقدمه

تولید قطعات خاص و پیچیده با نسبت وزن به استحکام بالا از موادی نظیر مس، آلومینیوم و فولاد زنگ نزن با تلرانس‌های بسته ابعادی و هندسی، یکی از نیازهای روبه‌رشد در صنایع مختلف می‌باشد. این قطعات ممکن است از لحاظ هندسی تقارن محوری و یا تقارن صفحه‌ای داشته باشند.

قطعات مخروطی پوسته‌ای با ضخامت ثابت و یا متغیر، از این دست قطعات می‌باشدکه مصارف زیادی در صنایع مختلف دارد. صرف هزینه‌های بالای تأمین مواد اولیه تولید، ساخت وانجام آزمون‌های نهایی برای کنترل و همچنین نرخ بالای خرابی برخی قطعات، باعث شده است که صنایع برای حل این مشکل، به سراغ روش‌های نوین درحوزه ساخت بروند. شکل‌دهی چرخشی[1] برشی یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای تولید قطعات مخروطی پوسته‌ای می‌باشد. این روش یکی از انواع شکل‌دهی چرخشی است که به دلیل دقت خاص عملکردی، از دقیق‌ترین روش‌های شکل‌دهی است. از این‌رو و با بررسی‌های انجام شده، روش به‌عنوان مناسب‌ترین روش جهت بدست آوردن مشخصات نهایی مورد نظر در تولید بسیاری از قطعات معرفی شده است. در این فرآیند، قطعه کار در ناحیه بین ماندرل دوار و ابزار(به شکل اهرم یا غلتک) که به صورت محوری و یا محوری – شعاعی حرکت می‌کند، به صورت نقطه‌ای در محل تماس، تغییر شکل دائمی ایجاد می‌کند. با این روش قطعاتی به شکل مخروط، نیم کره، لوله، استوانه یا ترکیبی از آنها، در تنوعی از اندازه و شکل ساخته می‌شوند.

با توجه به فیزیک فرآیند و تعدد پارامترهای دخیل در آن، تحقیقات مختلفی بر روی فرآیند مزبور انجام گرفته که در هریک از آنها، اثر برخی از پارامترها بررسی شده است. مارینی و همکاران طی یک مقاله مروری، بررسی جامعی در خصوص فرآیند شکل‌دهی برشی انجام دادند [۱]. رضوی و همکاران فرآیند شکل‌دهی چرخشی را بر روی یک قطعه ساده بصورت عملی اجرا کردند وموانع موجود در تحلیل اجزا محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی یک قطعه را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این آزمایش، شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی در

1 Spinning

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Daakbari@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام گرفت و برای مشاهده توزیع کرنش، با شبکه بندی ورق اولیه بصورت عینی این توزیع کرنش را بر روی قطعه کار مشاهده نمودند [۲]. گویلوت و همکاران فرم‌دهی چرخشی برشی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را از منظر خواص میکرو ساختاری به صورت تجربی بررسی کردند [۳]. در این مقاله آنان تغییرات تنش موضعی را در شکل‌دهی چرخشی برشی ماده مذکور بررسی نمودند. ژان و همکاران مشاهده کردند با رشد نرخ پیشروی رولرها، افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی و افزایش ضخامت دیواره‌ها، شکل ظاهری ضعیف و دقت قطعه کاهش می‌یابد. همچنین در طی فرآیند مشاهده گردید که با افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها، شکل ظاهری قطعه ضعیف و دقت ابعادی آن کاهش می‌یابد [۴]. علاوه بر فعالیت‌های تجربی, از روش اجزای محدود در مدل‌سازی و تحلیل بسیاری از فرآیندهای ساخت استفاده شده است [۵]. بایچیان[1] و همکاران در آنالیز نرم‌افزاری فرآیند به این نتیجه رسیدند که مدل اجزا محدود با درنظرگرفتن تغییر شکل الاستیک، نمی‌تواند به تنهایی برای آنالیز برگشت فنری قطعات در فرآیند شکل‌دهی چرخشی پیچیده استفاده شود [۶]. سان لی[2] و همکاران به این نتیجه رسیدند که برای ساده‌سازی فرآیند آنالیز می‌توان از بررسی اثرات تغییر شکل الاستیک به‌دلیل ناچیزبودن آن، در فرآیند شکل‌دهی چرخشی، صرف نظر کرد. هرچه پارامترهای فرآیند کمتر باشند درنهایت آنالیز نهایی به اندازه‌های مطلوب نزدیکتر خواهد بود [۷]. لی وانگ[3] و لانگ با بررسی مسیرهای مختلف در فرآیند شکل‌دهی به این نتیجه رسیدند که مسیر مقعر بیشترین نیروی ابزار و میزان کاهش ضخامت در قطعه را ایجاد می‌کند [۸]. جیمز[4] و همکاران مشاهده کردند بیشترین لاغرشدگی به شدت به نیروی میانگین وابسته است. استراتژی‌هایی در راستای کاهش نیروی متوسط به پارگی قطعه‌کار خواهد انجامید [۹]. هان دونگ[5] و همکاران مکانیزم تغییر شکل پوسته آلیاژ تیتانیوم در فرآیند شکل‌دهی چرخشی داغ تحت اعمال شرایط نیروی اعمالی مختلف مورد بررسی قرار دادند و با نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی آن پرداختند [۱۰]. کلینر[6] و همکاران از دو روش طراحی آماری تجربی و روش تحلیل سری‌های زمانی برای بدست آوردن پارامترهایی که در آزمایشات تجربی نمی‌توان بدست آورد، استفاده کردند. همچنین شبیه‌سازی این فرآیند را در نرم افزار آباکوس انجام دادند [۱۱]. کین شنگ ژو[7] و همکاران تحلیل المان محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی با استفاده از دو مدل ساده شده الاستیک-پلاستیک و ریجید-پلاستیکرا انجام دادند. نتیجه تقریباً یکسان و تفاوت در توزیع ناحیه تنش و کرنش مشاهده گردید. میزان کرنش در مدل صلب-پلاستیک کمتر از مدل دیگر بود. با افزایش نیروی شکل‌دهی شعاع نوک ابزار باید افزایش می‌یافت. شبیه‌سازی فرآیند را در نرم‌افزار دیفرم انجام دادند [۱۲]. کن ایچیرو[8] و همکاران یک شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود فرآیند شکل‌دهی چرخشی را بر پایه مدل‌سازی متقارن در نرم افزارآباکوس انجام دادند [۱۳]. آلبرتی[9] و فراتینی تحلیل ساده‌شده سه بعدی بر پایه تغییر شکل ریجید-پلاستیک با استفاده از مدل کردن متقارن را انجام دادند [۱۴].

عمده تحقیقات صورت گرفته در خصوص این فرآیند، به‌دلیل تعدد پارامترهای مؤثر، معطوف به یک یا چند پارامتر اثرگذار است. در حالی‌که برای بدست آوردن کیفیت مناسب و مورد انتظار برای هر قطعه و زمان سیکل تولید مطلوب، در ابتدا لازم است تا تمامی عوامل و پارامترها با استفاده از تجربه و مهارت‌های مهندسی بصورت هماهنگ تنظیم شوند. در عمل برای همه حالات کاربردی، یک تنظیم مشخص و کلی قابل تجویز نیست. از این رو معمولاً بهبود در یک جنبه منجر به بروز مشکل در یک یا چند جنبه دیگر خواهد شد.

هدف این پژوهش بررسی تجربی ایجاد یک پیش فرم اولیه برای تولید نمونه برای بهبود پارامترها و شرایط تولیدی و همچنین بهبود قطعه نهایی از نظر پارامترهای هندسی می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی دقیق نرم‌افزاری این فرآیند برای قطعه مورد نظر و بررسی پارامترهای اثر گذار از اهداف اصلی در این تحقیق است. در این راستا نمونه مخروطی شکل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر (در کل طول یال آن) مطابق با پارامترهای طراحی شده مدل‌سازی و نتایج حاصله با نتایج تجربی حاصل از تولید عملی نمونه مذکور مقایسه و اعتبارسنجی شده است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل مقدار بهینه سرعت چرخشی سنبه یا مندرل، میزان پیشروی غلتک‌های شکل‌دهی، میزان

1 Bai Qian
2 Sun Li
3 L. Wang
4 James
5 Han Dong
6 Kleiner
7 QinSheng Xue
8 Ken Ichiro
9 Alberti

فشار پشت مرغک و ضریب اصطکاک بهینه فرآیند می‌باشند.

۲- معرفی روش و پارامترها

فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی، حالت خاصی از شکل‌دهی چرخشی است که در آن سطح مقطع قطعه در حین انجام عملیات تغییر می‌کند و از این‌رو در ساخت قطعاتی با ضخامت متغیر قابل کاربرد است. در شکل ۱ شماتیکی از این فرآیند نشان داده شده است.

با توجه به تعدد پارامترهای دخیل در این فرآیند، جهت دستیابی به دقت مناسب محصول بایستی این پارامترها به دقت بررسی و بهینه‌سازی گردند. از جمله پارامترهای مهم مؤثر بر این فرآیند عبارتند از [۱ و۳]:

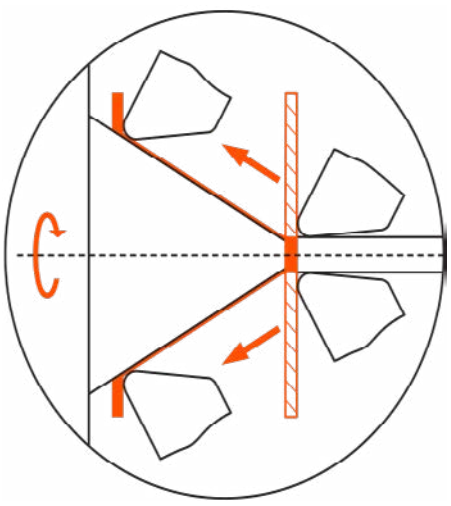
- فاصله بین مندرل و ابزار شکل دهنده
- شعاع سر ابزار شکل دهنده
- میزان پیشروی ابزار شکل دهنده
- تعداد دوران مندرل و میزان پیشروی دستگاه
- ضخامت اولیه ورق در حال تغییر شکل
- نوع مواد
- زاویه مخروط مندرل
- دقت نصب و رو به رو بودن و هماهنگی غلتک‌ها نسبت به هم و نسبت به مندرل و قطعه کار
- سختی ماده در مفهوم مقاومت به تغییر شکل ماده و تنش جریان
- زاویه حمله و زاویه پرداخت ابزار شکل دهنده
- هندسه پیش فرم(شکل هندسی پیش فرم اولیه قبل از شکل‌دهی)
- تختی منطقه تحت تغییر شکل پیش فرم
- نوع روانکار مورد استفاده و دمای آن
- دمای تغییر شکل
- توزیع ضخامت در ورق یا پیش فرم
- سرعت نسبی نسبت به مندرل

در تحلیل این فرآیند و ارتباط پارامترها باید توجه داشت که خارج قسمت نرخ تغذیه غلتک با سرعت ماندرل که به عنوان نسبت تغذیه شناخته می‌شود که باید در طول عملیات ثابت بماند. درحالی‌که سرعت و تغذیه می‌توانند هرکدام درمحدوده مجاز تغییر کنند بدون اینکه تأثیر محسوسی در کیفیت کار بوجود آورند [۱].

براساس تحقیقات و تجربیات قبلی، انتخاب صحیح میزان فشار زیر سری و نگه دارنده بلنک اثر قابل توجهی در کیفیت مورد انتظار فرآیند شکل‌دهی دارد. فشار خیلی کم نشیمنگاه نمی‌تواند مانع گرایش قطعه کار به کمانش شود و موجب بی‌ثباتی فرآیند می‌گردد. از طرفی دیگر فشار خیلی زیاد موجب جریان بیش از حد و زیاد فلز به سمت محیط پیرامونی شده و باعث نازک شدن غیر قابل قبول و ضخامت ناهمگون قطعه خواهد شد [۱].

شکل مسیر شکل‌دهی چرخشی و حرکت غلتک بر ضخامت دیواره در سراسر طول قطعه کار تأثیری اساسی دارد. می‌توان با تعریف پاس‌های اضافی و انجام شکل‌دهی چرخشی طی چندین مرحله با مسی‌رهای میانی از بروز عیوبی مثل ترک اجتناب کرد [۸]. از طریق تعیین نوع و شکل مماس مسیر حرکت و تماس غلتک با قطعه کار در هر پاس می‌توان احتمال کمانش یا پیچش را کم نمود.

طراحی غلتک، نکته‌ای اساسی در مؤلفه‌های شکل، دقت و صحت می‌باشد که به خوبی اثر خود را در پروفیل ضخامت دیواره در سراسر طول قطعه کار نشان می‌دهد [۸]. ضمن اینکه قطر غلتک تأثیر اندکی بر کیفیت محصول دارد، دماغه و شعاع شانه نسبتاً کوچک غلتک باعث کاهش یکنواختی ضخامت خواهد شد. در عملیات نهایی و پرداخت کاری، شعاع کوچک دماغه غلتک باعث ایجاد دقت بیشتری می‌گردد ضمن اینکه افزایش شعاع باعث صافی سطح بهتری خواهد شد. سطوح فوق‌العاده صاف تنها وقتی بدست می‌آیند که از ابزار پرداخت



شکل ۱: شماتیک فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی

Fig. 1. Schematic of Shear forming process

کاری مطابق با استاندارد برای آینه‌ای کردن قطعه‌کار استفاده شود. نسبت قطر بلنک به قطر مندرل به عنوان نسبت شکل‌دهی چرخشی شناخته می‌شود. نسبت‌های بزرگتر و یا ورق‌های نازک‌تر مشکلات بیشتری در فرآیند اسپینینگ بوجود می‌آورند. همین که این نسبت از دو حد فراتر رود دیگر تضمینی برای موفق بودن فرآیند مگر در حالات استثنایی وجود نخواهد داشت. با تکرار پاس‌ها هر بار بالاتر رفتن استحکام مکانیکی عملیات شکل‌دهی چرخشی مشکل‌تر خواهد شد.

برای بدست آوردن کیفیت مناسب و مورد انتظار و زمان سیکل تولید مطلوب از قطعه کار لازم است تا بسته به موضوع تمامی عوامل و پارامترها با استفاده از تجربه و مهارت‌های مهندسی فرآیند بصورت هماهنگ تنظیم شوند. چنانچه پیش از این نیز شرح داده شد، در عمل برای همه حالات یک تنظیم مشخص وجود ندارد و باید بر اساس فرآیند مورد بررسی، پارامترها تعیین گردد.

تعداد و نوع مراحل عملیات شکل‌دهی چرخشی یا در اصطلاح روند فرآیند، تعیین‌کننده مراحلی است که باید در طی آن نمونه تکمیل گردد. به عنوان مثال تعداد دفعات رفت و برگشت یا پاس‌های میان مرحله و یا نرخ تغذیه و سایر موارد از این دست تعیین کننده روند فرآیند می‌باشد.

۳- آزمایش تجربی

۳-۱- شرح آزمایش

برای انجام آزمایش تجربی ساخت نمونه قطعه مخروطی مدنظر از جنس مس با درجه خلوص بالا درصد تعیین گردید. در ابتدا ماده اولیه ورق صاف و در ادامه پیش فرم طراحی شده، استفاده گردید. رولر یا غلتک یا ابزار شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی از اجزاء اصلی و تاثیرگذار بر مشخصات نهایی قطعه کار تولیدی می‌باشد. در ابزارهای شکل‌دهی دو زاویه حمله و پرداخت و شعاع نوک ابزار بر مشخصات مکانیکی و کیفیت سطح قطعه تولیدی تأثیر به سزایی دارند. در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی تمامی اجزاء درگیر در فرآیند تأثیر خود را در هندسه و مشخصات نهایی قطعه کار می‌گذارند. مندرل یا سنبه نیز که پیش فرم اولیه روی آن خوابانده می‌شود و عملاً شکل نهایی قطعه‌کار نیز است، با توجه به تلرانس‌های بسیار بسته‌ای که در قطعه مخروطی شکل مورد نظر موجود می‌باشد، لزوماً از تلرانس‌های بسیار بسته در طراحی و تولید برخوردار است.

برای ثابت نگهداشتن ماده اولیه یا پیش فرم بر روی مندل در مختصات مورد نظر برای شروع فرآیند، از ابزای بنام مرغک استفاده می‌گردد که باید فشاری یکنواخت و کافی را در طول کل فرآیند بر روی سنبه اعمال نماید تا قطعه‌کار در اثر نیروهای وارده به آن، از مختصات خود خارج نگردد. کوچکترین حرکت یا جابجایی و یا لغزش قطعه‌کار از مختصات تنظیم شده آن بر روی سنبه، موجب عدم تقارن قطعه تولید شده و یا ایجاد چروکیدگی و در نهایت خراب شدن کیفیت سطح قطعه‌کار خواهد شد.

۳-۲- تجهیزات و اجزای مکانیزم شکل‌دهی

دستگاه: برای تولید قطعه در نظرگرفته شده که یک قطعه مخروطی با ضخامت ثابت ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد، از دستگاه مخصوص فرم‌دهی چرخشی استفاده خواهد شد. این دستگاه دارای دو اسلایدر[1] می‌باشد و اسلایدرها با تبعیت از دو شابلون دقیق طراحی، ساخته و نصب شده برروی دستگاه، حرکت درراستای محور طولی دستگاه را انجام می‌دهند.

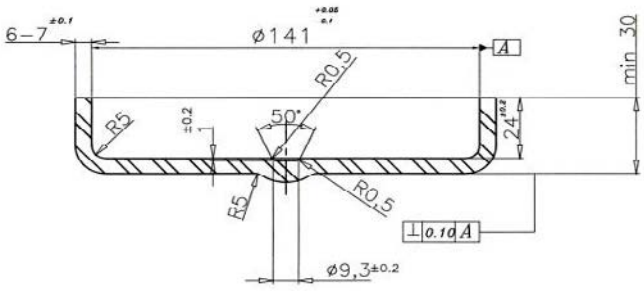
جنس قطعه مخروطی شکل: قطعه مخروطی شکل برای انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی، یک لاینر[2] ضخامت ثابت با جنس مس با درجه خلوص ۹۹/۹۹ با شماره استاندارد C۱۱۰۰۰ می‌باشد.

ماده اولیه یا پیش فرم: همانطوری‌که پیش‌تر به آن اشاره شد، در تولید نمونه‌های مشابه در این فرآیند، ماده اولیه یک ورق صاف می‌باشد بین مرغک و مندرل قرار می‌گیرد و سپس ابزار شکل‌دهی شروع به شکل دادن ورق می‌نماید. با توجه به هندسه و جنس قطعه، تجربیات و مطالعات صورت گرفته در خصوص عیوب بارز و تکرار شده [۱۵]، در این مقاله استفاده از پیش فرم یکی از راهکارهای اصلی کاهش عیوب در نظر گرفته شد. با آزمایش شکل‌های مختلف و با توجه به شرایط دستگاه موجود، در نهایت شکل پیش فرم نهایی طراحی و بجای ورق اولیه صاف به‌کار گرفته شد. شکل ۲ هندسه پیش فرم به‌کار گرفته شده را نشان می‌دهد.

در قسمت دهانه داخلی پیش فرم طراحی شده، یک حفره تعبیه شده است که برای هم محور شدن پیش فرم و مندرل در زمان بستن آن بر روی مندرل بکار گرفته می‌شود.

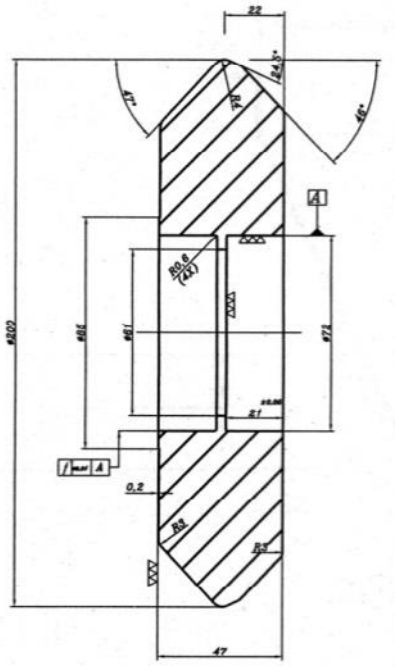
غلتک یا ابزار شکل‌دهی: غلتک یا ابزار شکل‌دهی در این

1 Slider
2 Liner



شکل ۲: هندسه پیش فرم نهایی مورد استفاده

Fig. 2. The geometry of the used preform



شکل ۳: مشخصات هندسی غلتک شکل‌دهی

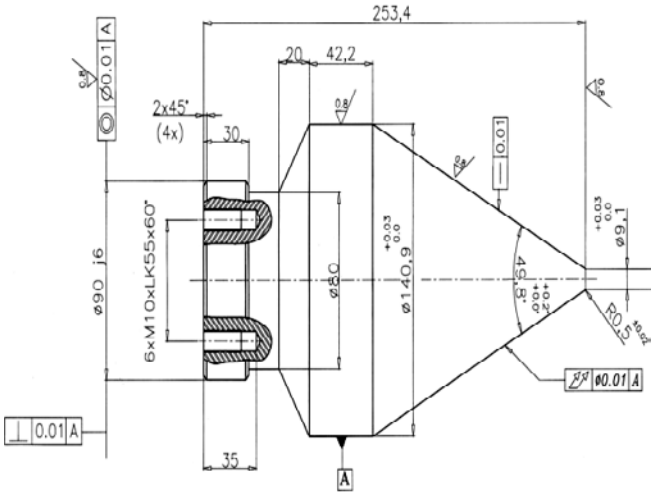
Fig. 3. The geometry of Forming Rollers

فرآیند از اجزاء اصلی و تاثیرگذار بر مشخصات نهایی قطعه کار تولیدی می‌باشد. دو ابزار یا غلتک شکل‌دهی هرزگرد بطور همزمان برای شکل دادن ورق اولیه با قطعه کار درگیر می‌شوند. در ابزارهای شکل‌دهی دو زاویه حمله و پرداخت و شعاع نوک ابزار در مشخصات مکانیکی و کیفیت سطح قطعه تولیدی تأثیر به سزایی دارند. با توجه به تجربه قبلی و انجام آزمایش‌های گوناگون برروی قطعات مختلف و با جنس‌های متفاوت، هندسه نهایی غلتک‌ها طبق زوایا و ابعاد ارائه شده در شکل‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مندرل یا سنبه: بخشی است که فرم قطعه روی آن خوابانده می‌شود و عملاً شکل نهایی قطعه است. با توجه به تلرانس‌های بسیار بسته‌ای که در قطعه نهایی مورد نظر است، در طراحی مندرل چه از نظر ابعادی و چه از نظر تلرانس‌های نصبی، الزامات ویژه‌ای لحاظ می‌گردد. مشخصات هندسی مندرل طراحی شده برای قطعه، در شکل ۴ نشان داده شده است.

شابلون‌ها: مسیر حرکتی ابزار یا غلتک شکل‌دهی از طریق الگو گیری از یک شابلون دنبال می‌شود. غلتک‌ها از طریق یک مکانیزم مکانیکی، از دو عدد شابلون که در دو طرف دستگاه نصب شده‌اند برای شکل‌دهی هندسه استفاده می‌کنند. این شابلون‌ها، فاصله غلتک تا سنبه را که تعیین‌کننده ضخامت نهایی قطعه می‌باشد نیز تعیین می‌کنند.

مرغک: برای ثابت نگهداشتن ماده اولیه یا پیش فرم برروی مندل در مختصات مورد نظر برای شروع فرآیند، از ابزای بنام مرغک استفاده می‌گردد که باید فشاری یکنواخت و کافی را در طول کل فرآیند برروی سنبه اعمال نماید تا قطعه‌کار در اثر نیروهای وارده به آن، از مختصات خود خارج نگردد. نیروی پشت مرغک که قطعه‌کار را بر روی سنبه نگه می‌دارد نیز در مشخصات و کیفیت قطعه تولیدی تأثیر بسزایی دارد. اگر نیروی مرغک زیاد لحاظ گردد موجب پارگی در نوک قطعه‌کار و همچنین عدم جریان یافتن فلز در قسمت ابتدایی قطعه‌کار می‌گردد. در صورتی‌که نیروی پشت مرغک نیز کم باشد، جابجا شدن قطعه‌کاز از مرکز سنبه و خراب شدن قطعه‌کار یا تولید قطعه‌ای غیرمتقارن حاصل خواهد شد. فشار تنظیم شده برای مرغک در مورد قطعه‌کار به صورت تجربی تعیین می‌گردد.



شکل ۴: مشخصات سنبه یا مندرل مورد استفاده در ساخت نمونه

Fig. 4. The specifications of used Mandrel

۳-۳- تولید نمونه

پس از طراحی و ساخت اجزا و قطعات مورد نیاز نظیر پیش فرم، سنبه یا مندرل، غلتک‌های شکل‌دهی، شابلون‌ها و مرغک، باید پارامترهای دستگاه شکل‌دهی برای ایجاد نمونه مطلوب تنظیم گردد. مهمترین پارامترهای مورد بررسی در این قسمت سرعت چرخشی سنبه یا مندرل و میزان پیشروی غلتک‌ها می‌باشد.

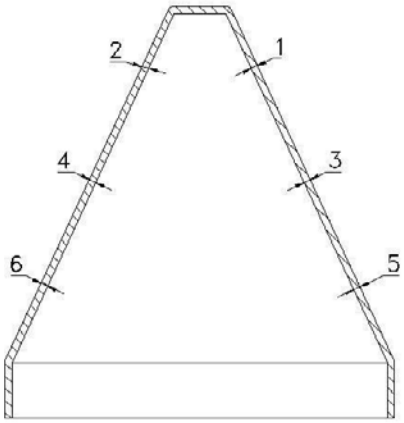
با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه در تولید قطعات مشابه، سرعت چرخشی سنبه در سه محدوده ۱۹۵، ۳۴۰ و ۴۲۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی در سه محدوده (۱۰۰-۰)، (۱۵۰-۰) و (۲۲۰-۰) مورد آزمون قرار می‌گیرند.

مهمترین مشخصات ابعادی و هندسی که در عملکرد قطعه مخروطی شکل مهم و تعیین‌کننده است عبارتند از راست بودن یال داخلی و خارجی مخروط، گردی در هر مقطع از مخروط، زاویه داخلی مخروط، اختلاف زاویه سنبه با زاویه داخلی، صافی سطح داخلی وخارجی و ضخامت دیواره مخروط در مناطق مختلف آن.

باتوجه به اینکه باید صحت نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شود، بنابراین پارامتری را باید جهت اندازه‌گیری در نظر گرفت که در نرم‌افزار شبیه‌سازی قابل اندازه‌گیری باشد. از آنجا که امکان اندازه‌گیری دقیق پارامترهای اشاره شده در بالا نظیر راست بودن و صافی سطح در نرم‌افزار شبیه‌سازی وجود ندارد، ضخامت دیواره مخروط در مقاطع مختلف، از روی نمونه‌های تولید شده استخراج گردیده و با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. اندازه‌گیری در شش نقطه از یال مخروط مطابق شکل ۵ انجام شد و نتایج بدست آمده در قالب نمودارها با یکدیگر مقایسه شد.

با توجه به شکل هندسی قطعه‌کار و حساسیت بالای آن و همچنین تلرانس‌های بسته قطعه نهایی، از ابزار اندازه‌گیری غیرمخرب فراصوتی برای تعیین ضخامت پوسته در نواحی مختلف استفاده شده است. بدین ترتیب که با بستن قطعه‌کار بر روی قیدوبند کنترلی طراحی شده و نصب فیکسچر، پراب[1] فراصوت در محل‌های مورد نظر قرار گرفته و پس از اندازه‌گیری ضخامت نقطه مورد نظر، با چرخاندن فیکسچر کنترلی به میزان ۱۸۰ درجه ضخامت نقطه مقابل مکان اندازه‌گیری شده نیز مورد سنجش قرار گرفت.

1 Probe



شکل ۵: مکان‌های اندازه‌گیری ضخامت دیواره قطعات در نمونه تولیدی

Fig. 5. Measuring points of the wall thickness in produced samples

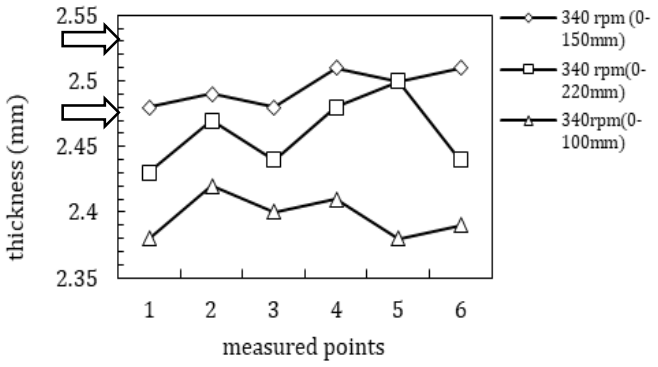
۳-۴- بررسی تجربی پارامترها

برای هرکدام از سرعت‌های پیشروی انتخاب شده، سه حالت پیشروی غلتک در نظرگرفته و نتایج بدست آمده در قالب نمودار مقایسه‌ای شکل‌های ۶ تا ۸ تهیه گردیده است. پیکان‌های نشان داده شده در شکل‌ها نشان دهنده محدوده پذیرش است.

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پراکندگی در ضخامت‌های بدست آمده در میزان پیشروی (۱۰۰-۰) از محدوده مورد پذیرش بسیار پایین‌تر است و غیر قابل قبول است. همچنین پراکندگی ضخامت‌های بدست آمده از میزان پیشروی (۲۲۰-۰) نیز در نزدیکی مرز پایین محدوده پذیرش و در دو نقطه در داخل محدوده می‌باشد. اما ضخامت‌های قطعه تولید شده با میزان پیشروی (۱۵۰-۰) میلی‌متر بر دقیقه کاملاً در داخل محدوده پذیرش واقع است و پراکندگی قابل قبولی را دارد.

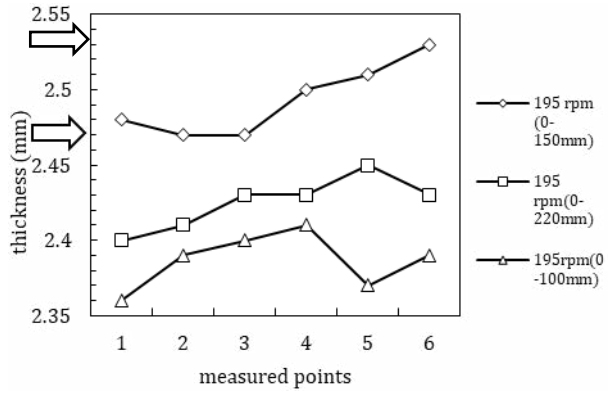
در شکل ۷ پراکندگی در ضخامت‌های بدست آمده در میزان پیشروی (۱۰۰-۰) از محدوده مورد پذیرش بسیار پایین‌تر است و مورد قبول نیست. همچنین پراکندگی ضخامت‌های بدست آمده از میزان پیشروی (۲۲۰-۰) نیز پایین‌تر از پایین محدوده پذیرش می‌باشد. اما ضخامت‌های قطعه تولید شده با میزان پیشروی (۱۵۰-۰) میلی‌متر بر دقیقه در داخل محدوده پذیرش واقع است ولی پراکندگی آن در کل بازه مورد پذیرش است. اعداد هم روی مرز پایینی و هم روی مرز بالایی مشاهده می‌شوند.

با بررسی نتایج در سه نمودار شکل۸ در سه سرعت چرخشی متفاوت، نتیجه می‌شود که میزان پیشروی (۱۵۰-۰) میلی‌متر بر



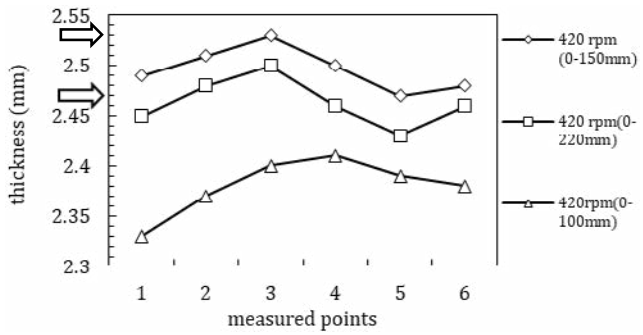
شکل ۶: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۳۴۰ دور بر دقیقه

Fig. 6. The chart of wall thickness comparison in 340 rpm rotational speed



شکل ۷: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۱۹۵ دور بر دقیقه

Fig. 7. The chart of wall thickness comparison in 195 rpm rotational speed



شکل ۸: نمودار مقایسه ضخامت‌ها در سرعت چرخشی ۴۲۰ دور بر دقیقه

Fig. 8. The chart of wall thickness comparison in 420 rpm rotational speed

دقیقه قابل‌قبول‌ترین نتایج را بدست می‌دهد. با نهایی شدن این موضوع، نحوه توزیع پراکندگی ضخامت مقایسه گردیده و نتایج آن در قالب نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.

همانطوری‌که در نمودار نیز به وضوح قابل مشاهده است، در بازه قابل پذیرش که با دو پیکان مشخص شده‌اند، سرعت چرخشی ۳۴۰ دور بر دقیقه، از میانگین پراکندگی کمتری برخوردار است.

برای آزمایش تکرارپذیری نتایج بدست آمده از شکل‌دهی چرخشی برشی پیش فرم، چهار نمونه با تنظیمات بدست آمده ساخته شده است که نتایج اندازه‌گیری ضخامت دیواره نشانگر پراکندگی قابل قبولی می‌باشند.

با بررسی دقیق نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگر ضخامت‌سنج، و با توجه به نتایج حاصل از تجارب تولید نمونه‌های اولیه، پارامترهای نهایی برای شکل‌دهی چرخشی برشی قطعه مخروطی با ضخامت ثابت بصورت زیر تعیین می‌گردد:

سرعت چرخشی بهینه سنبه یا مندرل : ۳۴۰ rev/min

سرعت پیشروی بهینه غلتک ها : ۱۵۰ mm/min

نوع روانکار مصرفی برای این فرآیند (برای جنس مس) ترکیب ۳۰ درصد روغن ۶۸ و ۷۰ درصد گازوئیل می‌باشد.

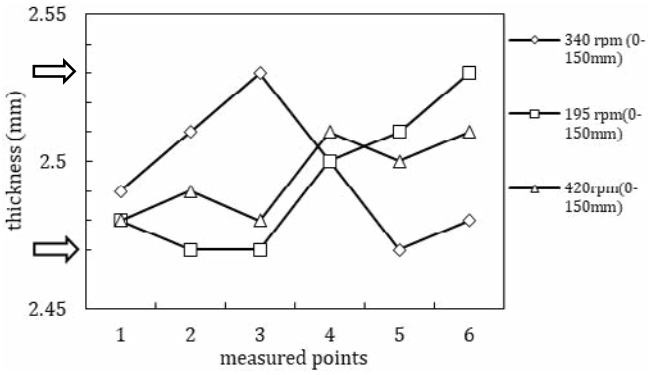
در شکل ۱۱ نمونه نهایی تولید شده با روش و پارامترهای مذکور نشان داده شده است.

با مشاهده نمونه‌های تولیدی از ورق صاف و پیش فرم، مشاهده می‌گردد که به علت انجام یک فرآیند تکمیلی بر روی ورق صاف (پرسکاری) و تبدیل آن به یک پیش فرم، به‌دلیل اصلاح دانه‌بندی در قسمت دو طرف سوراخ پیش فرم (محلی که به یال مخروط تغییر شکل داده می‌شود) و یکنواخت‌تر شدن و تختی بالای آن منطقه، رفتار تغییر شکل پلاستیک قطعه در حین فرآیند شکل‌دهی یکسان‌تر می‌گردد و این مطلب با کاهش درصد تغییرات در ضخامت قطعه کاملاً مشهود است.

۴- شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی

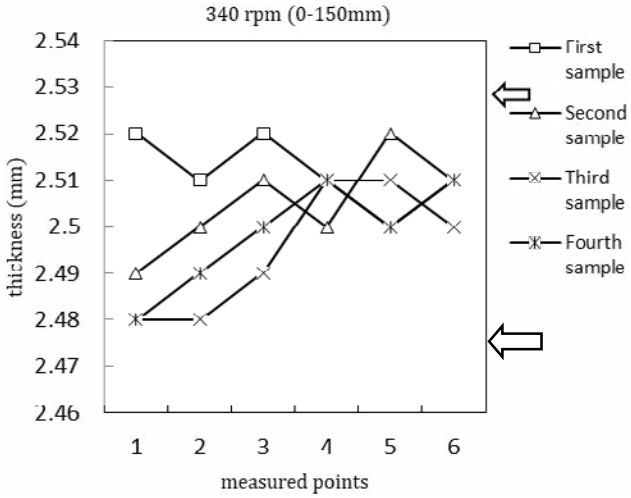
به منظور شبیه‌سازی نرم‌افزاری فرآیند با هندسه‌ای منطبق با نمونه واقعی و با مطالعات انجام گرفته در مورد فعالیت‌های مشابه قبلی در مقالات مشابه، پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها به شکل زیر تعیین گردید [۱ و۳]:

- تحلیل سه بعدی المان محدود بر پایه تغییرشکل صلب-پلاستیک با استفاده از حالت تقارن محوری
- غلتک شکل‌دهی: 3D Shell discrete rigid



شکل ۹: مقایسه نتایج سرعت‌های چرخشی متفاوت سنبه با هم

Fig. 9. The chart of wall thickness comparison in tested rotational speeds



شکل ۱۰: نمودار نتایج پنج قطعه مخروطی شکل تولیدشده از پیش فرم

Fig. 10. The chart of wall thickness comparison of 5 produced samples from preform

شکل ۱۱: نمونه تولید شده نهایی قطعه مخروطی مسی

Fig. 11. The final produced copper conic sample

- مرغک: 3D Shell discrete rigid
- مندرل یا سنبه: 3D Shell discrete rigid
- ورق قطعه کار: 3D deformable
- ضریب اصطکاک: 0.3
- نرم‌افزارشبیه‌سازی:ABAQUS 3-6.14

۴-۲- تعریف هندسه مدل

برای انجام شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی برشی چرخشی قطعه مخروطی، در ابتدا نیاز است که مدل هندسی نمونه به همراه کلیه اجزای فرآیند در نرم‌افزار مدل گردند. با توجه به ابعاد نهایی اجزای طراحی شده نظیر پیش فرم، بلنک ساده، مندرل یا سنبه، غلتک‌های شکل‌دهی و مرغک، مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار صورت گرفت. همچنین با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه ورق‌های مورد استفاده برای ساخت قطعه مخروطی مسی، از خواص الاستیک-پلاستیک بدست آمده برای تعریف ماده در نرم‌افزار شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل هندسی اجزا و قطعات شبیه‌سازی شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۴-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

نیروی پشت مرغک که نگهدارنده پلیت یا پیش فرم در زمان کل فرآیند می‌باشد، به عنوان یکی از شرایط مرزی تعریف شده است. مقدار این نیرو با استفاده از مقادیر تقریبی موجود در مستندات دستگاه و داده‌های تجربی قبلی تعیین شده است. سرعت دورانی مندرل یا سنبه با اندازه ۴۰ rad/s و حول محور اصلی سنبه اعمال می‌گردد. سرعت دورانی مرغک نیز برابر با سرعت سنبه می‌باشد.

همانطورکه پیش‌تر در بخش‌های ابتدایی این بخش به آن اشاره شد، برای المان‌هایی که به صورت صلب[1] تعریف شده‌اند نظیر غلتک‌ها، در زمان طراحی اولیه مدل آنها درنرم‌افزار، یک نقطه مرجع[2] در نظرگرفته می‌شود که در این مرحله از آن‌ها استفاده می‌گردد. غلتک‌ها هرزگرد می‌باشند، لذا با تعریف کردن یک سیستم مختصات محلی[3] برای آنها و استفاده از نقطه مرجع، محور غلتک‌ها که نسبت به محورابزار در زاویه ۴۵° قرار دارند، تعریف می‌شود. با توجه به

1 Rigid
2 Reffrence Point
3 Local coordinate system

اینکه در زمان شکل‌دهی، حرکت آنها در یک صفحه می‌باشد سرعت غلتک‌ها در راستای هریک از محورها با توجه به هندسه فرآیند استخراج و در نرم‌افزار وارد می‌گردد.

با توجه به دردسترس بودن نتایج تجربی در بخش شکل‌دهی چرخشی برشی و همچنین تست‌های جدیدی که برروی پیش فرم طراحی شده انجام گرفته است، میزان سرعت چرخشی مطلوب ۳۴۰ دور بر دقیقه و میزان پیشروی (۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه) لحاظ می‌گردد. هر دو نمونه ورق صاف و پیش فرم ساخته شده مدل‌سازی شده و نتایج آنها مقایسه می‌شوند. در شکل ۱۳ مدل اجزای محدود فرآیند در حین تحلیل نشان داده شده است.

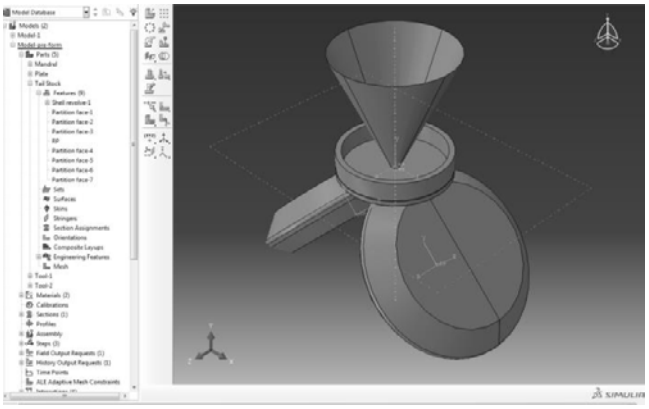
۴-۴- مشاهده و مقایسه نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های ابتدایی برروی ورق صاف و پیش فرم برای به‌دست آوردن میزان نیروی لازم در پشت مرغک صورت پذیرفته است. همانگونه که قبلاً عنوان شد، نیروی کم باعث خارج شدن ورق یا پیش فرم از روی مندرل و یا از محور آن می‌شود و نیروی زیاد باعث ایجاد اعوجاج در المان‌ها و تغییرشکل بیش از حد المان‌ها درقسمت نوک مخروط می‌گردد. نتایج نهایی تقریباً یکسان و مقداری معادل تنش اعمالی ۶۰ MPa را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی‌های بعدی برای به‌دست آوردن نیروی اصطکاک بهینه برای هر دو مدل ورق می‌باشد. اصطکاک زیاد باعث خرابی، تغییر شکل بیش از حد المان‌ها یا ایجاد چروکیدگی بر روی ورق اولیه می‌شود و اصطکاک کم باعث عدم انجام شکل‌دهی ورق می‌شود. با انجام شبیه‌سازی‌ها و برآورد نتایج، مقدار بهینه این پارامتر بین ۰/۲-۰/۳ می‌باشد.

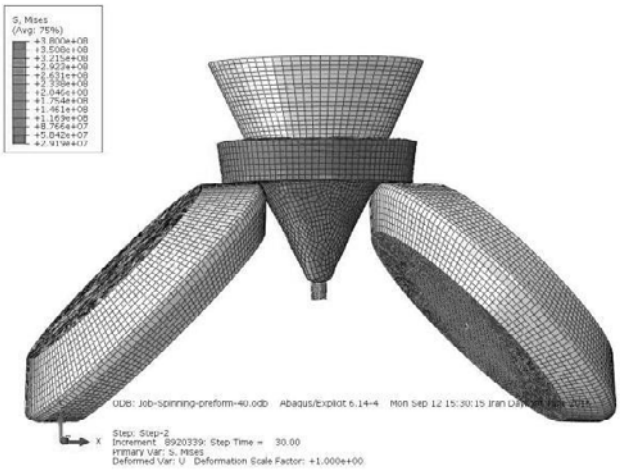
پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی ضخامت دیواره یال مخروطی قطعه شبیه‌سازی شده، در هر دو حالت صفحه تخت و به‌کارگیری پیش فرم، ضخامت‌ها در ناحیه قابل پذیرش قرار دارند اما ضخامت دیواره درمدل پیش فرم به نسبت ورق صاف دارای پراکندگی کمتری می‌باشد. مقایسه اندازه ضخامت در این دو حالت در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌گردد، در نقاط مختلف بجز نقاط ۴ و ۶، ضخامت نمونه ورق کمتر از نمونه پیش‌فرم پیش بینی شده است. دلیل این امر یکنواخت‌تر شدن تغییرات جریان پلاستیک مواد در



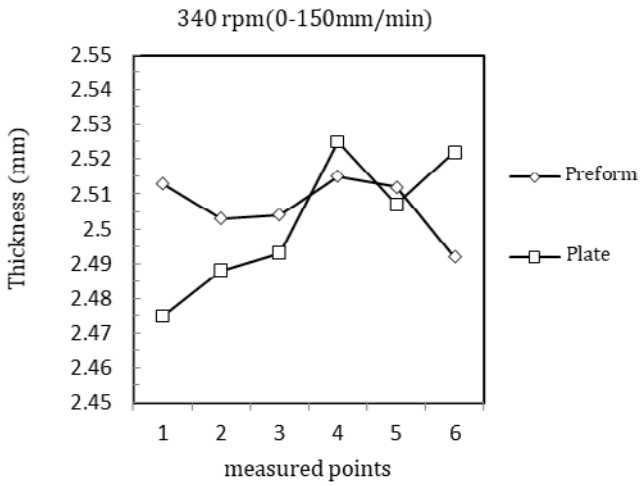
شکل ۱۲: مدل‌سازی و مونتاژ اجزا در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی

Fig. 12. Modeling and simulating the process



شکل ۱۳: مدل اجزای محدود فرآیند در حین تحلی بر روی پیش فرم

Fig. 13. The finite element simulation of the preform forming



شکل ۱۴: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت در دو مدل ورق صاف و پیش فرم حاصل از شبیه‌سازی

Fig. 14. The chart of wall thickness comparison between preform and blank in result of simulation

حالت پیش فرم‌دار است که باعث تغییرات برش در مقاطع مختلف و در نتیجه یکنواختی تغییر ضخامت می‌گردد. برای مقایسه دقیق‌تر دو حالت شبیه‌سازی‌شده، باید درصد تغییرات ضخامت در نقاط مختلف محاسبه و مقایسه گردد. در جدول ۱ نتایج کمی بدست آمده از اندازه‌گیری ضخامت قطعه نهایی حاصل از شبیه‌سازی در ۶ نقطه برروی ورق و پیش فرم، آورده شده است.

درصد تغییر ضخامت بین نقاط متوالی در نمونه صاف و پیش فرم در جدول ۲ مقایسه شده است.

مشاهده می‌گردد که تغییرات ضخامت بین نقاط ۳ و ۴ در نمونه ورق بزرگتر از سایر موارد است که نشانگر تغییرات شدید جریان برشی مواد در این محدوده می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پیش فرم معرفی شده، باعث یکنواخت‌تر شدن تغییرات ضخامت مخروط می‌گردد.

جدول ۱: مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده از روی پیش فرم و ورق صاف

Table 1. The table of samples wall thickness measured points in comparison between preform and blank

شماره مختصات اندازه‌گیری شده	ضخامت، mm	ضخامت، mm
	ورق صاف	پیش فرم
مختصات اول	۲/۵۱۳	۲/۴۷۶
مختصات دوم	۲/۵۰۳	۲/۴۸۷
مختصات سوم	۲/۵۰۴	۲/۴۹۳
مختصات چهارم	۲/۵۱۵	۲/۵۲۶
مختصات پنجم	۲/۵۱۱	۲/۵۰۸
مختصات ششم	۲/۴۹۲	۲/۵۲۱

جدول ۲ : درصد تغییرات ضخامت بین نقاط متوالی اندازه‌گیری شده

Table 2. The wall thickness percent change of the measured points

شماره مختصات اندازه گیری شده	ضخامت، mm	ضخامت، mm
	ورق صاف	پیش فرم
نقاط ۱و۲	۰/۴۴	-۰/۰۴۰
نقاط ۳ و۴	۱/۳۲	۰/۴۴
نقاط ۵ و۶	۰/۵۲	-۰/۷۶

۵- تشریح نتایج و تأثیر پارامترها

همانطورکه در نتایج و شکل‌های مربوطه آورده شده است، برای انجام ضخامت‌سنجی از قطعات تولید شده، شش نقطه اندازه‌گیری می‌شود که این نقاط دو به دو در یک صفحه واقع شده‌اند. با این فرض، هرچه نقاط بدست آمده در یک صفحه به هم نزدیکتر باشند و پراکندگی نقاط کمتر باشد، یکنواختی بیشتری در یال قطعه مشاهده می‌گردد. با مطالعه دقیق‌تر نمودارهای بدست آمده از مقایسه نتایج ضخامت‌های قطعه کار در سرعت‌ها و پیشروی‌های مختلف، مشاهده می‌گردد که در سه سرعت مورد بررسی با میزان پیشروی ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تقریباً نتایج بدست آمده برای قطعات تولیدی در محدوده پذیرش می‌باشند. با این حال پراکندگی نقاط در سرعت چرخش ۳۴۰ rpm کمتر می‌باشد. این نتایج فقط در حوزه ضخامت قطعه می‌باشد در صورتی‌که موارد پایش شده دیگر نظیر راستی بیرونی و داخلی یال‌های مخروط، کیفیت سطح و غیره نیز در نظر گرفته شوند، سرعت‌های چرخشی دیگر نتایج ضعیف‌تری دارند.

با بررسی پارامترها، تأثیر تغییر پارامترها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱) با افزایش سرعت پیشروی غلتک ها از ۱۰۰ mm/min به ۱۵۰ mm/min در یک سرعت چرخشی ثابت، مقادیر راست بودن داخلی از ۰/۰۸۷ به ۰/۰۱۷ و راست بودن خارجی از ۰/۱۱۸ به ۰/۰۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی مقادیر برگشت فنری زاویه داخلی از ۷°- به صفر تا حداکثر ۱°+ کاهش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش پارامتر مذکور، ماده تقریباً روی سنبه بیشتر سیلان نموده و راستی بهبود یافته است.

۲) با افزایش سرعت پیشروی غلتک از ۱۵۰ mm/min به ۲۲۰ mm/min تغییر چندانی در مقادیر راست بودن ایجاد نمی‌شود. اما مقادیر زیری سطح از حداقل ۰/۵ µ در سرعت پیشروی ۱۵۰ mm/min به حداقل ۰/۸ µ در سرعت پیشروی ۲۲۰ mm/min می‌رسد.

۳) در سرعت پیشروی غلتک ۱۵۰ mm/min ، با افزایش سرعت چرخشی سنبه از ۱۹۵ rev/min به ۳۴۰ rev/min و حداقل زبری از µ ۰/۶ به۵ µ ۰/ و حداکثر از µ ۱/۸ به µ ۱/۶ کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت چرخشی سنبه به۴۲۰ rev/min حداقل زبری به µ۱ می‌رسد.

۴) مقایسه داده‌های حاصل از نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد

که حداقل گردی در هر مقطع در نمونه‌هایی که در سرعت پیشروی غلتک ۱۵۰ mm/min و سرعت چرخشی سنبه ۳۴۰ rev/min تولید شده اند، بدست آمده است.

با مشاهده نمونه‌های تولیدی از ورق صاف و پیش‌فرم به نظر می‌رسد که بدلیل انجام یک فرآیند تکمیلی بر روی ورق صاف (پرسکاری) و تبدیل آن به یک پیش فرم، اصلاح دانه‌بندی در قسمت دو طرف سوراخ پیش فرم (محلی که به یال مخروط تغییر شکل داده می‌شود) و یکنواخت‌ترشدن و تختی بالای آن منطقه، رفتار تغییر شکل پلاستیک قطعه در حین فرآیند شکل‌دهی یکسان‌تر می‌گردد و با کاهش درصد تغییرات در ضخامت قطعه این مطلب کاملاً مشهود است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ورق صاف و پیش فرم، ضخامت‌های دیواره قطعه مخروطی نظیر کار تجربی اندازه‌گیری شده است و نتایج نیز این مطلب را نشان می‌دهد که نتایج پیش فرم نسبت به ورق صاف از پراکندگی کمتری برخوردار است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تولید نمونه مخروطی شکل با روش فرم دهی چرخشی برشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های عملی و تحلیل اجزای محدود صورت گرفته در این مقاله، نتایج زیر حاصل شده است:

- تولید تجربی قطعه نشان می‌دهد استفاده از پیش فرم درفرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی نمونه، باعث تولید قطعه با کیفیت بهتر می‌گردد.

- سرعت چرخشی بهینه مندرل یا سنبه برای ساخت قطعه مخروطی مسی با مشخصات و ابعاد آورده شده در این تحقیق rev/ min ۳۴۰ می‌باشد.

- سرعت پیشروی بهینه غلتک‌های شکل‌دهی برای ساخت قطعه مخروطی مسی با مشخصات و ابعاد مورد نظر در تحقیق حاضر mm/ min ۱۵۰ می‌باشد.

- شعاع بهینه نوک غلتک با توجه ۴ میلی‌متر و بهترین زاویه حمله برای غلتک شکل‌دهی ۴۷° و بهترین زاویه فرار غلتک شکل‌دهی ۲۴/°۵ می‌باشد.

- نوع روانکار مصرفی برای این فرآیند (برای جنس مس) ترکیب ۳۰ درصد روغن ۶۸ و ۷۰ درصد گازوئیل می‌باشد

مراجع

[1] D. Marini, D. Cunningham, J. Corney, A Review of Flow Forming Processes and Mechanisms, Key Engineering Materials, 651 (2015) 750-758.

[2] H. Razavi, F. Biglari, A. Torabkhani, Study of strains distribution in spinning process using FE simulation and experimental work, in: Proceedings of the Tehran International Congress on Manufacturing engineering, Tehran, Iran, 2005

[3] T. McCormack, M. Tuffs, A. Rosochowski, S. Halliday, P. Blackwell, Shear forming of 304L stainless steel – microstructural aspects, Procedia Engineering, 207 (2017) 1719-1724.

[4] M. Zhan, H. Yang, J. Zhang, Y. Xu, F. Ma, 3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning, Journal of Materials Processing Technology, 187 (2007) 486-491.

[5] M. Moradi, M. Ghoreishi, A. Rahmani, Numerical and Experimental Study of Geometrical Dimensions on Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel 1.4418, Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production, 5, (2016), 23-32.

[6] B. Qian, Y. He, Z. Mei, Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18(1) (2008) 6-13.

[7] L.-l. SUN, A.-q. NIE, X.-j. HU, K.-m. XUE, FE numerical simulation of automobile hub spinning forming process [J], Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 4 (2008) 014.

[8] L. Wang, H. Long, A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning, Journal of Materials Processing Technology, 211(12) (2011) 2140-2151.

[9] J.A. Polyblank, J.M. Allwood, Parametric toolpath design in metal spinning, CIRP Annals, 64(1) (2015) 301-304.

[10] D. Han, M. Zhan, H. Yang, Deformation mechanism of TA15 shells in hot shear spinning under various load

conditions, Rare Metal Materials and Engineering, 42(2) (2013) 243-248.

[11] M. Kleiner, R. Göbel, H. Kantz, C. Klimmek, W. Homberg, Combined methods for the prediction of dynamic instabilities in sheet metal spinning, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 51(1) (2002) 209-214.

[12] Q. Sheng-xue, C. Bao-cheng, L. Jie, C. Chao, Elastic-plastic Finite Element Simulation of Shear Spinning of Cone Part, (2013).

[13] K.-i. Mori, T. Nonaka, Simplified three-dimensional finite element simulation of shear spinning process based on axisymmetric modeling, Journal of manufacturing processes, 7(1) (2005) 51-56.

[14] N. Alberti, L. Fratini, Innovative sheet metal forming processes: numerical simulations and experimental tests, Journal of Materials Processing Technology, 150(1-2) (2004) 2-9.

[15] C. Wong, T. Dean, J. LinN, A review of spinning, shear forming and flow forming processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(14), (2003),1419-1435.