



Finite Element and Experimental Investigation of the Direct Flow Forming Process of Thin-walled High-strength Steel Tubes

Hamid BoroumandPanah ^a, Alireza Naddaf Oskouei ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: BoroumandPanah H, Naddaf Oskouei A. Finite Element and Experimental Investigation of the Direct Flow Forming Process of Thin-walled High-strength Steel Tubes. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(1):122-138

 <https://10.61186/masm.4.1.122>

KEYWORDS

Flow Forming,
High Strength Steel Alloy,
Feed Rate,
Finite Element Analysis.

ABSTRACT

Tube flow forming is one of the most cost-effective production methods for creating simple cylindrical tubes with external and internal protrusions, with or without flanges. The dimensional accuracy of tubes produced by this method is higher than that of other methods, making it widely used in the aerospace industry. In this study, the flow forming process of three-roller high-strength steel was investigated through finite element analysis and compared with experimental results. The forming process was investigated for various mandrel rotation speeds and feed rates. By comparing the experimental results, the effects of each parameter on the surface quality (roughness), geometric quality and accuracy of the manufactured product (out-of-roundness, diametral increase) were studied. The results showed that the surface roughness of the final product increases with the increase in the feed rate. Increasing the feed rate also leads to a reduction in out-of-roundness and thus improves the geometric quality of the final product. Increasing the mandrel rotation speed results in a reduction in the surface roughness. Increasing the rotation speed also result in an increase in the out-of-roundness of the product.

Extended Abstract

1. Introduction

Tube flow forming is one of the most economical methods of producing simple cylindrical tubes with external and internal protrusions with or without flanges. The use of flow forming operations instead of machining of tubes to produce cylindrical bodies has many advantages, including the use of more raw materials and increasing the mechanical properties of the product due to the hard work on the part. This process has many parameters. The changes of each of these parameters can have a significant effect on the final quality and strength of the tube. Therefore, many researchers have investigated and analyzed the effects of each of these parameters. There are two well-known and common types of flow forming called direct and reverse flow forming. These terms express the relationship between the direction of the metal flow and the direction of the tool movement during the operation [1].

Tabeie and Javanroudi [2] investigated the influence of effective parameters on the quality of flow forming tubes. They optimized the parameters that affect the quality of thin-walled tubes made of pure titanium (Grade 2) in the flow forming process. They showed that reducing the feed rate, increasing the rotational speed up to 630 rpm and reducing the tube thickness result in better surface quality in titanium tubes. It was also found that increasing the rotational speed more than 630 rpm has a huge effect on the surface quality of titanium tubes.

* Corresponding author. Tel.: +98-02177105105; Fax: +98-02177105105

E-mail address: anadaf@ihu.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.1.122>

Received: March 07, 2024; Received in revised form: May 16, 2024; Accepted: May 21, 2024

© Author



Haghighatt and Yavari [3] investigated the effect of flow forming process on improving the mechanical properties and changing the structure of 4130 steel used in the production of the shell of the rocket. The results of their research showed that the production of thin-walled bodies (especially the shells of rocket) by the flow forming method leads to an increase in the tensile strength, yield strength and hardness of the raw material. Abedini et al. [4] experimentally investigated parameters such as penetration depth, rotation speed, and feed rate on the surface roughness of the flow formed pieces using the Taguchi method, and the minimum roughness value with penetration depth of 0.2 mm, feed of 0.1 mm/rev, and rotation speed of 63 rpm was obtained. The surface roughness obtained from this optimal value was equal to 4 microns. Soleimani and Faraji [5] experimentally investigated the mechanical properties and microstructure of 4130 steel after the reverse flow forming process. Their results showed that the flow forming operation at each stage increases the hardness and yield strength of steel. Also, the hard work done causes finer grain and elongation of the grains.

Considering the high cost and time-consuming nature of experimental tests, nowadays many researchers use finite element software to design and estimate forces in the flow forming process in industry. Nadaf Oskouei et al. investigated the forming mechanism in the flow forming process using the finite element method. They investigated the flow forming process with the help of LS-DYNA finite element software. Their simulation results were in good agreement with the results of other researchers and described well the phenomena of protrusion and diameter growth [1]. Bhat and Raval [6] investigated the effect of operational parameters during the flow forming process. The results of their research showed that axial feed and friction coefficient are the most important factors affecting axial and peripheral forces. In addition, the friction coefficient has a significant effect on the radial force. Also, the depth of forming has a significant effect on stress and plastic strain. Banerjee et al. [7] created a three-dimensional finite element model in Abaqus software to simulate the reverse flow forming process. They investigated the effect of the parameters of feed ratio, percentage of thickness reduction, and the geometry of the rollers on the stresses, power consumption, and the dimensions of the tubes. In their research, a comparison has been made between traditional theoretical formulations and simulated forces. They investigated the effect of feed speed ratios and percentage of thickness reduction on the roundness of the formed tubes and compared them with experimental results. The closeness of the estimated power to the experimental power available in the literature shows that their simulated model is promising and strong. Singh et al. [8] developed a 3D thermo-mechanical finite element model of flow forming using Abaqus. Simulations for roller forces and thickness reduction were verified using analytical solutions and experimental results. The simulation results were useful for studying variables such as stress and strain distribution during the flow forming process. Zhou et al. investigated the effect of roller offset on the flow forming process. They found that changes in roller offset have a great effect on flow forming forces [9]. Vural et al. [10] predicted soft failure during the flow forming process using Abaqus software. They developed the 'VUMAT' subroutine to input plastic behavior and failure aggregation rules. Their results showed a damaged area on the inner and outer surfaces of the workpiece for a thickness reduction ratio greater than 40%.

In this research, the finite element model was created in Abaqus software to estimate the forces and check the geometry of the product. The developed finite element model was validated with experimental results. After validating the finite element model, finite element simulation was used to predict the effect of different parameters on the quality of the final product. It should be noted that the flow forming process is very complex and has many effective parameters such as mandrel rotation speed, feed rate, material, geometric dimensions of the roller, etc., the changes of each of which have a great effect on the quality of the produced parts. In this research, all the important parameters were investigated experimentally and finite element for D6ac high strength steel, the results of which are quite practical for researchers and similar industries.

2. Methodology

The mechanical characteristics of D6ac steel material used in this research are listed in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of D6ac steel

Yield Strength	Ultimate Strength	Elongation
1345 MPa	1570 MPa	7%

The process of flow forming was carried out by the machine made by Leifeld Company. The dimensions of the preform are according to Figure 1. The dimensions of the final product are given in Figure 2.

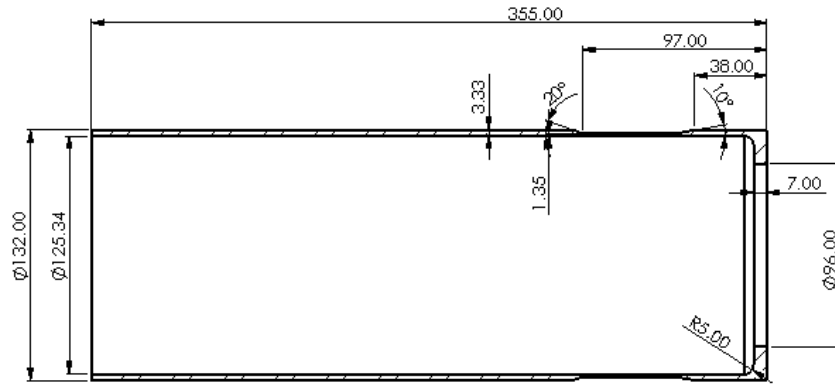


Figure 1. Dimensions of the preform (mm)

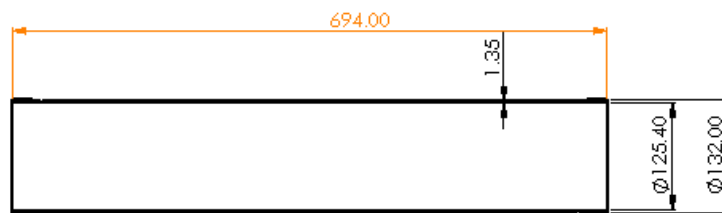


Figure 2. Dimensions of the final product (mm)

In order to investigate the effect of feed rate on surface quality, dimensional and geometric accuracy of tubes, a number of preforms have been used. All the parameters in the flow forming machine are kept constant, and the machine was prepared for four different feed rates of 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6 mm/rev. To investigate the effect of mandrel rotation speed, all the parameters in the flow forming machine were kept constant and four different mandrel rotation speeds of 90, 110, 140 and 180 rpm were applied.

The set of rollers and mandrel and preform was created according to the experimental tests in Abaqus finite element software. The material properties were defined as elastic-plastic with isotropic hardening and mechanical properties according to the properties of D6ac steel obtained from the tensile test. Figure 3 shows a view of the FE model. It should be noted that the rollers and mandrel were defined as rigid and the preform was deformable.

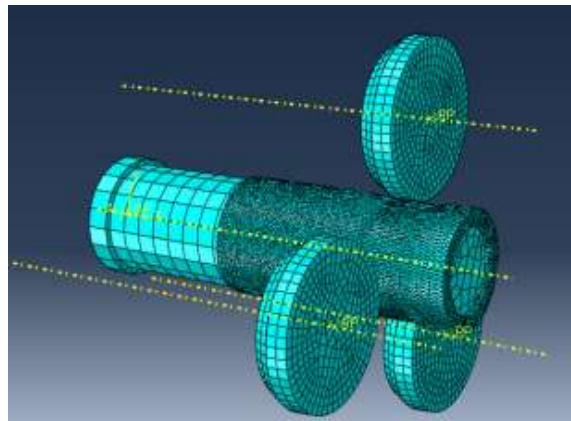


Figure 3. FE model of flow forming process

3. Results and Discussion

In the graph of Figure 4, the effect of the feed rate on the surface roughness of the D6ac steel tube was shown. It can be seen that with the increase of the feed rate from 0.3 to 0.6 mm/rev, the surface roughness increases by about 97%. Increasing the feed rate brings a greater amount of longitudinal displacement of the roller on the tube; as a result, more surface of the material is in contact with the roller in one revolution of the tube and the roughness of the tube surface increases. The final products were dimensionally measured, and the growth rate of their inner

diameter compared to the diameter of the preform, for different feed rate, is shown in Figure 5. As the feed rate from 0.3 to 0.6 mm/rev, the growth of the inner diameter of the formed tube decreases by 86.8%.

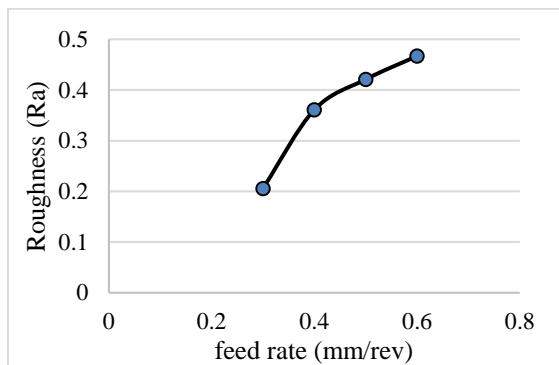


Figure 4. The effect of feed rate on roughness

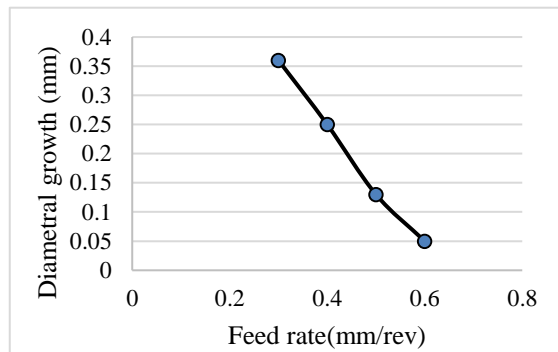


Figure 5. The effect of feed rate on diametral growth

Figure 6 shows the effect of mandrel rotation speed on the surface roughness of product. As the rotation speed increases up to 110 rpm, the roughness of the tube surface decreases and increases with the further increase of the rotation speed; therefore, in order to obtain a specific surface quality, the rotation speed parameter should also be considered. The rotational speed of the mandrel also has an effect on the dimensional changes of the tubes. In order to measure the dimensional accuracy, a parameter called the growth of the inner diameter of the tube was used. Figure 7 shows the resulting graph of changes in the growth of the inner diameter of D6ac steel tube with changes in the mandrel rotation speed. The inner diameter of the tube increases as the mandrel rotation speed increases from 90 to 180 rpm. In addition to generating heat and increasing formability, a higher rotation speed increases the radial force (centrifugal force) in the tube; therefore the amount of diameter growth in the tube will be higher with an increase in the rotation speed. As a result, it can be said that with increasing advance rate, the dimensional accuracy of the roller forming tube decreases.

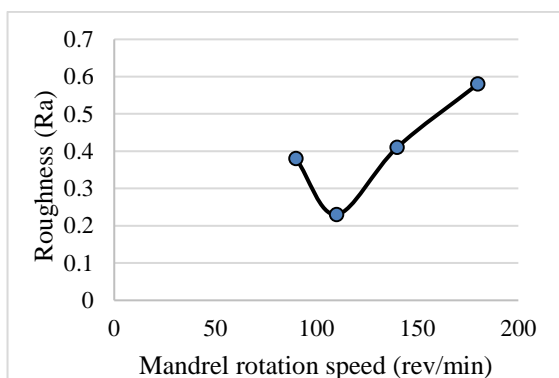


Figure 1. The effect of mandrel rotation speed on roughness

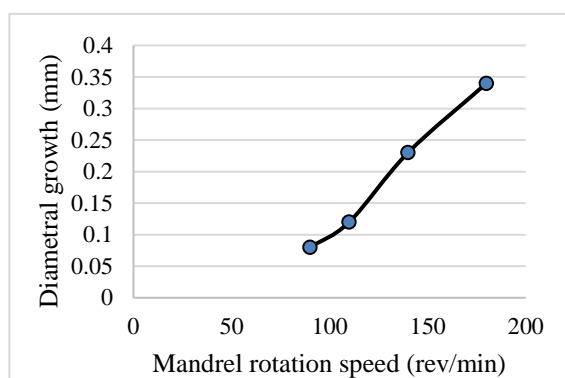


Figure 2. The effect of mandrel rotation speed on diametral growth

Figure 8 shows the movement of nodes along the thickness of the part on the simulated model. This displacement is measured relative to the standard position of the node, that is, relative to the diameter of the tube. With the increase of the feed rate, the difference between the highest and the lowest displacement of the nodes is more than the case of the lower feed rate. Figure 9 shows the effect of the mandrel rotation speed on the increase in the inner diameter of the steel pipe. To check the amount of increase in the inner diameter in Abaqus simulation software, movement of the nodes in the radial direction on the specified path on the inner diameter is used. with a 100% increase in rotation speed in the model, the inner diameter increases by 24.3%. The trend of changes in the graph is in good agreement with the experimental graph, but they are different in terms of value. The reason for the difference in the obtained values is that in the finite element modeling, the internal diameter is considered constant and no out-of-roundness or diameter change in the preform is considered, but in the experimental sample, due to the fact that the pre-form is machined, there is a small amount of out-of-roundness. And there is also a change in diameter according to manufacturing tolerances.

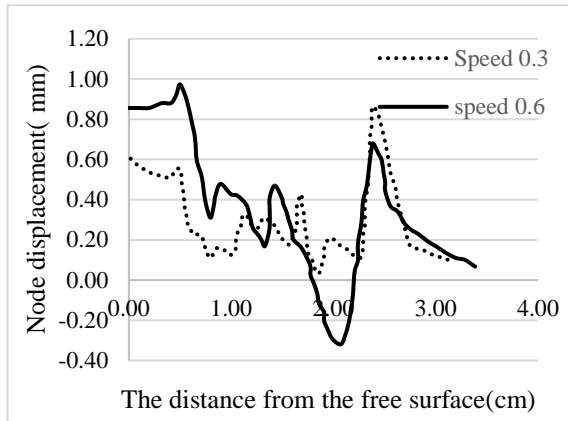


Figure 8. The node displacement for different speed

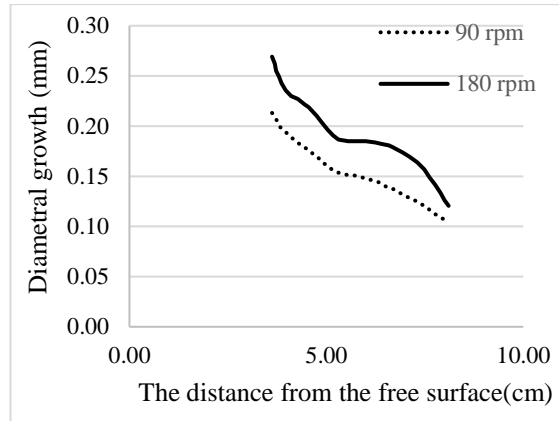


Figure 9. The diametral growth for different rotational speed of mandrel

Error! Reference source not found. shows the effect of mandrel rotation speed on the displacement of nodes on the outer surface of tube. For higher rotation speed, the displacement of nodes of the external surface is more. Also, the difference between the maximum and minimum displacement of the nodes in the state of higher rotation is more than that of lower rotation. The difference between the maximum and minimum displacement of the nodes is 0.0431 mm for the rotational speed of 180 rpm and 0.03401 mm for the rotational speed of 90 rpm. With a 100% increase in rotation speed, the amount of non-roundness on the outer surface of the steel pipe increases by 26.7%.

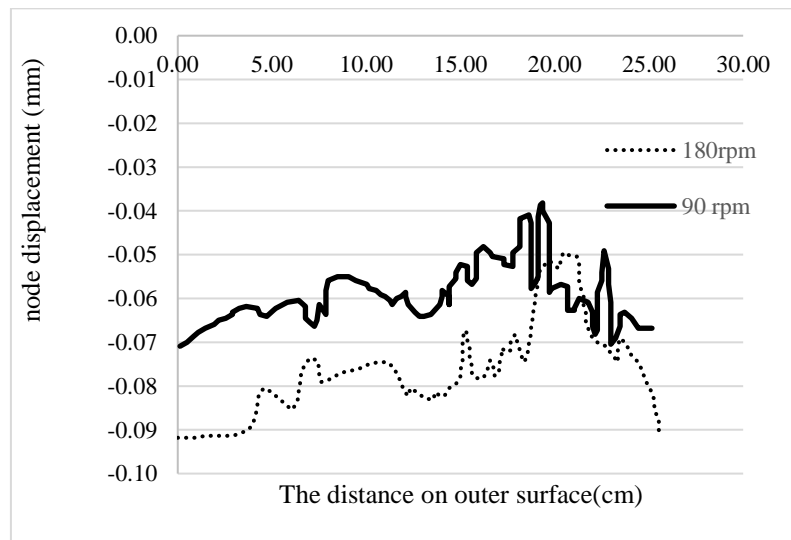


Figure 10. The node displacement for different rotational speed of mandrel

4. Conclusions

In this research, the flow forming process for D6ac steel was investigated using finite element analysis and experimental tests. The effect of various process parameters such as the feed rate and mandrel rotation speed investigated and their effects on the surface quality and dimensional tolerance of the product were investigated. The results are as follows:

- As the feed rate increases, the surface roughness of the final product increases. Increasing the advance rate also leads to the reduction of out-of-roundness and thus improving the geometric quality of the final part.
- Increasing the rotation speed of the mandrel leads to a decrease in the surface roughness. Also, increasing the rotation speed leads to an increase in the out-of-roundness of the product.



تحلیل تجربی و عددی فرایند فلوفرمینگ مستقیم لوله جدار نازک از جنس فولاد استحکام بالا

حمید برومندپناه الف، علیرضا نداف اسکویی ب*

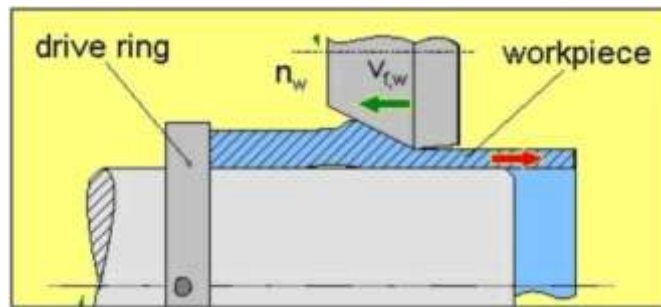
الف کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران، hamid.hbp@ihu.ac.ir

ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران، anadaf@ihu.ac.ir

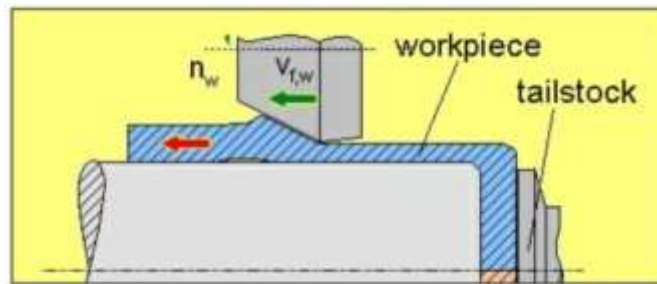
واژگان کلیدی	چکیده
فلوفرمینگ، فولاد استحکام بالا، سرعت تغذیه، تحلیل اجزای محدود.	فلوفرمینگ لوله یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولیدی برای لوله‌های استوانه‌ای ساده با برآمدگی‌های خارجی و داخلی همراه یا بدون فلنج می‌باشد. دقت ابعادی لوله‌های تولید شده با این روش، بسیار بالاتر از سایر روش‌ها بوده و کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا دارد. در این تحقیق، فرایند فلوفرمینگ سه غلتکه فولاد استحکام بالا به صورت تحلیل اجزای محدود بررسی شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. فرایند شکل‌دهی برای سرعت‌های متفاوت چرخش ماندل و سرعت‌های مختلف پیشروی بررسی گردید و اثرات هر پارامتر بر روی کیفیت سطح (زبری سطح) و کیفیت ابعادی و هندسی محصول تولیدی (رشد قطری و عدم گردی) مطالعه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح محصول نهایی افزایش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی همچنین منجر به کاهش عدم‌گردی و در نتیجه بهبود کیفیت هندسی قطعه نهایی می‌شود. افزایش سرعت دوران ماندل منجر به کاهش زبری سطح می‌شود. همچنین افزایش سرعت دوران منجر به افزایش عدم‌گردی محصول می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱	

۱- مقدمه

فلوفرمینگ لوله یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولید لوله‌های استوانه‌ای ساده با برآمدگی‌های خارجی و داخلی همراه یا بدون فلنج می‌باشد. استفاده از عملیات فلوفرمینگ به جای ماشینکاری خام لوله‌ها برای تولید بدنه‌های استوانه‌ای، دارای مزایای زیادی از جمله استفاده بیشتر از مواد خام و افزایش خواص مکانیکی محصول به دلیل کار سختی بر روی قطعه می‌باشد. این فرایند، دارای پارامترهای بسیار زیادی می‌باشد. تغییرات هر کدام از این پارامترها می‌تواند اثر قابل توجهی روی کیفیت و استحکام نهایی لوله داشته باشد. لذا محققین زیادی به بررسی و تحلیل اثرات هر یک از این پارامترها پرداخته‌اند. دو نوع شناخته شده و رایج در فلوفرمینگ لوله با نام‌های فلوفرمینگ مستقیم (پیش‌رونده) و معکوس وجود دارند. این اصطلاحات بیان‌گر ارتباط میان جهت جریان فلز با جهت حرکت ابزار در طول عملیات می‌باشند. در فلوفرمینگ معکوس قطعه کار در مقابل یک فیکسچر که روی کلگی دستگاه نصب شده است نگه داشته می‌شود و غلتک به سمت طرف ثابت شده قطعه کار پی‌شروی می‌کند. در این حالت فلز قطعه کار در جهت مخالف پی‌شروی غلتک‌ها جریان پیدا می‌کند (شکل ۱). در فلوفرمینگ مستقیم حرکت غلتک به صورت دور شونده از سر ثابت شده قطعه کار می‌باشد و جهت جریان فلزی در قطعه کار با جهت غلتک هم‌سو و غالباً به طرف کلگی دستگاه می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱ شماتیک فرآیند شکل‌دهی چرخشی معکوس لوله [۱]



شکل ۱ شماتیک فرآیند شکل‌دهی چرخشی مستقیم لوله [۱]

تابعی و همکاران [۲] بر روی تأثیر پارامترهای مؤثر بر کیفیت لوله‌های فلوفرمینگ تحقیق کردند. آن‌ها پارامترهایی که بر روی کیفیت لوله‌های جدار نازک از جنس تیتانیوم خالص^۱ در فرآیند فلوفرمینگ تأثیر می‌گذارند را بهینه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش نرخ پیشروی، افزایش سرعت دورانی تا ۶۳۰ دور بر دقیقه و کاهش ضخامت لوله منجر به کیفیت سطح بهتر در لوله‌های تیتانیومی می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش سرعت دورانی بیشتر از ۶۳۰ دور بر دقیقه تأثیر عکسی بر روی کیفیت سطح لوله‌های تیتانیومی دارد. حقیقت و همکارش [۳] به بررسی اثر فرایند فلوفرمینگ بر روی بهبود خواص مکانیکی و تغییر ساختار فولاد ۴۱۳۰ مورد استفاده در تولید پوسته موتور راکت پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تولید بدنه‌های جدار نازک (خصوصاً پوسته موتورهای راکت‌ها) به روش فلوفرمینگ منجر به افزایش استحکام کششی، استحکام تسلیم و سختی ماده خام می‌شود و میزان شکل‌پذیری ماده را با در نظر گرفتن مقدار درصد کاهش ضخامت، می‌توان پایین آورد. عابدینی و همکاران [۴] به بررسی تجربی پارامترهایی از قبیل عمق نفوذ، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی بر زبری سطح قطعه فلوفرم شده با روش تاگوچی پرداختند و مقدار کمینه زبری با عمق نفوذ ۰/۲ میلی‌متر، پیشروی ۰/۱ میلی‌متر و سرعت چرخشی ۶۳ دور بر دقیقه به دست آمد. زبری سطح حاصل از این مقدار بهینه برابر با ۴ میکرون گردید. سلیمانی و همکاران [۵] به صورت تجربی به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد ۴۱۳۰ بعد از فرایند فلوفرمینگ معکوس لوله پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملیات فلوفرمینگ در هر مرحله، موجب افزایش سختی و افزایش استحکام تسلیم فولاد می‌شود. همچنین کارسختی انجام شده موجب ریزتر شدن دانه‌بندی و کشیدگی دانه‌ها می‌شود.

با توجه به هزینه زیاد و زمان بردن تست‌های تجربی، امروزه محققین زیادی از نرم‌افزارهای اجزای محدود برای طراحی و تخمین نیروها در فرایند فلوفرمینگ در صنعت استفاده می‌کنند. نداف اسکویی و همکاران به بررسی مکانیزم شکل‌دهی در فرایند فلوفرمینگ به کمک روش اجزای محدود پرداختند. آن‌ها به کمک نرم افزار المان محدود^۲ به بررسی فرایند فلوفرمینگ پرداختند. نتایج شبیه سازی آن‌ها تطابق خوبی با نتایج سایر محققین داشت و به خوبی پدیده‌های برآمدگی و رشد قطری را توصیف می‌کرد [۱]. بهات و همکاران [۶] به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی حین فرایند فلوفرمینگ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پیشروی محوری و ضریب اصطکاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نیروهای محوری و محیطی هستند. علاوه بر این، ضریب اصطکاک تأثیر معنی‌داری بر نیروی شعاعی دارد. همچنین عمق شکل‌دهی تأثیر بسزایی بر تنش و کرنش پلاستیک

^۱ Ti (Grade 2)^۲ LS-DYNA

دارد. بانرجی و همکاران [۷] یک مدل اجزای محدود سه بعدی در نرم افزار آباکوس جهت شبیه سازی فرایند فلوفرمینگ معکوس ایجاد کردند. آن‌ها اثر پارامترهای نسبت سرعت پیشروی، درصد کاهش ضخامت، و هندسه غلتک‌ها بر روی تنش‌ها، توان مصرفی و ابعاد لوله‌ها بررسی کردند. در تحقیق آن‌ها مقایسه بین فرمول بندی‌های نظری سنتی و نیروهای شبیه سازی شده انجام شده است. آن‌ها تأثیر نسبت‌های سرعت پیشروی و درصد کاهش ضخامت بر گرد بودن لوله‌های تشکیل شده بررسی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. نزدیکی توان تخمینی به توان تجربی موجود در ادبیات نشان می‌دهد که مدل شبیه سازی شده آن‌ها امیدوارکننده و قوی است. سینگ و همکاران [۸] یک مدل اجزای محدود سه بعدی ترمومکانیکی از فلوفرمینگ سه غلتکه با استفاده از آباکوس توسعه دادند. شبیه سازی برای نیروهای غلتک و کاهش ضخامت به کمک راه حل‌های تحلیلی و نتایج تجربی صحت سنجی شدند. نتایج شبیه سازی برای مطالعه متغیرهایی مانند توزیع تنش و کرنش در طول فرآیند فلوفرمینگ مفید بود. ژو و همکاران به بررسی تأثیر آفست غلتک‌ها بر فرایند فلوفرمینگ پرداختند. آن‌ها دریافتند که تغییرات آفست غلتک‌ها اثر زیادی روی نیروهای فلوفرم دارد [۹]. وورال و همکاران [۱۰] به پیش بینی شکست نرم حین فرایند فلوفرمینگ به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس پرداختند. آن‌ها سابروتین^۳ را برای وارد کردن رفتار پلاستیک و قوانین تجمع خرابی توسعه دادند. نتایج آن‌ها یک ناحیه آسیب دیده در سطوح داخلی و خارجی قطعه کار برای نسبت کاهش ضخامت بیشتر از ۴۰ درصد نشان داد.

در این تحقیق، مدل اجزای محدود در نرم افزار آباکوس جهت تخمین نیروها و بررسی هندسه محصول ایجاد گردید. مدل اجزای محدود ایجاد شده با نتایج تجربی صحت سنجی گردید. پس از صحت سنجی مدل اجزای محدود به کمک نتایج تجربی، از شبیه سازی اجزای محدود جهت پیش بینی اثر پارامترهای مختلف بر روی کیفیت محصول نهایی استفاده گردید. لازم به ذکر است که فرایند فلوفرمینگ بسیار پیچیده می‌باشد و پارامترهای موثر زیادی نظیر سرعت چرخش ماندربیل، نرخ پیشروی، جنس فلز، ابعاد هندسی غلتک و ... دارد که تغییرات هر کدام اثر زیادی روی کیفیت قطعات تولیدی دارد. بسیاری از این پارامترها به علت خاص و مهم بودن در مقالات ذکر نمی‌گردد. لازم است که این کار توسط هر صنعت علی الخصوص صنایع حساسی نظیر هوافضا و نظامی برای جنس و ابعاد خودشان انجام گردد. در این تحقیق، پارامترهای مهم همگی بصورت تجربی و المان محدود برای جنس فولاد استحکام بالا D6ac بررسی گردید که نتایج آن برای محققین و صنایع مشابه کاملاً کاربردی می‌باشد.

۱-۱- روابط کاربردی

با توجه به اینکه حجم ثابت فرض می‌شود، با نادیده گرفتن جریان مماسی، طول قطعه نهایی در فرایند فلوفرمینگ از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$L_1 = L_0 \frac{S_0(d_1 + S_0)}{S_1(d_1 + S_1)} \quad (1)$$

در رابطه فوق، L_1 طول نهایی قطعه، L_0 طول پریفرم، S_0 ضخامت اولیه، S_1 ضخامت نهایی و d_1 قطر داخلی می‌باشد.

پدیده واماندگی بر اساس یک معیار ساده تحلیل می‌شود. با توجه به این معیار، کاهش ضخامت به مقداری محدود می‌شود که بالاتر از آن، قسمت نازک شده پشت غلتک به تغییر شکل پلاستیکی تسلیم می‌شود؛ به عبارت دیگر، در شرایط فلوفرم متناسب، بخشی که قبلاً کاهش ضخامت را انجام داده است باید در حالت کشسانی نگه داشته شود. هنگامی که تنش اعمال شده بر روی این قطعه به تنش تسلیم برسد، در اثر تغییر شکل پلاستیک دچار واماندگی خواهد شد. تجزیه و تحلیل دقیق این پدیده مستلزم در نظر گرفتن تمام مؤلفه‌های تنش است [۱۲]. بدیهی است که به دلیل وضعیت پیچیده تنش در این فرایند تغییر شکل موضعی و فزاینده، چنین تحلیل دقیقی را نمی‌توان ایجاد کرد، مگر با استفاده از روش‌های عددی مانند تحلیل اجزای محدود. با این حال، برای یک بررسی تحلیلی ساده، می‌توان یک نسخه ساده شده از تغییر شکل مانند اکستروژن را تحلیل کرد. کالپاچی اوغلو یک معیار ساده و درعین حال قابل قبول برای شکست در کاهش ضخامت بالا در فرآیند تشکیل جریان ارائه

³ VUMAT

کرده است [۱۳]. رویکرد مشابهی در اینجا برای تحلیل پدیده پیچش اتخاذ شده است. معادله زیر که از تحلیل معروف اسلب [۱۴] به دست آمده است، برای تعریف تنش اعمالی (σ_f) بر حسب اصطکاک و ضخامت استفاده شده است.

$$\sigma_f = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{t_f}{t_0} \right)^B \right] \quad (2)$$

که σ_0 تنش تسلیم کرنش صفحه‌ای است، t_0 و t_f به ترتیب ضخامت‌های اولیه و نهایی هستند و B عبارت است از:

$$B = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan \alpha} \quad (3)$$

که μ_1 ضریب اصطکاک بین غلتک و لوله است، μ_2 ضریب اصطکاک بین ماندریل و لوله است و α زاویه حمله غلتک است. لازم به ذکر است که اگر اصطکاک بین غلتک و لوله برابر با اصطکاک بین ماندریل و لوله باشد، آنگاه $B = 0$ خواهد شد و تنش اعمالی (σ_f) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_f = \sigma_0 \ln \left(\frac{t_0}{t_f} \right) \quad (if \ B = 0) \quad (4)$$

با توجه به معیار در نظر گرفته شده، واماندگی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش اعمال شده به قسمت نازک شده لوله برابر با تنش تسلیم آن شود:

$$\sigma_f = \sigma_0 \quad (5)$$

توجه داشته باشید که به‌عنوان یک فرض، تنش جریان ثابت را می‌توان در طول تغییرشکل در نظر گرفت. با ترکیب معادلات (۲) و (۵)، حداکثر کاهش ممکن بدون پدیده واماندگی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{t_f}{t_0} = (1+B)^{-1/B} \quad (6)$$

که می‌تواند برای محاسبه کاهش ضخامت (r) بازنویسی شود:

$$r = 1 - (1+B)^{-1/B} \quad (7)$$

در مورد اصطکاک‌های مساوی ($B = 0$)، معادله (۴) و (۵) منجر به حداکثر کاهش ضخامت ۶۳٪ می‌شود.

۲- تست‌های تجربی

۲-۱- تست‌های مکانیکی

جهت تعیین جنس نمونه، آزمون کوانتومتری صورت گرفت. درصد عناصر فولاد D6ac در جدول ۱ آورده شده است. مشخصات مکانیکی جنس فولاد مورد استفاده در این پژوهش به‌قرار جدول ۲ است.

جدول ۱ آنالیز موادی فولاد D6ac

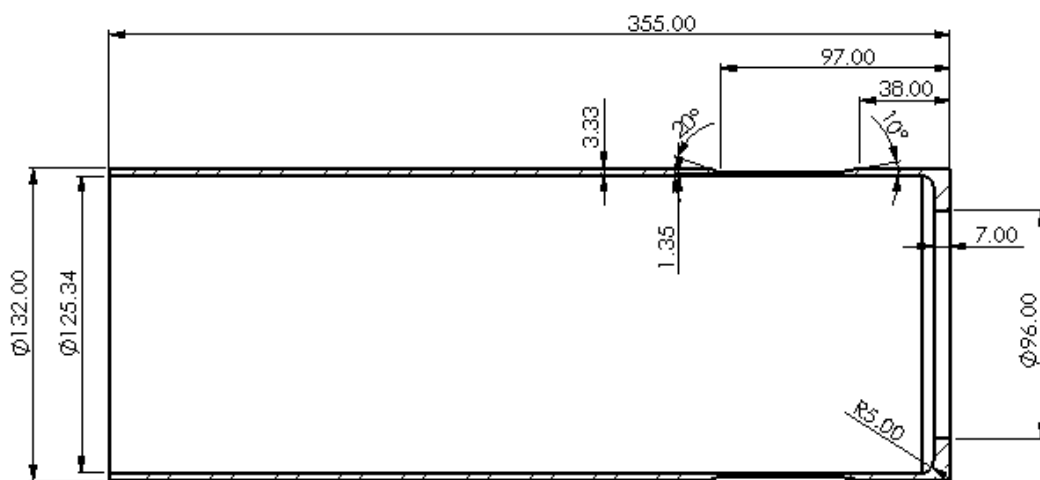
Chemical composition of the steel investigated (wt%)									
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Al	P	S
۰/۴۳	۰/۷۴	۰/۲۶	۱/۰	۰/۵۹	۰/۹۶	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳

جدول ۲ مشخصات مکانیکی فولاد D6ac

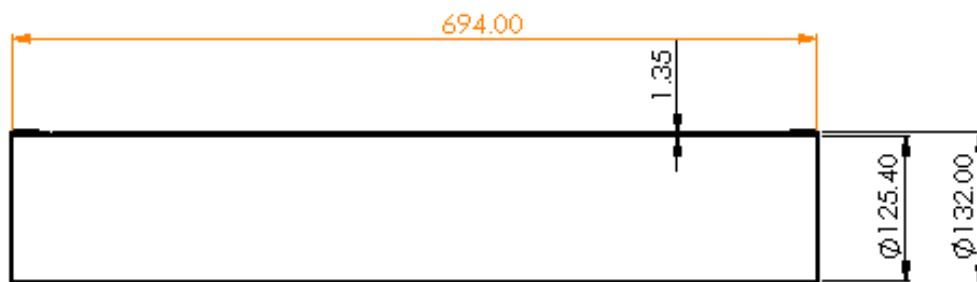
ضریب پواسون	درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۰/۳	۷٪	۱۵۷۰	۱۳۴۵

۲-۲- تست‌های فلورمینگ

فرایند فلورمینگ توسط دستگاه ساخت شرکت لیفیلد صورت گرفت. ابعاد پریفرم مطابق شکل ۳ است. ابعاد محصول در شکل ۴ آورده شده است. در شکل ۵ نمایی از محصول نهایی مشاهده می‌گردد.



شکل ۳ ابعاد پریفرم فولاد D6ac جهت شروع فرایند فلورمینگ (بر حسب میلیمتر)



شکل ۴ ابعاد نهایی نمونه فولاد D6ac بعد از فرایند فلورمینگ



شکل ۵ محصول نهایی پس از عملیات فلورمینگ

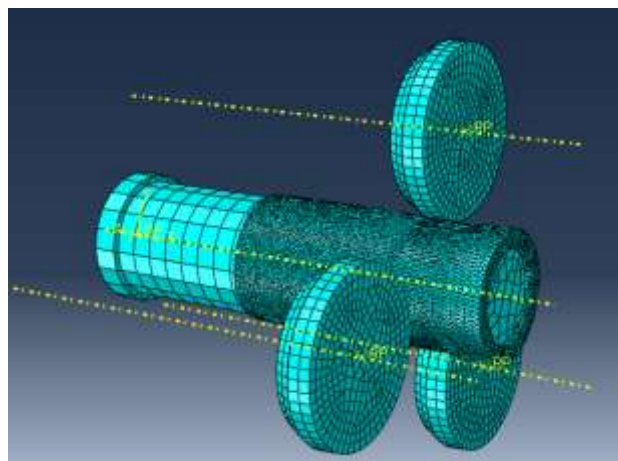
به منظور بررسی تأثیر نرخ پیشروی بر کیفیت سطح، دقت ابعادی و هندسی لوله‌های فولادی از تعدادی لوله پرفرم استفاده شده است. تمامی پارامترهای موجود در دستگاه فلوفرمینگ طبق جدول ۳ ثابت نگه داشته می‌شود و دستگاه برای چهار نرخ پیشروی متفاوت ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ و ۰/۶ میلی‌متر بر دور آماده شد. جهت بررسی تأثیر سرعت دوران ماندریل، تمامی پارامترهای موجود در دستگاه فلوفرمینگ ثابت نگه داشته شد و چهار سرعت چرخش ماندریل متفاوت ۹۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ دور بر دقیقه اعمال شد.

جدول ۳ ابعاد و شرایط اولیه شکل‌دهی غلتکی پرفرم‌های D6ac به منظور بررسی اثر نرخ پیشروی و سرعت چرخش ماندریل

D6ac	جنس
۱۲۵/۳۵	قطر داخلی پرفرم (mm)
۳/۳۳	ضخامت پرفرم (mm)
۳۵۵	طول اولیه پرفرم (mm)
۱۱۰	سرعت چرخش ماندریل (rpm)
۱/۱	شعاع نوک غلتک (mm)
۰/۸۸	مقدار بار برای هر مرحله شکل‌دهی (mm)

۳- مدل‌سازی اجزای محدود

مجموعه غلتک و ماندریل‌ها و پرفرم مطابق تست‌های تجربی و با ابعاد نشان داده شده در شکل ۳ در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ایجاد گردید. خواص موادی به صورت الاستیک - پلاستیک با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و ویژگی‌های مکانیکی مطابق با خواص فولاد D6ac که از تست کشش نمونه به دست آمده و در جدول ۲ نشان داده شده است، تعریف شد. در شکل ۶ نمایی از مدل المان‌بندی دیده می‌شود. لازم به ذکر است که غلتک‌ها و ماندریل از نوع صلب و پرفرم از نوع شکل‌پذیر تعریف شده‌اند. ضریب اصطکاک نیز ۰/۰۸ فرض شده است.

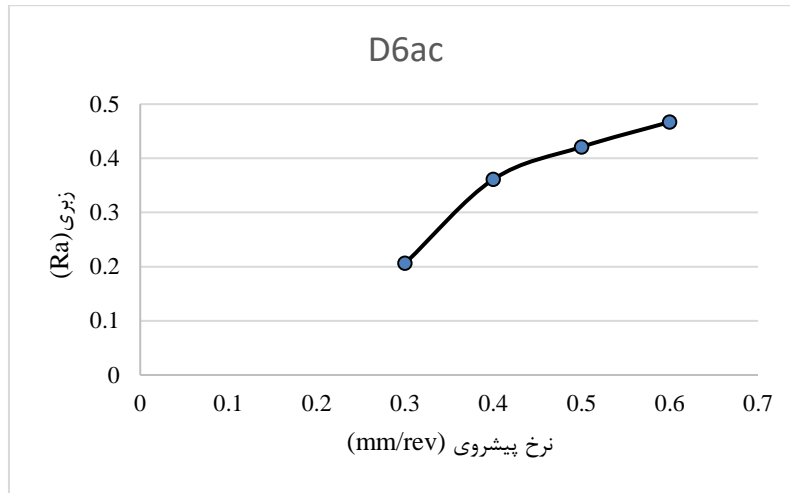


شکل ۶ مش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج تجربی

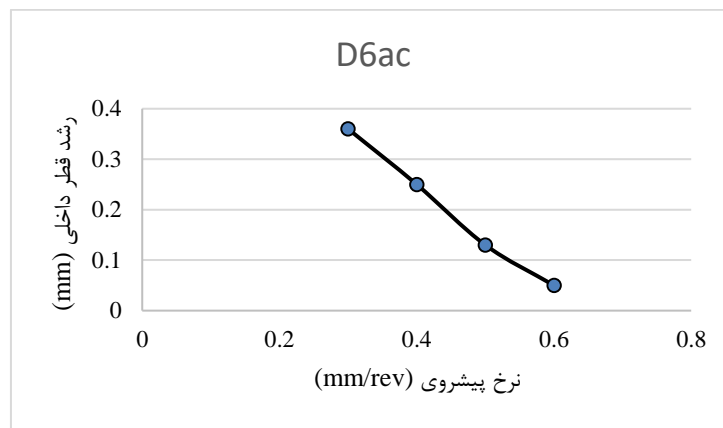
در نمودار شکل ۷ تأثیر نرخ پیشروی را بر روی زبری سطح لوله فولادی D6ac مشاهده می‌کنیم. در قسمت وسط و به فاصله ۳۵ میلی‌متر از سر لوله شکل داده شده، سه مرتبه از قسمت‌های مختلف زبری سطح اندازه‌گیری شده است. میانگین اندازه‌های گرفته شده به عنوان مقدار متوسط زبری سطح بر حسب Ra در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ تأثیر نرخ پیشروی روی زبری سطح لوله فولادی D6ac در کار عملی

با توجه به نمودار مشاهده می شود که با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ تا ۰/۶ میلی متر بر دور، زبری سطح حدوداً ۹۷ درصد افزایش می یابد. مطابق با تعریف پیشروی که بر حسب جابجایی بر دور می باشد، افزایش نرخ پیشروی، در یک دور چرخش قطعه کار، مقدار بیشتری جابجایی طولی غلتک روی لوله را به همراه دارد، در نتیجه سطح بیشتری از ماده در یک دور چرخش لوله با غلتک در تماس است و ناصافی سطح لوله بیشتر می شود.

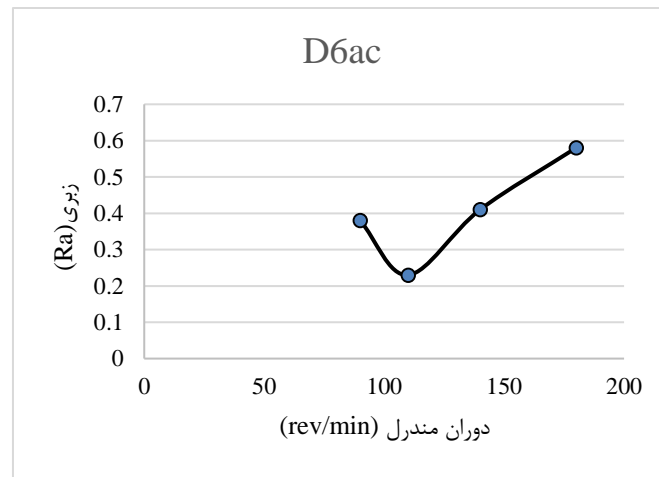
قطعات شکل داده شده توسط فرایند فلوفرمینگ اندازه گیری ابعادی شدند و میزان رشد قطر داخلی آن ها نسبت به قطر پریفورم، برای پیشروی های متفاوت در نمودار شکل ۸ آورده شده است. تمامی قطعات از یک قسمت مشخص و به فاصله ۳۵ میلی متر از سر لوله اندازه گیری شده اند.



شکل ۸ اثر نرخ پیشروی بر روی رشد قطر داخلی لوله فولاد D6ac

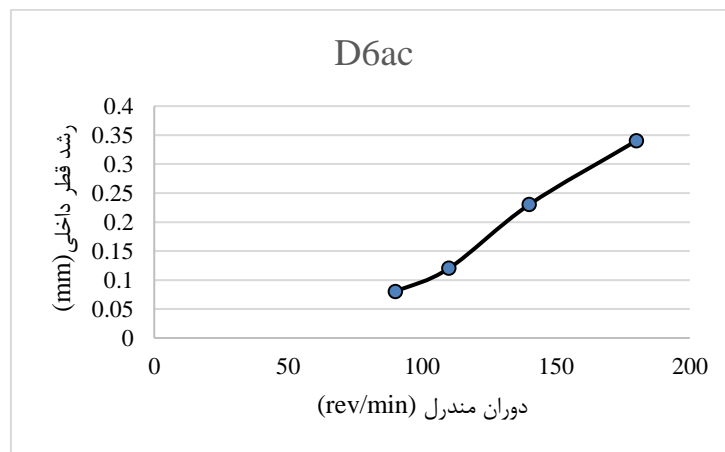
همان طور که از نمودار مشخص است با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ به ۰/۶ میلی متر بر دور، رشد قطر داخلی لوله شکل داده شده، ۸۶/۸ درصد کاهش می یابد. تغییر شکل پلاستیک مواد در لوله به وسیله این فرایند در دو جهت طولی و عرضی وجود دارد. با کاهش نرخ پیشروی درصد کاهش مقطع بیشتر می شود و تغییر شکل پلاستیک در جهت عرضی از تغییر شکل پلاستیک در جهت طولی بیشتر می شود. همچنین تغییر شکل به وسیله عمق نفوذ غلتک در جهت طولی به تأخیر می افتد. در نتیجه رشد قطری بیشتر می شود. می توان نتیجه گرفت که به وسیله تنظیم کردن مقدار پیشروی می توان رشد قطری را کاهش یا افزایش داد. در مواقعی که کیفیت سطح قطعه کار اهمیت بالایی نداشته باشد، می توان با افزایش نرخ پیشروی، از افزایش رشد قطری جلوگیری کرد.

نمودار شکل ۹ تأثیر سرعت دوران ماندریل را بر روی زبری سطح لوله فولاد D6ac نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش سرعت دوران تا ۱۱۰ دور بر دقیقه، زبری سطح لوله کاهش و با افزایش بیشتر سرعت دوران افزایش می‌یابد؛ بنابراین به‌منظور به دست آوردن کیفیت سطح مشخص باید پارامتر سرعت دوران را نیز در نظر گرفت. سرعت دوران بالا باعث لرزش و ارتعاش در دستگاه می‌شود، همچنین باعث بالا رفتن دمای فلز می‌شود و جریان فلز را در فرایند شکل‌دهی تسهیل می‌بخشد. در نتیجه با افزایش سرعت دوران ماندریل، جریان فلز راحت‌تر می‌شود و کیفیت سطح افزایش می‌یابد، اما با افزایش سرعت دوران از حد مشخصی لرزش و ارتعاش در دستگاه و ماندریل ایجاد می‌شود و کیفیت سطح فلز کاهش می‌یابد. در مواقعی که کیفیت سطح لوله شکل‌دهی غلتکی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، باید سرعت دوران بهینه را به دست آورد.



شکل ۹ اثر سرعت دوران بر زبری سطح لوله‌های فولادی D6ac

سرعت دورانی ماندریل بر روی تغییرات ابعادی لوله‌های شکل داده شده نیز تأثیر دارد. به‌منظور سنجش میزان دقت ابعادی از پارامتری به نام رشد قطر داخلی لوله استفاده می‌شود. شکل ۱۰ نمودار حاصل از تغییرات رشد قطر داخلی لوله‌های فولادی D6ac را با تغییرات سرعت دوران ماندریل نشان می‌دهد.

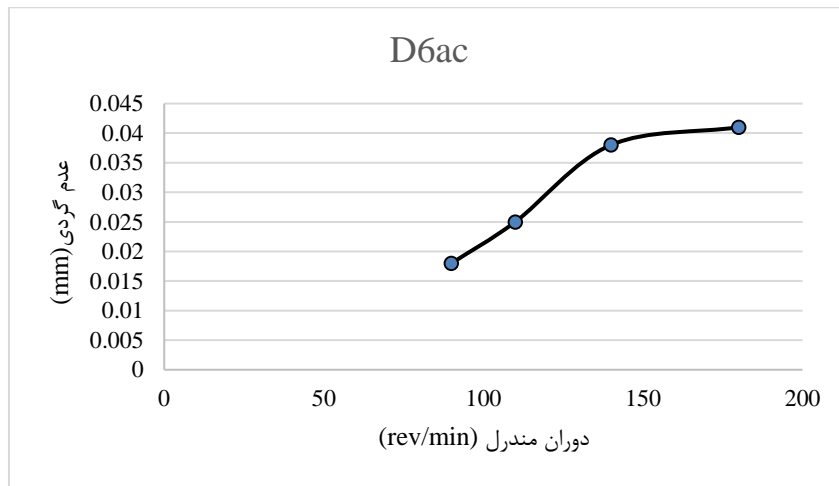


شکل ۱۰ اثر سرعت دوران بر روی رشد قطری لوله فولاد D6ac

همان‌گونه که از نمودار مشخص است، با افزایش سرعت دوران ماندریل از ۹۰ تا ۱۸۰ دور بر دقیقه، قطر داخلی لوله فولاد D6ac زیاد می‌شود. سرعت دوران بالاتر علاوه بر تولید حرارت و افزایش فرم‌پذیری، باعث افزایش نیروی شعاعی (نیروی گریز از مرکز) در لوله می‌شود، به همین علت مقدار رشد قطری در لوله با افزایش سرعت دوران، بیشتر خواهد بود. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش نرخ پیشروی، دقت ابعادی لوله شکل‌دهی غلتکی کاهش می‌یابد. در مواقعی که نیاز به سرعت انجام کار است، باید پارامتر افزایش قطر داخلی را نیز در نظر گرفت و تا حدی سرعت دوران ماندریل را افزایش دهیم که دقت ابعادی مورد نظر

ایجاد شود. در عملیات تجربی در سرعت دوران‌های بالا به علت لرزش دستگاه و وجود لقی در دستگاه مقداری از بار اعمال شده به دستگاه کاسته می‌شود و به اصطلاح بار دستگاه پس می‌زند که منجر به کم شدن بار دستگاه می‌شود.

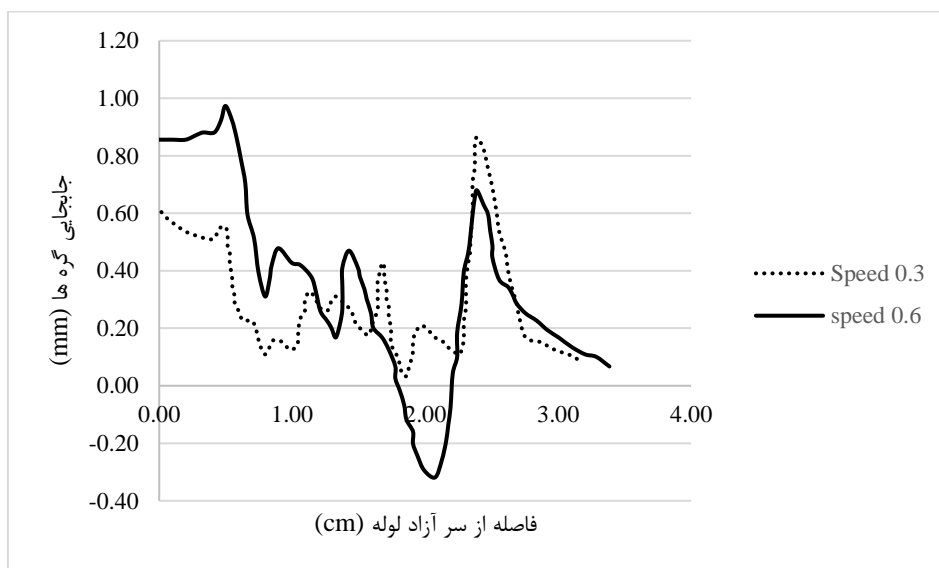
دقت هندسی لوله‌های فلوفرمینگ از اهمیت بالایی برخوردار است. عدم گردی باعث ایجاد خارج مرکزی در لوله می‌شود. به خصوص در لوله‌های دوار، عدم گردی منجر به عدم تعادل و ایجاد ارتعاش می‌شود. نمودار شکل ۱۱ میزان عدم گردی لوله‌های فلوفرمینگ را برای جنس فولاد D6ac نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت دوران از ۹۰ به ۱۶۰ دور بر دقیقه مقدار عدم گردی در لوله افزایش می‌یابد؛ که این مقدار در سر لوله بیشتر از قسمت ته آن است. به‌منظور دستیابی به مقدار دقت هندسی مشخص، نمی‌توان مقدار سرعت دوران را از حد خاصی بیشتر کرد.



شکل ۱۱ اثر سرعت دوران بر روی عدم گردی لوله فولاد D6ac

۲-۴- نتایج اجزای محدود

نمودار شکل ۱۲ جابجایی گره‌ها در راستای ضخامت قطعه را بر روی مدل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. این جابجایی نسبت به حالت استاندارد گره یعنی نسبت به قطر لوله اندازه‌گیری می‌شود.

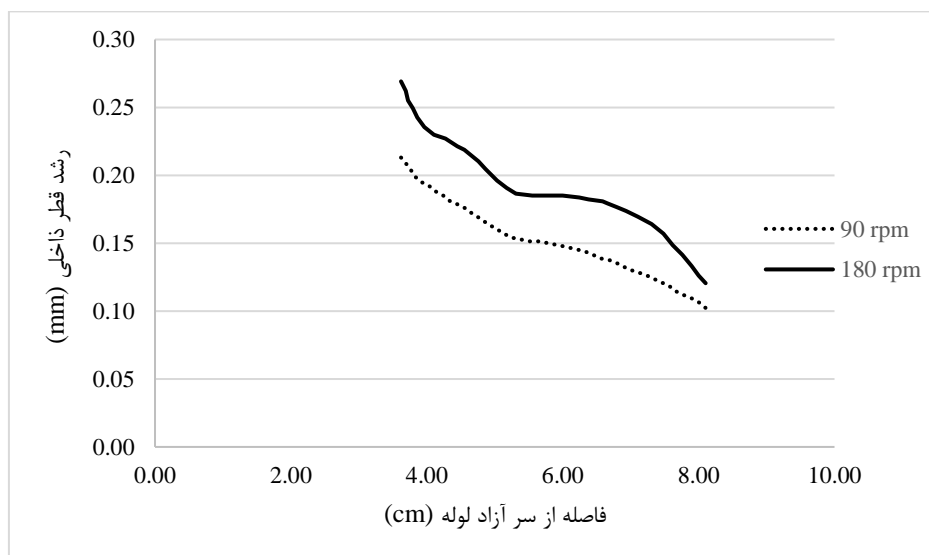


شکل ۱۲ جابجایی گره‌ها نسبت به هم در مدل شبیه‌سازی برای دو پیشروی متفاوت

همان‌گونه که از نمودار مشخص است، با افزایش نرخ پیشروی اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها بیشتر از

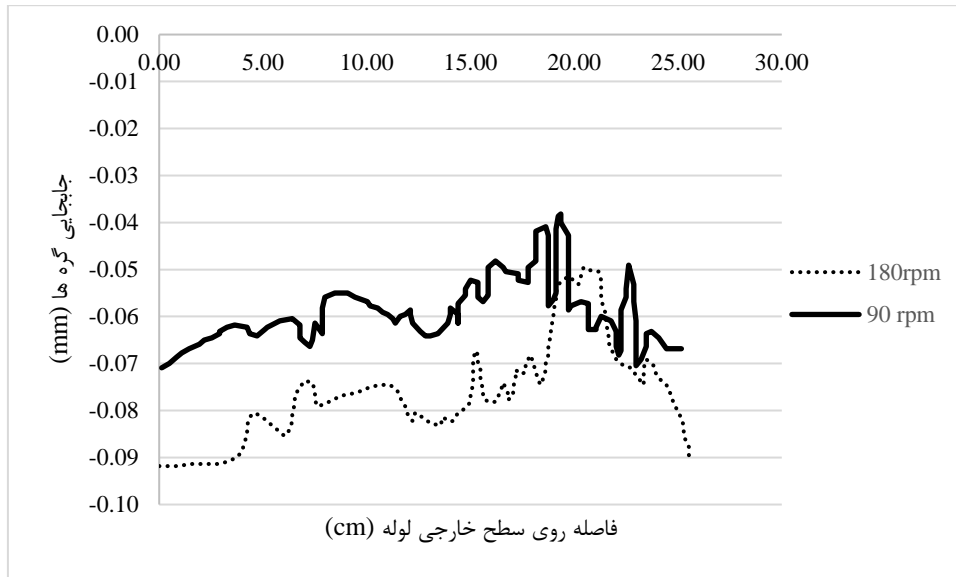
حالت نرخ پیشروی کمتر می‌باشد. به این منظور برای پیشروی کم، اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها، معادل عدد زبری سطح در حالت کمترین پیشروی آزمایشگاهی و برای پیشروی زیاد، اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها، معادل عدد زبری سطح در حالت بیشترین پیشروی آزمایشگاهی می‌باشد. با افزایش نرخ پیشروی از $0/3$ به $0/6$ میلی‌متر بر دور، زبری سطح مدل شبیه‌سازی شده $62/5$ درصد افزایش می‌یابد.

نمودار شکل ۱۳، اثر سرعت دوران ماندریل را بر روی افزایش قطر داخلی لوله فولادی نشان می‌دهد. برای بررسی مقدار افزایش قطر داخلی در نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس از جابجایی گره‌ها در راستای شعاعی بر روی مسیر مشخص شده روی قطر داخلی استفاده شده است. چنانچه از نمودار مشخص است، با افزایش 100 درصدی سرعت دوران در مدل شبیه‌سازی، قطر داخلی $24/3$ درصد افزایش می‌یابد. توجه این مطلب به این صورت است که دوران بالاتر باعث ایجاد نیروی شعاعی بیشتر در لوله می‌گردد و در نتیجه افزایش طول شعاعی بیشتر می‌گردد. نتایج این نمودار با نتایج تجربی به دست آمده در نمودار شکل ۱۰ تطابق خوبی دارد. در نمونه تجربی نیز مشاهده گردید که رشد قطری با افزایش سرعت دوران بیشتر می‌شود. روند تغییرات نمودار با نمودار تجربی تطابق خوبی دارد ولی از لحاظ مقدار تفاوت دارند. علت اختلاف در مقادیر بدست آمده این است که در مدل‌سازی المان محدود، قطر داخلی ثابت در نظر گرفته می‌شود و هیچ‌گونه عدم‌گردی و همچنین تغییر قطری در پرفرم لحاظ نمی‌شود، ولی در نمونه تجربی با توجه به اینکه پرفرم ماشینکاری شده است، مقدار اندکی عدم‌گردی و همچنین تغییر قطر با توجه به تolerانس‌های ساخت وجود دارد.



شکل ۱۳ اثر سرعت دوران بر رشد قطری لوله فولاد D6ac در حالت شبیه‌سازی شده

نمودار شکل ۱۴ اثر سرعت دوران ماندریل را بر روی جابجایی گره‌های سطح خارجی لوله فولادی D6ac نشان می‌دهد. عدد جابجایی گره‌ها منفی می‌باشد. برای دوران‌های بالاتر جابجایی گره‌های سطح خارجی بیشتر می‌باشد. همچنین اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها در حالت دوران بالاتر بیشتر از دوران پایین‌تر می‌باشد. عدد اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها برای سرعت دوران 180 دور بر دقیقه برابر $0/431$ میلی‌متر و برای سرعت دوران 90 دور بر دقیقه برابر $0/3401$ میلی‌متر می‌باشد. با افزایش 100 درصدی سرعت دوران میزان عدم‌گردی در سطح خارجی لوله فولادی $26/7$ درصد افزایش می‌یابد. نتایج این نمودار با نتایج تجربی به دست آمده در نمودار شکل ۱۱ تطابق خوبی دارد. در نمونه تجربی نیز مشاهده گردید که عدم‌گردی با افزایش سرعت دوران بیشتر می‌شود. علت اختلاف اندک در مقادیر بدست آمده نیز بخاطر این است که در تحلیل المان محدود، قطر داخلی لوله با قطر خارجی ماندریل یکی فرض می‌شود در حالی‌که در واقعیت تفاوت اندکی دارند. همچنین در مدل‌سازی المان محدود، عدم‌گردی در پرفرم صفر در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی‌که در واقعیت بعد از ماشینکاری پرفرم نیز عدم‌گردی وجود دارد.



شکل ۱۴ اثر سرعت دوران ماندریل بر روی جابجایی گره‌ها روی قطر خارجی سطح لوله C350

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی فرایند فلوفرمینگ برای جنس فولاد D6ac به کمک تحلیل اجزای محدود و همچنین آزمایش‌های تجربی پرداخته شد. اثر پارامترهای مختلف فرایندی نظیر نرخ پیشروی و سرعت دوران ماندریل بررسی گردید و اثرات آن‌ها بر کیفیت سطح و تolerانس ابعادی محصول بررسی شد. نتایج به قرار زیر است:

- با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح محصول نهایی افزایش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی همچنین منجر به کاهش عدم‌گردی و در نتیجه بهبود کیفیت هندسی قطعه نهایی می‌شود.
- افزایش سرعت دوران ماندریل منجر به کاهش زبری سطح می‌شود. همچنین افزایش سرعت دوران منجر به افزایش عدم‌گردی محصول می‌شود.

Authorship Contribution Statement

Reza Saeidi Abu-es-haghi

Biography: M.Sc. student in Mechanical Engineering at Imam Hossein University, Tehran, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Alireza Naddaf Oskouei



Biography: Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering at Imam Hossein University, Tehran, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

۶- مراجع

- [1] Khalilian M, Bakhshi Jooybari M. Investigating the forming mechanism in the tube spinning process by the finite element method. 1st Iranian Pipe and Pipeline Conference. Tehran. Iran. 2007. (In Persian)
- [2] Tabei K H, Javanroodi F. The effect of effective parameters on the quality of flow forming pipes 12th Iranian Conference on Manufacturing Engineering (ICME 2010). Tehran. Iran. 2010. (In Persian)
- [3] Haghghat V, Yavari M R. Mechanical and Microstructural Properties Evaluation of AISI4130 Steel After Backward Flow Forming Process. The second conference of the Iranian Aerospace Propulsion Association. Tehran. Iran. 2012. (In Persian)
- [4] Abedini A, RashAhmadi R, Donyavi A, Deylami azodi H. Experimental investigation and optimization of flow forming process using Taguchi method. 20th Annual Conference of Mechanical Engineering. Shiraz. Iran. 2011. (In Persian)
- [5] soleimani V, Faraji G. Mechanical and microstructural properties evaluation of AISI4130 steel after backward flow forming process. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(3): 183-190.
- [6] Bhatt R J, Raval H K. Influence of Operating Variables during Flow Forming Process. in Procedia CIRP. 2016; 146-151.
- [7] Banerjee P, Hui N B, Dikshit M K, Som S. Fe modelling of three-dimensional staggered backward metal flow forming process. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2021; 13(1): 15-25.
- [8] Singh A K, Narasimhan K, Singh R. Finite element modeling of backward flow forming of Ti6Al4V alloy. Materials Today: Proceedings. 2018; 24963-24970.
- [9] Zhu C, Li F, Dong Y, Zhao S, Lv J, Meng D. The Rollers' Offset Position Influence on the Counter-Roller Flow-Forming Process. Metals. 2022; 12(9): 1471.
- [10] Vural H, Erdoğan C, Fenercioglu T O, Yalçinkaya T. Ductile failure prediction during the flow forming process. Procedia Structural Integrity. 2022; 35: 25-33.
- [11] Runge M. Spinning and flow forming. Verlag Moderne Industrie. 1994; 86895.
- [12] Xu Y, Zhang S H, Li P, Yang K, Shan D B, Lu Y. 3D rigid-plastic FEM numerical simulation on tube spinning. J Mater Process Technol. 2001; 113(1-3): 710-713.
- [13] Kalpakcioglu S. Maximum Reduction in Power Spinning of Tubes. Journal of Engineering for Industry. 1964;86(1): 49-54.
- [14] Hosford WF, Caddell RM. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 2011.