مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 186-194

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی تاثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی چرخشی بر نیروها و توسعه عیوب در شکل‌دهی لوله‌های آلومینیم آلیاژی 6061

محمد علی رسولی[1]، ابوذر طاهری زاده[2*]، محمود فرزین [3]، امیر عبداله[4]، محمدرضا نیرومند[5]

1- استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر
2- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
5- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران
* اصفهان، صندوق پستی 83111-84156، a.taheri@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 خرداد 1395
پذیرش: 03 آبان 1395
ارائه در سایت: 21 آذر 1395

کلید واژگان:
شکل‌دهی چرخشی لوله
آلیاژ آلومینیوم 6061
توسعه عیوب
نیروی شکل‌دهی

چکیده

فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله که گونه‌ای از فرایندهای شکل‌دهی چرخشی است، یکی از روش‌های ساخت لوله‌های مدور بدون درز در صنایع پیشرفته می‌باشد. در این فرایند موادی که به زیر غلتک وارد می‌شوند باید در جهت محوری به‌صورت اکسترود شده جریان پیدا کنند. ماهیت اصلی فرایند، موضعی بودن ناحیه تغییر شکل و مقید بودن این ناحیه به ابزار و مواد اطراف آن است. لذا این فرایند پتانسیل بالایی برای شکل‌گیری و توسعه عیوب به دلیل جریان‌های ناخواسته دارد. انتخاب نامناسب پارامترهای فرایند موجب شکل‌گیری و توسعه عیوب هندسی و ابعادی در قطعه می‌گردد. در این تحقیق براساس اصول طراحی آزمایش، چگونگی تاثیر پارامترهای فرایند بر شکل‌گیری و توسعه عیوب و ارتباط آن با جریان مواد و نیروهای فرایند در شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیم آنیل شده 6061 بررسی شدند. نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهد با استفاده از نسبت کاهش ضخامت و میزان پیشروی در دور بهینه می‌توان از توسعه عیوب هندسی و ابعادی جلوگیری کرد. همچنین ارزیابی نحوه تغییرات نیروهای اندازه‌گیری شده نسبت به نیروهای محاسبه شده با استفاده از روابط معیار نشان می‌دهد که میزان انحراف نیروهای اندازه‌گیری شده نسبت به نیروهای محاسبه شده با استفاده از روابط معیار ناشی از جریان ناخواسته مواد است که عامل اصلی توسعه عیوب هندسی و ابعادی و تغییر ماهیت فرایند نیز می‌باشد.

Investigating the effects of process parameters on forming forces and defects formation in tube spinning process of AA6061

MohammadAli Rasooli[1], Aboozar Taherizadeh[2*], Mahmood Farzin[3], Amir Abdolah[4], Mohammad Reza Niroomand[5]

1- Department of Marine Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran
2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
5- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, a.taheri@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 June 2016
Accepted 24 October 2016
Available Online 11 December 2016

Keywords:
Tube spinning
Flow forming, AA6061
Defects formation
Forming forces

ABSTRACT

Tube spinning or flow forming process is used for manufacturing of seamless tubes widely put into service in advanced industries. The ideal flow for materials entering the deformation zone in this process is extrusion-type flow in axial direction. Very localized deformation zone which is confined by outer materials and forming tools is a very important aspect of this process. Therefore, developments of defects during the deformation process with undesirable flow of materials can easily occur. The main reason of undesirable flow of materials is choosing inappropriate process parameters which results in the occurrence of various geometrical and dimensional defects. In this paper, the effects of process parameters on formation and growth of different defects and their correlations with material flow and forming forces in tube spinning of AA6061 were investigated by using design of experiment (DOE) method. The results of experiments show that by applying the optimized values of reduction and feed rate per revolution, these defects can be controlled. Also, by comparing the experimentally measured and theoretically calculated forming forces it can be shown that the larger the deviation of measured forces from calculated ones the more severe the formation of defects and undesirable materials flow becomes.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. A. Rasooli, A. Taherizadeh, M. Farzin, A. Abdolah, M. R. Niroomand, Investigating the effects of process parameters on forming forces and defects formation in tube spinning process of AA6061, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 186-194, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

1- مقدمه

فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله یا فلوفرمینگ فرایندی است برای ساخت لوله‌های بدون درز در صنایع حساس و پیشرفته از جمله هوافضا، بهداشتی و تجهیزات پزشکی. ماهیت فرایند مذکور، داشتن نیروهای شکل‌دهی کمتر در مقایسه با فرایندهای دیگر برای تولید قطعات مشابه مانند اتوکاری و کشش و نیز اثر چشمگیر پارامترهای فرایند بر کیفیت سطح و بدنه قطعه‌کار می‌باشد. در فرایند فلوفرمینگ، قطعه پیش‌فرم روی مندرل قرار می‌گیرد و پس از آن‌که ماده زیر نقطه تماس غلتک وارد منطقه تغییرفرم پلاستیک می‌شود غلتک‌ها در جهت محوری ماده را اکسترود کرده و می‌کشند. بنابراین ضخامت دیواره با جریان محوری مواد کاهش پیدا می‌کند و طول قطعه‌کار زیاد می‌شود [1]. نحوه سیلان فلز و کیفیت قطعه نهایی در فرایند فلوفرمینگ به پارامترهای متعددی از قبیل جنس، خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده اولیه، ضخامت پیش‌فرم، لقی بین پیشفرم و مندرل، مقدارکاهش ضخامت، سرعت پیشروی و پارامترهای هندسی ابزار بستگی دارد.

در دهه‌های گذشته، تحلیل‌های تئوری متعددی به منظور محاسبه نیرو و توان لازم برای شکل‌دهی چرخشی لوله‌ها انجام شده است. اولین تحلیل برای این فرایند توسط کوبایاشی و تامسن [2] در سال 1962 انجام شده است. آن‌ها در تحقیق خود از روش تحلیل قاچی برای به‌دست آوردن نیروها استفاده کردند. بعد از آن، هایاما [3] با استفاده از تئوری کوبایاشی و تامسن و بسط و بهبود آن تلاش کرد تا رابطه‌ای صریح برای تخمین نیروهای فرایند ارائه دهد که نتایج به دست آمده از آن نسبت به نتایج تئوری قبلی تطابق بهتری با آزمون‌ها نشان دادند. در تحقیقی دیگر، هایاما و کودو [4] یک روش تحلیلی با استفاده از روش مینیمم کردن انرژی برای تخمین نیروهای فرایند و دقت ابعادی قطعه ارائه دادند، که طبق گزارش آن‌ها تطابق خوبی بین مقادیر محاسبه شده با این روش و مقادیر به‌دست آمده از آزمون‌ها در محدوده وسیعی از شرایط کاری مثل زوایای مختلف غلتک، سرعت‌های پیشروی مختلف و نسبت‌های کاهش مختلف وجود دارد. سینقال [5] و همکاران تحلیلی برای تخمین توان موردنیاز برای شکل‌دهی چرخشی لوله با فرض عدم انباشتگی، عدم رشد قطری و ضریب اصطکاک ثابت بین غلتک و ماده ارائه کردند و همچنین اثر ضخامت پیشفرم و مقدار پیشروی بر دور را روی توان مصرفی فرایند بررسی کردند. در ادامه پارک و همکاران [6] از روش حد بالایی و میدان‌های سرعت ذوزنقه ای و کروی برای تحلیل سیلان و نیروی موردنیاز تغییر شکل در این فرایند استفاده کردند. ژو و همکارانش [7] در سال 2001 به منظور درک توزیع تنش و کرنش و تحلیل مکانیزم تغییر شکل لوله، یک مدل اجزاء محدود برای فرایند اسپینینگ لوله‌ها پیشنهاد دادند و عنوان کردند که افزایش مقدار پیشروی بر دور، موجب افزایش نیروهای فرایند می‌شود. پارسا و همکاران [8] فرایند شکل‌دهی چرخشی مستقیم لوله با استفاده از دو غلتک را به روش اجزای محدود صریح شبیه‌سازی کرده و شکل‌پذیری ماده در این فرایند و نیز تأثیرات هندسه تماس بر روی منطقه تغییرفرم در سرعت‌های پیشروی مختلف و دو زاویه حمله متفاوت را بررسی کردند. محبی و اکبرزاده [9] فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را با روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند و چگونگی توسعه کرنش‌های اضافی را در این فرایند بررسی نمودند. ذوقی و همکاران [10] با استفاده از روش اجزاء محدود چگونگی تغییرفرم فلز و توزیع کرنش را در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله از جنس فولاد 42CrMo بررسی کردند.

در مورد اثر پارامترهای فرایند و ابزار بر روی کیفیت قطعات آلومینیومی، فولادی و دیگر آلیاژهای تولید شده به روش شکل‌دهی چرخشی لوله تحقیقاتی انجام شده که در ادامه مهمترین آن‌ها مرور خواهند شد. پراکاش و همکاران [11] اثر سرعت پیشروی، پروفیل غلتک، درصد کاهش ضخامت و نوع روان‌کار مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر کیفیت سطح لوله تولیدی از جنس فولاد AISI-304 و نیز بر توان موردنیاز فرایند بررسی کردند. چانگ و همکاران [12] قابلیت شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیم آلیاژی 2024 و 7075 را تحت پارامترهای مختلف فرایند بررسی کردند. راجان و همکاران [13] ایجاد عیوب مختلف در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله از جمله پوسته شدن، ترکیدگی پیش از موعد، رشد قطری، ریزترک‌ها و ترک‌های درشت را برای فولاد استحکام بالای SAE 4130 بررسی کردند. فاضلی و همکاران [14] تأثیر پارامترهای مختلف شکل‌دهی و ترمومکانیکی (مثل ضخامت پیش فرم، درصد کاهش ضخامت، سرعت چرخش مندرل، سرعت پیشروی غلتک، زمان حل‌سازی ذرات و زمان پیر کردن ماده) را بر روی کیفیت سطح لولهٔ شکل‌دهی شده از جنس آلیاژ 2024 بررسی کردند. سانگ و همکاران [15] روشی را برای تشخیص عیوب با استفاده از جمع‌آوری همزمان اطلاعات فرآیند مثل نیروهای شکل‌دهی و یا توان مورد مصرف دستگاه ارائه دادند. یائو و موراتا [16] اثرات سرعت پیشروی را بر روی کرنش ضخامت، نیروی شعاعی، دقت ابعادی قطر و صافی سطح برای یک آلیاژ آلومینیوم به‌طور تجربی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی، افزایش کرنش ضخامت و افزایش زبری سطح خواهد شد. به علاوه دقت ابعادی در قطر نیز با افزایش سرعت پیشروی کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [17] اثر فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی شکل‌پذیری و توسعه عیوب لوله‌های آلومینیمی 2024 که تحت فرایند جوش‌کاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته‌اند بررسی کردند. اکینوویچ و همکاران [18] تاثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر کیفیت سطح قطعات نهایی از جنس Al99.5% بررسی کردند. سرینیواسولو و همکاران [19] تاثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی صافی سطح لوله‌های آلومینیم آلیاژی 6082 بررسی کردند. تسیوولاس و همکاران [20] اثر پارامترهای شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی چکونگی تنش پسماند در لوله های فولادی Cr-Mo-V بررسی کردند.

با این که بررسی جریان مواد در این فرایند و تاثیر آن در توسعه عیوب و رابطه نحوه توسعه این عیوب با تغییرات نیروها در فرایند در جهت شناخت فرایند بسیار حائز اهمیت است، ولی هنوز هیچ تحقیق جامعی در میان تحقیقات انجام شده روی تمامی این اثرات انجام نشده است. در این مقاله براساس اصول طراحی آزمایش، اثر پارامترهای فرایند بر نیروها و نحوه توسعه عیوب در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله‌های آلومینیمی آنیل شده بررسی می‌شود. همچنین ارتباط عیوب با نیروهای فرایند و دلایل انحراف نیروهای اندازه‌گیری شده با روابط معیار با توجه به عیوب فرایند مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین حداکثر قابلیت شکل پذیری چرخشی بدون عیب توسط فرایند با یک ابزار با مشخصات هندسی و ماده با خواص مکانیکی ثابت تحت تغییر شکل با تغییر پارامترهای فرایند قابل حصول است و می‌توان تمایل به توسعه عیوب را در شرایط حداکثر شکل‌پذیری در یک مرحله با انتخاب پارامترهای مناسب فرایند کنترل نمود.

2- آزمون‌ها و روش تحقیق

در این بخش سیستم آزمایشگاهی شکل‌دهی چرخشی لوله مختصرا معرفی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

می‌گردد. همچنین پارامترهای مختلف فرایند، ابزار و پیش‌فرم معرفی خواهند شد. سپس چگونگی طراحی آزمون‌ها و پارامترهای متغیر برای بررسی اثر پارامترهای فرایند و نیرو بر نحوه توسعه عیوب و نیروی موردنیاز شکل‌دهی بیان خواهند شد.

2-1- سیستم آزمایشگاهی شکل‌دهی چرخشی لوله

سیستم آزمون به گونه‌ای طراحی شد که امکان نصب بر روی یک ماشین تراش معمولی را دارا باشد (شکل 1). با توجه به حجم زیاد آزمون‌ها، این سیستم امکان تعویض سریع پیش‌فرم به سادگی و در حداقل زمان را دارد. نیروها به‌وسیله دستگاه دینامومتر اندازه‌گیری شدند. بنابراین غلتک شکل‌دهی به گونه‌ای نصب شد تا امکان اندازه‌گیری نیروها در 3 جهت مجزا مهیا گردد.

2-2- متغیرهای فرایند و مشخصات هندسی ابزار و قطعه‌کار

هدف از این تحقیق مطالعه اثر پارامترهای مقدار پیشروی و نسبت کاهش ضخامت بر دور در کیفیت یا توسعه عیوب در فرایند و ارتباط آن با نیروهای فرایند است. به‌منظور ثبات و تکرارپذیری آزمون‌ها، تمام پیش‌فرم‌ها در شرایط یکسان با ماشین‌تراش CNC ماشین‌کاری شدند. قطر مندرل 38 میلی‌متر، ضخامت پیش‌فرم 3 میلی‌متر و لقی قطری بین مندرل و پیش‌فرم 0.05 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در تمام آزمون‌ها، سطح داخلی پیش‌فرم‌ها به دقت تمیزکاری و قبل از نصب بر روی مندرل به روغن آغشته شدند. به‌دلیل دمای موضعی بالا حین فرایند و کاهش اصطکاک به روان‌کاری نیاز است که به‌عنوان یک خنک‌کار عمل کند [21]. به این منظور از تغذیه روغن خنک‌کار تراش‌کاری به‌طور پیوسته و مستقیم با نسبت 1:10 به ناحیه تماس غلتک و قطعه‌کار استفاده شد.

آزمون‌ها با غلتک به قطر 80 میلی‌متر انجام شدند و شعاع سر ابزار نیز به عنوان پارامتری وابسته به قطر غلتک معادل 1/8 شعاع غلتک انتخاب شد [3]. مقدار انتخاب شده برای قطر غلتک تابع محدودیت‌های سیستم آزمون است.

سرعت اسپیندل 90 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. نسبت کاهش ضخامت به صورت درصدی از ضخامت اولیه پیش‌فرم بیان می‌شود. حداکثر نسبت کاهش ضخامت ممکن در یک مرحله معرف قابلیت شکل‌پذیری چرخشی می‌باشد که با استفاده از ابزار با هندسه نامناسب محدودتر می‌شود و در شرایط ایده‌آل می‌تواند تا 35 درصد ضخامت پیش‌فرم متغیر باشد. حداقل نسبت کاهش ضخامت نیز به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که جریان پلاستیک محدود به سطح خارجی قطعه نشود. حداقل این نسبت حدود 15 درصد

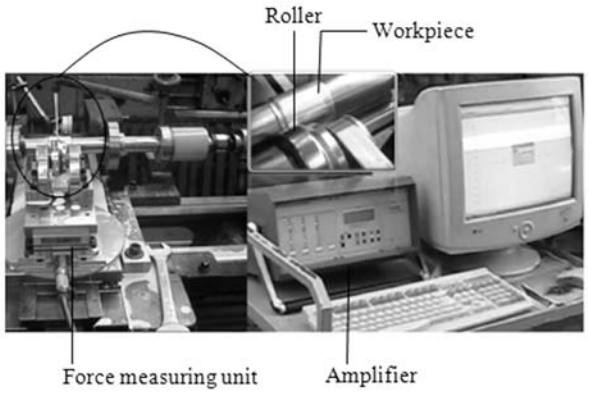

Fig. 1 Experimental tube spinning equipment

شکل 1 تجهیزات سیستم آزمون فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله

توصیه شده است [20]. با توجه به اهمیت پارامتر نسبت کاهش ضخامت، این پارامتر در 3 سطح مورد مطالعه قرار می‌گیرد که عبارتند از : 16.7%، 25% ، 33%. با در نظر گرفتن ضخامت 3 میلی‌متری پیش‌فرم، مقادیر کاهش ضخامت0.5 ، 0.75 و 1 میلی‌متر در شعاع می‌باشند.

مقدار پیشروی بر دور نیز نقش مهمی در کیفیت قطعه نهایی دارد. کاهش مقدار پیشروی بر دور می‌تواند موجب انباشتگی، پارگی سطحی یا پوست ماهی[1] شدن شود و افزایش آن موجب اعوجاج در سطح خارجی یا اصطلاحا رزوه‌زنی و فرار ماده می‌شود [11] . بنابراین باید محدوده قابل قبولی برای مقدار پیشروی بر دور در نظر گرفت. با توجه به این‌که محدوده قابل قبول این پارامتر تابع پارامترهای ابزار و میزان کاهش ضخامت در قطعه است، در 3 سطح مورد مطالعه قرار گرفت. با انجام تعدادی آزمون مشخص شد که در بدترین شرایط محدوده قابل قبول مقدار پیشروی بر دور نمی‌تواند کمتر از 0.08 میلی‌متر بر دور و بیشتر از 0.35 میلی‌متر بر دور باشد. بنابراین با توجه به اهمیت این عامل 3 سطح برای آن در نظر گرفته شد که عبارتند از : 0.11 ، 0.2 و 0.32 میلی‌متر بر دور.

2-3- رویه آزمون‌های شکل‌دهی چرخشی لوله

یکی از تکنیک‌های پرکاربرد برای طراحی آزمایش، شامل ترکیب عوامل متغیر در تمام سطوح آن‌ها[2] است. دو عامل به عنوان عوامل فرایند برای آزمون‌ها در نظر گرفته شد. عامل نسبت کاهش ضخامت در سه سطح و مقدار پیشروی بر دور در سه سطح معرفی شدند. عوامل متغیر و سطوح مربوطه در جدول 1 نشان داده شده‌اند. طرح ترکیب کامل عوامل متغیر در تمام سطوح تغییر، یک ترکیب 3^2 آزمون را شامل می‌شود که با این ترکیب به 9 آزمون متفاوت شکل‌دهی نیاز است.

3- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا در مورد جریان مواد در فرایند توضیح مختصری ارائه می‌شود. سپس عیوب ناشی ار این جریان‌ها تشریح می‌شوند و در نهایت به تحلیل اثرات آن در کیفیت قطعه نهایی و نیروهای فرایند پرداخته می‌شود.

3-1- جریان مواد و تاثیر آن در توسعه عیوب ابعادی

مطالعات نشان می‌دهند، در شکل‌دهی چرخشی لوله‌های آلومینیومی، امکان ایجاد عیوب ابعادی مثل انباشتگی[3] مواد در مقابل غلتک، بادکردگی[4] و رشد قطری[5] وجود دارد. این عیوب به‌طور شماتیک در "شکل 2" نمایش داده شده‌اند.

تحلیل جریان مواد در حین فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله اساساً کار پیچیده‌ای است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند موادی که به زیر غلتک وارد می‌شوند، در حین تغییر شکل پلاستیک امکان جریان در 4 جهت را دارند:

جدول 1 عوامل متغیر و سطوح آن‌ها در آزمون‌های شکل‌دهی چرخشی لوله

Table 1 Variant parameters and their levels in the experiments

گروه	عوامل	سطوح عوامل		
		3	2	1
متغیرهای فرایند	نسبت کاهش ضخامت (%)	33	25	16.7
	مقدار پیشروی بر دور (mm/rev)	0.32	0.2	0.11

[1] Skin fish
[2] Full factorial
[3] Build up
[4] Bulge
[5] Diameter growth

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

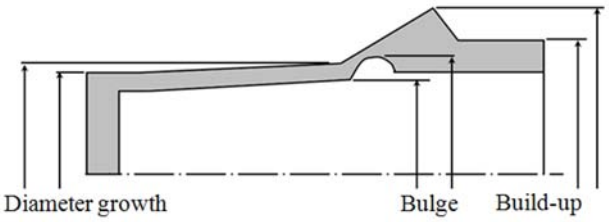

Fig. 2 Schematic presentation of defects: Build-up, Bulge and Diameter growth

شکل 2 نمایش شماتیک عیوب انباشتگی، بادکردگی و رشد قطری

- اکسترود مواد در جهت محوری زیر غلتک که این جریان، جریان مطلوب در فرایند است.
- جریان مواد در جهت مماسی (محیطی) که نورد نامیده می‌شود و عامل رشد قطری در قطعه است.
- جریان مواد در جهت محوری که موجب انباشتگی در مقابل غلتک و ناپایداری جریان پلاستیک می‌گردد.
- جریان مواد در جهت محوری در خلاف جهت اکسترود و شعاعی در جهت انباشتگی در مقابل غلتک که موجب ناپایداری جریان پلاستیک و ایجاد براده در سطح قطعه می‌گردد.
- فرار از ناحیه تغییر شکل به پشت غلتک که موجب عدم دقت در قطر نهایی و کاهش ضخامت می‌شود.

جریان‌های ناخواسته منجر به توسعه عیوب در قطعه می‌شوند. بنابراین به‌منظور دستیابی به شرایط بهینه، جریان‌های ناخواسته در فرایند باید کنترل شوند. در شرایط بهینه، جریان مواد در جهت انباشتگی و یا رشد قطری تا حدی ادامه می‌یابد و سپس همین مواد در مقابل این جریان‌ها مقاومت کرده و مانع ادامه آن‌ها می‌شوند، زیرا ادامه تشکیل آن‌ها نیاز به انرژی بیشتری دارد. در صورتی که مواد در جهت ایده‌آل به‌طور کامل اکسترود شوند، در قطعه نباید عیوبی ایجاد شود و تلرانس‌های قطعه نیز حفظ می‌گردند. آنچه در آزمون‌ها مشاهده می‌شود این است که دست‌یابی به اکسترود کامل مواد زیر غلتک غیرممکن است و در بهترین شرایط دسترسی به درصد کاهش اسمی میسر نیست، ولی می‌توان اختلاف کاهش واقعی و کاهش اسمی را به حداقل رساند.

اگر انباشتگی مواد در مقابل غلتک به حدی باشد که موجب ناپایداری جریان پلاستیک شود، موجب خرابی سطح می‌شود. انباشتگی مواد در مقابل غلتک، خارج از منطقه تغییر شکل و به‌صورت تدریجی تشکیل می‌شود. در ناحیه انباشتگی مواد مقابل غلتک بیرون از منطقه تغییر شکل تنش‌های هیدرواستاتیک وجود ندارند و حد شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد. زیرا قیدی در مقابل حرکت مواد وجود نداشته و در حقیقت مواد انباشته شده در اثر فشار غلتک از زیر آن فرار کرده‌اند. بنابراین افزایش انباشتگی با ادامه فرایند، منجر به پارگی موضعی مواد و جداشدن ماده یا ایجاد براده در این ناحیه می‌گردد. براده‌های ایجاد شده به ناحیه تغییر شکل وارد می‌شوند و باعث تخریب سطح خارجی و کاهش کیفیت آن می‌گردند. در عمل، در این حالت مواد در زاویه‌ای کوچکتر از زاویه حمله غلتک تحت برش داخلی قرار گرفته و اصطکاک چسبنده بین مواد و غلتک وجود دارد.

جریان مواد در جهت مماسی عامل رشد قطری محسوب می‌شود یعنی در این حالت در قطعه کرنش‌های مماسی رخ می‌دهد که باعث افزایش قطر داخلی قطعه می‌گردد. زمانی که قیود کافی برای جلوگیری از حرکت مواد به سمت انباشتگی در مقابل غلتک و رشد قطری وجود داشته باشد، مواد چاره‌ای جز اکسترود در جهت محوری را ندارد که این عامل با فرار مواد به سمت پشت غلتک همراه است و موجب عدم دستیابی به نسبت کاهش مورد نظر در ضخامت می‌شود.

هرچند موضوع جریان مواد در این فرایند موضوع نسبتا پیچیده‌ای است و در هیچ مقاله‌ای به‌صورت شفاف همه عیوب و عوامل آن که جریان‌های ناخواسته است به طور جامع بررسی نشده‌اند، منتها تبیین جریان مواد در این فرایند به منظور درک مناسب آن که هدف اصلی این مقاله است می تواند به تولید محصولات با کیفیت بالاتر و با ضایعات کمتر کمک کند.

3-2- چگونگی ارزیابی قطعات

برای ارزیابی قطعات چهار معیار در پذیرش تلرانس‌های ابعادی و کیفیت سطح قطعه نهایی مدنظر می‌باشند که در زیر تعریف می‌شوند:

1- انباشتگی مواد در مقابل غلتک به حدی که منجر به ناپایداری جریان پلاستیک[1] در مقابل غلتک، ایجاد پلیسه و کاهش کیفیت سطح شود. انباشتگی به‌شدت نیروهای فرایند را افزایش می‌دهد. زیرا موجب افزایش سطح تماس ابزار و قطعه‌کار می‌شود و بنابراین درصد کاهش ضخامت واقعی بیش از مقدار تنظیم شده در فرایند است.

2- پارامتر Δ به عنوان اختلاف نسبت کاهش ضخامت موردنظر R و نسبت کاهش ضخامت واقعی پس از فرایند R_1 است. یعنی $\Delta=R-R_1$ که R و R_1 به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{t_0-t}{t_0} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{t_0-t'_f}{t_0} \quad (2)$$

که t'_f ، t و t_0 به ترتیب ضخامت نهایی واقعی، ضخامت اسمی و ضخامت اولیه هستند. این اختلاف به دلیل فرار مواد از ناحیه تغییر شکل و تغییر شکل الاستیک مندرل و غلتک است.

3- رشد قطری قطعه بعد از فرایند به صورت $D_G = D_{if} - D_{i0}$ تعریف می‌شود. در این رابطه D_{if} و D_{i0} به ترتیب قطر داخلی اولیه و نهایی لوله هستند. این پارامتر می‌تواند دقت ابعادی قطعه نهایی را کاهش دهد.

4- کیفیت سطح خارجی قطعه از دیدگاه‌های مختلف ارزیابی می‌شود. الف) زبری سطح قطعه تغییر شکل یافته که تابعی از کیفیت سطح قطعه پیش فرم، غلتک و نیروی شعاعی است، ب) موجی شدن سطح که حاصل از رد اثر غلتک روی سطح بوده و شبیه رزوه زنی است و ج) ترک‌های سطحی ناشی از جدایش مواد از سطح، به‌دلیل انباشتگی شدید مواد روی سطح خارجی در مقابل غلتک.

تمام نمونه‌ها در مورد معیارهای دوم و سوم به صورت کمی و در مورد معیارهای اول و چهارم به‌صورت کیفی ارزیابی و در 3 طبقه دسته‌بندی شدند. جدول 2 نتیجه ارزیابی آزمون‌ها را در مورد معیارهای اول تا سوم نمایش می‌دهد. به منظور بررسی اثرات متقابل نیاز به ارزیابی کمی از نتایج است. لذا معیار اول یا میزان انباشتگی در جدول 2 که مقدار آن به صورت کیفی بیان شده است، برای 3 حالت ایجاد شده انباشتگی شدید (تشکیل براده)، مشاهده ترک‌های سطحی و انباشتگی متداول بدون براده با شماره های یک تا سه کدگذاری شد.

نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد در پیشروی‌های پایین، با افزایش درصد

[1] Plastic flow instability

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

کاهش ضخامت امکان توسعه عیوب بیشتر می‌گردد و دلیل آن افزایش نسبت حجم موادی که باید اکسترود شوند به حجم موادی است که به منطقه تغییر شکل وارد می‌شود. با افزایش نسبت کاهش ضخامت، انباشتگی مواد در مقابل غلتک زیاد می‌شود که منجربه ناپایداری جریان پلاستیک و تشکیل پلیسه می‌شود. با افزایش درصد کاهش ضخامت، تشکیل براده تشدید شده و درصد زیادی از مواد به‌صورت براده از سطح پیش‌فرم جدا می‌شوند. در پیشروهای پایین، کم شدن درصد کاهش ضخامت موجب پوست ماهی شدن قطعات می‌شود که سایر محققین نیز این پدیده را مشاهده کرده‌اند. با افزایش درصد کاهش ضخامت اثر رد غلتک کمتر می‌شود، یعنی آثار هلیکس مشابه رزوه‌زنی روی سطح خارجی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت کاهش ضخامت، قطر بیرونی قطعه‌کار که از زیر غلتک خارج می‌شود به‌دلیل فرار بیشتر مواد زیادتر است و لذا میزان درگیری سطح صاف زاویه آزاد پشت غلتک با مواد اکسترود شده پشت غلتک بیشتر شده و در نتیجه سطح قطعه به خاطر لهیدگی ناشی از فشار پشت غلتک دارای حالت موجی کمتری خواهد شد. افزایش درصد کاهش ضخامت به‌دلیل افزایش انباشتگی موجب رشد قطری نیز می‌شود. زیرا با افزایش انباشتگی نسبت کاهش واقعی افزایش می‌یابد و موجب افزایش نیروی شعاعی و در نتیجه رشد قطری می‌شود.

"شکل 3" انباشتگی شدید مواد و در نهایت براده‌برداری از سطح را ناشی از پیشروی پایین را نشان می‌دهد. در " شکل 3-a" به‌دلیل استفاده از نسبت کاهش 33% براده‌ها بزرگ هستند و مواد تمایل بیشتری به انباشتگی در مقابل غلتک دارند. در " شکل 3-b" نسبت کاهش 16.6% است و براده‌ها کوچکتر هستند و امکان وارد شدن به منطقه تغییر شکل و ایجاد خراش‌های سطحی را دارند. " شکل 3-c" در نسبت کاهش متغیر براده‌هایی را نشان می‌دهد که وارد منطقه تغییر شکل شده‌اند.

با درصد کاهش ضخامت ثابت، افزایش مقدار پیشروی بر دور باعث کاهش انباشتگی شده و امکان ناپایداری جریان پلاستیک را کمتر می‌کند. مقدار پیشروی بر دور پایین موجب تمایل به انباشتگی شدید می‌شود و سطح قطعه به شدت دارای بریدگی می‌شود. با افزایش مقدار پیشروی بر دور، انباشتگی کاهش می‌یابد. ولی به دلیل نوک تیز غلتک در این زوایا، افزایش مقدار پیشروی بر دور موجب فرار یا جاماندن مواد در پشت غلتک شده و این خود باعث باقی ماندن اثر رد غلتک می‌شود و سطح خارجی همانند قطعه هلیکس می‌شود که در این حالت فاصله دو نوار متوالی روی سطح با افزایش

جدول 2 میزان انباشتگی، انحراف قطر نهایی و رشد قطری براساس نتایج آزمون‌ها

Table 2 Build-up, deviation of final diameter and diameter growth in experiments

پارامترهای فرایند		میزان عیوب ایجاد شده		
R (%)	F (mm/rev)	میزان انباشتگی (mm)	انحراف قطر نهایی (mm)	رشد قطری (mm)
16.7	0.11	انباشتگی شدید (تشکیل براده) (3)	0-0.1	0-0.05
	0.2	مشاهده ترک‌های سطحی(2)	0-0.1	0-0.05
	0.32	انباشتگی متداول بدون براده (1)	0-0.1	0-0.05
25	0.11	انباشتگی شدید (تشکیل براده) (3)	0-0.1	0.05-0.1
	0.2	مشاهده ترک‌های سطحی (2)	0-0.1	0.05-0.1
	0.32	انباشتگی متداول، بدون براده (1)	0.1-0.15	0.05-0.1
33	0.11	انباشتگی شدید (تشکیل براده) (3)	0.1-0.15	>0.1
	0.2	انباشتگی شدید (تشکیل براده) (3)	0.1-0.15	>0.1
	0.32	انباشتگی شدید (تشکیل براده) (3)	> 0.15	> 0.1

Fig. 3 Build-up of materials in front of rollers results in plastic instability and materials removing. Experiments conditions: feed rate 0.11 mm/rev, reduction (a) 33%, (b) 16.6% and (c) 33% to 16.6%

شکل 3 انباشتگی شدید مواد در مقابل غلتک که منجر به ناپایداری جریان پلاستیک و براده‌برداری از سطح شده است. شرایط آزمون‌ها: مقدار پیشروی 0.11 میلی‌متر بر دور و نسبت کاهش ضخامت (a)- 33% (b)-16.6% و (c)- متغیر از 33% به 16.6% در حین فرایند

مقدار پیشروی بر دور افزایش می‌یابد. در حالت پیشروی بر دور خیلی زیاد، بخشی از ماده به صورت برجسته و به شکل هلیکس وارد هیچ‌گونه درگیری با غلتک نمی‌شود.

"شکل 4" اثر مقدار پیشروی بر دور را در نسبت کاهش 16.67% نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مقدار پیشروی 0.11 میلی‌متر بر دور ترک‌های سطحی و تشکیل براده کاملا مشهود است. در مقدار پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور، اثر رزوه‌زنی روی سطح قطعه مشاهده می‌شود و در مقدار پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور هم آثار اعوجاج و هم ترک‌های سطحی دیده می‌شود که شدت کمتری دارند. اعوجاج حاصل از افزایش مقدار پیشروی بر دور و باقی ماندن اثر رد غلتک در تحقیقات متعددی تایید شده است. افزایش مقدار پیشروی بر دور همچنین باعث کاهش بازدهی فرایند می‌گردد که دلیل آن افزایش میزان فاصله محوری طی شده توسط غلتک در

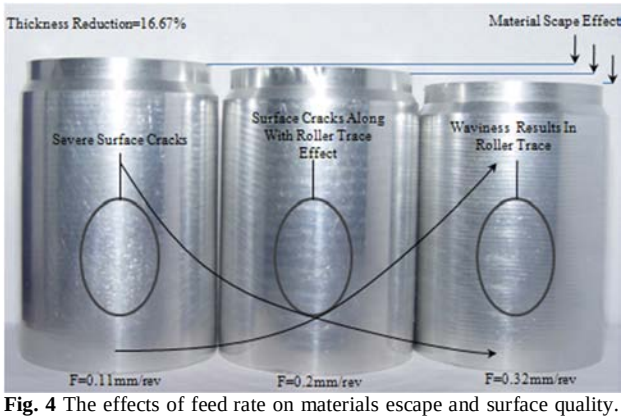

Fig. 4 The effects of feed rate on materials escape and surface quality. Experiments conditions: roller angle 30 deg, roller diameter 80 mm, reduction 16.6%, and feed rate 0.11, 0.2, 0.32 mm/rev

شکل 4 اثر مقدار پیشروی بر دور در فرار مواد و کیفیت سطح، شرایط آزمون: زوایه حمله 30 درجه و قطر 80 میلی‌متر، نسبت کاهش 16.67% و مقدار پیشروی 0.11 ، 0.2 و 0.32 میلی‌متر بر دور

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

یک دور با افزایش مقدار پیشروی است که باعث می‌شود، مقدار موادی که به سمت پشت غلتک فرار می‌کنند افزایش یابد. این موضوع نیز در "شکل 4" با کاهش طول قطعه کشیده شده در اثر افزایش مقدار پیشروی بر دور نیز نشان داده شده و با نتایج تحقیقات مشابه نیز در تطابق است.

بنابراین افزایش یا کاهش مقدار پیشروی بر دور نقش مهمی در کنترل جریان مواد در فرایند دارد. از آن‌جایی که اثر رزوه‌زنی و فرار مواد با اجرای فرایند طی چند مرحله قابل جبران است، می‌توان با افزایش مقدار پیشروی بر دور عملیات شکل‌دهی را انجام داد. به‌طور کلی با تغییر پارامترهای فرایند همچون نسبت کاهش و مقدار پیشروی بر دور می‌توان صحت فرایند را بدون در نظر گرفتن فرار مواد تضمین نمود، هر چند ممکن است مجبور به استفاده از نسبت کاهش مجاز کمتر و در عوض تکرار فرایند با کاهش‌های پی در پی باشیم.

برای درک بهتر تاثیر پارامترهای فرایند بر روی توسعه عیوب ذکر شده در این مقاله، در کنار بررسی اثرات اصلی پارامترها، اثرات متقابل آن‌ها نیز محاسبه و ارزیابی شدند. شایان ذکر است که این کار با استفاده از نرم افزار مینی تب صورت گرفت.

تحلیل اثر متقابل پارامترهای فرایند بر عیوب نشان داد که اثرات متقابل در بین این دو پارمتر بر میزان انباشتگی قابل توجه است. این اثرات در "شکل 5" قابل مشاهد است. با توجه به این‌که نمودارهای مربوط به درصد کاهش ضخامت‌های 16.7 و 25 درصد کاملا برهم منطبق هستند، ولی نمودار مربوط به کاهش ضخامت 33 درصد دارای شیب متفاوتی است می‌توان این‌گونه بیان کرد که اثر نرخ پیشروی وابسته به میزان درصد کاهش ضخامت است. اگر میزان کاهش ضخامت 16.7 یا 25 باشد، افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش انباشتگی می شود. ولی اگر درصد کاهش ضخامت 33 درصد باشد، اصلا نرخ پیشروی اثری بر میزان انباشتگی ندارد. بنابراین نمودار اثرات متقابل حاوی اطلاعات صحیح‌تر و دقیق‌تری از اثرات اصلی است. تحلیل اثرات متقابل نرخ پیشروی و درصد کاهش ضخامت بر انحراف از قطر نهایی و رشد قطری نشان داد که این اثرات در عیب انحراف از قطر نهایی بسیار کم و در توسعه عیب رشد قطری بی اثر است و بنابراین نمودارهای آن‌ها لزومی برای ارائه در مقاله ندارند تا از طولانی شدن متن مقاله جلوگیری گردد.

3-3- بررسی نیروهای شکل‌دهی و جریان مواد

برای تمام نمونه‌ها نیروی شکل‌دهی اندازه‌گیری شد. در همه آزمون‌ها نیروی شعاعی بیشترین مقدار و نیروی مماسی کمترین مقدار را دارا بودند و تمام منحنی‌های نیرو رفتاری مشابه را از خود نشان دادند. نیروها پس از یک گذر

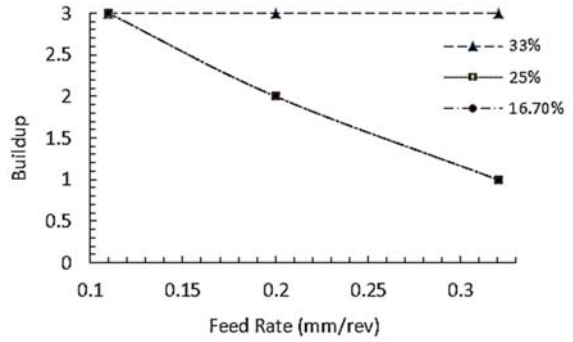

Fig.5 Interaction of process parameters on buildup

شکل 5 اثرات متقابل پارامترهای فرایند بر میزان انباشتگی

کوتاه به یک ناحیه پایدار رسیدند و با نزدیک شدن به انتهای قطعه به‌طور تدریجی کاهش پیدا کردند. علت افزایش تدریجی نیروها در ابتدای فرایند، افزایش تدریجی انباشتگی است. در انتهای فرایند نیز علت کاهش تدریجی نیروها کاهش قیود مواد در انتهای قطعه است. بنابراین برای بررسی و مقایسه کمی نیروها از مقادیر متوسط ناحیه پایدار استفاده می‌شود. یک نمونه منحنی نیروهای اندازه‌گیری شده در "شکل 6" نشان داده شده است. چنانچه دیده می شود ناحیه پایدار در مقایسه با ابتدا و انتهای نمودار بسیار کوتاه است که دلیل آن ساخت نمونه‌ها با حداقل طول موردنیاز که ناحیه پایدار را ایجاد می‌کند است.

همه روابط تحلیلی ارائه شده برای تخمین نیروهای فرایند، جریان‌های ناخواسته در فرایند را در نظر نمی‌گیرند و محاسبه نیروها با فرض اکسترود کامل مواد زیر غلتک است (یعنی جریان مواد به‌صورت ایده‌آل باشد). بنابراین هرچه جریان مواد به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر باشد، نیروهای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تطابق بیشتری دارند. در این تحقیق برای محاسبه نیروها از معادلات هایاما [3] استفاده شده است. این روش بر پایه تحلیل قاچی است که براساس بالانس نیروها به‌دست آمده که در آن تغییر شکل در همه نقاط ماده یکسان در نظر گرفته می‌شود (نوعی حد پایینی برای نیروها ارائه می‌دهد). به‌منظور هم‌خوانی بیشتر نتایج محاسباتی و تجربی، پیشنهاد شده [3] تا در روابط ارائه شده، ضریب اصطکاک مندرل با پیش‌فرم و پیش‌فرم با غلتک برابر با یک در نظر گرفته شود. در ادامه فرمول نهایی محاسبه نیروهای فرایند شکل‌دهی (نیروی شعاعی (p_r)، نیروی محوری (p_z) و نیروی مماسی (p_θ) از این روش در معادلات (3-الف) تا (3-ج) ارائه می‌شود.

$$\frac{p_r}{\sigma_e' t_0\sqrt{D_R v\cot\alpha}} = \frac{p_z}{\sigma_e' t_0\sqrt{D_R v\tan\alpha}} = \frac{p_\theta}{\sigma_e' t_0 v} = k_F \text{ or } k_B \qquad \text{(3-الف)}$$

$$k_F = \left(\frac{\sigma_{z2}}{\sigma_e'}+1\right)\left(1-\frac{t}{t_0}\right) - A\left(1-\frac{t}{t_0}+\frac{t}{t_0}\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \qquad \text{(3-ب)}$$

$$k_B = \left(\frac{\sigma_{z2}}{\sigma_e'}+1\right)\left(1-\frac{t}{t_0}\right) - A\left(1-\frac{t}{t_0}+\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \qquad \text{(3-ج)}$$

در این روابط α زاویه غلتک، D_R قطر غلتک، v نرخ پیشروی، t_0 و t به ترتیب ضخامت اولیه و نهایی لوله تحت تغییر شکل، σ_e' تنش سیلان متوسط کرنش صفحه‌ای، ضریب k برای فرایندهای مستقیم k_F و برای فرایندهای معکوس k_B هستند که در این مقاله با توجه به این‌که از فرایند شکل‌دهی چرخشی نوع مستقیم استفاده شده است، k_F مدنظر می‌باشد. پارامترهای A و دیگر ضرایب در مرجع اصلی [3] قابل مطالعه هستند و به‌علت رعایت اختصار و خارج بودن از موضوع بحث این مقاله از تعریف آن‌ها در این‌جا

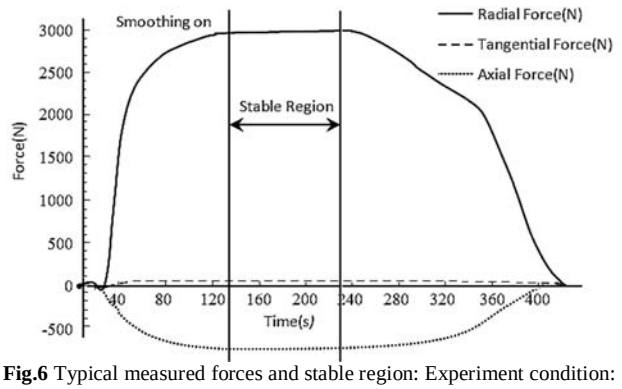

Fig.6 Typical measured forces and stable region: Experiment condition: feed rate 0.2 mm/rev, reduction 25%

شکل 6 نمونه‌ای از نیروهای اندازه‌گیری شده و منطقه پایدار که در آن پیشروی 0.2 میلی‌متر بر دور و نسبت کاهش ضخامت 0.25% است

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

خودداری می‌گردد.

در آزمون‌ها ضخامت پیش‌فرم‌ها t_0 یکسان و معادل 3 میلی‌متر بود. در محاسبه نیروها، از تنش تسلیم میانگین اندازه‌گیری شده معادل 113 مگاپاسکال برای ماده تحت تغییر شکل استفاده شد. بقیه پارامترها برای محاسبه نیروهای فرایند مطابق با جدول 3 می‌باشند که در این جدول t ضخامت نهایی قطعه بعد از شکل‌دهی و t'_0 ضخامت قطعه با در نظر گرفتن انباشتگی است.

جدول 4 نیروهای اندازه‌گیری شده و نیروهای محاسبه شده را در آزمون‌های مختلف نشان می‌دهد. با مقایسه این دو نیرو اختلاف‌های قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود که دلیل آن در نظر نگرفتن شعاع سر غلتک در محاسبات، مناسب نبودن مدل اصطکاکی در نظر گرفته شده برای سطوح تماس ابزار و قطعه‌کار، در نظر نگرفتن تغییر شکل‌های غیریکسان و کار سختی و همچنین در نظر نگرفتن جریان‌های ناخواسته مواد می‌باشد.

در نظر نگرفتن جریان‌های ناخواسته می‌تواند مهمترین دلیل تغییرات اختلاف نیروهای اندازه‌گیری شده و نیروهای محاسبه شده باشد، زیرا محاسبه نیروها با فرض اکسترود کامل مواد زیر غلتک یا جریان ایده‌آل مواد بوده است. همان‌طور که گفته شد، جریان‌های ناخواسته منجربه ایجاد و توسعه عیوب در قطعه و نیز تاثیر روی نیروهای فرایند می‌شوند. بنابراین باید رابطه‌ای میان توسعه عیوب و نیروهای فرایند وجود داشته باشد.

"شکل 7" تغییرات نسبت نیروی شعاعی اندازه‌گیری شده به نیروی شعاعی محاسبه شده با در نظر گرفتن درصد کاهش ضخامت و در مقادیر پیشروی بر دور مختلف را نشان می‌دهد. "شکل 8" نیز همین نسبت تغییرات را برای نیروی محوری نشان می‌دهد.

جدول 3 پارامترهای آزمون‌های مختلف برای محاسبه نیروها به کمک معادلات هایاما

Table 3 Process parameters in calculating the forces by Hayama's equation

F (mm/rev)	t (mm)	t/t_0	$R=1-t/t_0$	R'	t'_0	t/t'_0	A	K_F
0.11	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38
0.2	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38
0.32	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38

جدول 4 نیروهای اندازه گیری شده و نیروهای محاسبه شده برای آزمون‌های مختلف

Table 4 Measured and calculated forces in different experiments

پارامترها		نیروهای اندازه‌گیری شده (N)			نیروهای محاسبه شده (N)		
F (mm/rev)	R (%)	F_{rE}	F_{aE}	F_{tE}	F_{rC}	F_{aC}	F_{tC}
0.11	27	554	959	40	417	1763	17
	42	865	1498	39	803	2525	25
	59	1206	2090	60	1175	3146	33
0.2	49	747	1293	43	434	2148	17
	77	1166	2020	48	802	2975	25
	107	1627	2818	100	1242	3881	33
0.32	79	945	1636	59	419	2430	17
	123	1475	2556	80	823	3417	25
	171	2058	3564	153	1430	4677	33

با بررسی نیروها در حالات مختلف و عیوب بررسی شده در جدول 2 مشاهده می‌شود که نیروهای شعاعی و محوری بیش از انتظار، افزایش انباشتگی را نشان می‌دهند. در واقع افزایش نسبت نیروهای شعاعی و محوری می‌تواند به دلیل افزایش سطح تماس بین غلتک و پیش‌فرم در اثر وقوع انباشتگی در فرایند باشد.

هر چند مقادیر جدول 4 نشان دهنده افزایش نیروهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با مقدار پیشروی بر دور در فرایند است، با مقایسه نمودارهای "شکل 7" و "شکل 8" ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار پیشروی بر دور مقدار نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به هم نزدیک می‌شوند. علت آن، کاهش تمایل به انباشتگی و در نتیجه کاهش سطح تماس ابزار و قطعه کار با افزایش مقدار پیشروی بر دور است. با افزایش مقدار پیشروی بر دور تمایل مواد به فرار به سمت پشت غلتک بیشتر می‌شود که موجب کاهش نسبت نیروهای محوری می گردد. در این حالت دو نیروی محوری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از هم دور می‌شوند. این موضوع در نمودارهای "شکل 8" به وضوح قابل مشاهده است.

بررسی مقادیر نیروهای محوری در جدول 4 نشان می‌دهد که نیروهای محوری اندازه‌گیری شده از نیروهای محوری محاسبه شده کمتر است و میزان افزایش نیروهای اندازه‌گیری شده با افزایش مقدار پیشروی بر دور نسبت به میزان افزایش نیروهای محاسبه شده کمتر است که تاثیر آن در نمودارهای "شکل 8" مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد علت آن کاهش انباشتگی و افزایش فرار ماده به پشت غلتک با افزایش پیشروی بر دور است.

بررسی مقادیر جدول 4 نشان می‌دهد که افزایش نسبت کاهش نیز موجب افزایش نیروهای اندازه‌گیری و محاسبه شده فرایند می‌شود. ولی میزان این افزایش در نیروهای شعاعی محاسبه شده بیشتر از میزان افزایش در نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده است. در مورد نیروهای محوری نیز با افزایش نسبت کاهش ضخامت افزایش این نیروها مشاهده می شود. اما میزان این افزایش در نیروهای محوری محاسبه شده بیشتر از میزان افزایش در نیروهای محوری اندازه‌گیری شده است. به عبارت دیگر در اثر افزایش نسبت کاهش، نیروهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به هم نزدیک می‌شوند. علت این موضوع کاهش میزان انباشتگی به‌دلیل تسریع تمایل به تشکیل براده است که در "شکل 3" نیز قابل مشاهده است که منجر به عدم افزایش

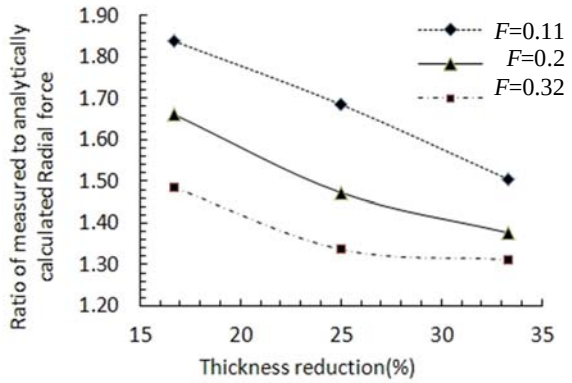

Fig. 7 Ratio of radial forces vs. thickness reduction in different feed rate

شکل 7 تغییرات نسبت نیروی شعاعی در مقابل درصد کاهش ضخامت در مقادیر پیشروی مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

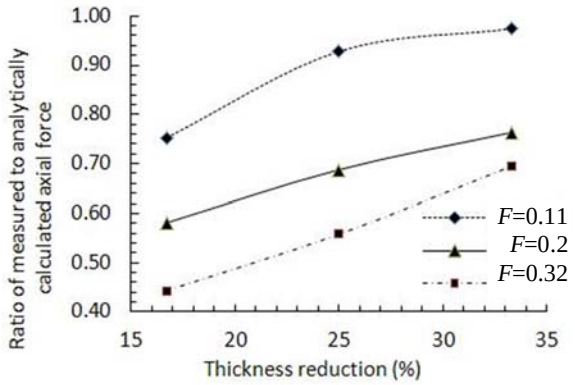

Fig. 8 Ratio of axial forces vs. thickness reduction in different feed rate

شکل 8 تغییرات نسبت نیروی محوری در مقابل درصد کاهش ضخامت در مقادیر پیشروی مختلف

سطح تماس ابزار و قطعه کار می‌شود. به همین دلیل نسبت نیروها که در "شکل 7" و "شکل 8" نشان داده شده با افزایش نسبت کاهش ضخامت به یک نزدیک می‌شوند.

در کلیه شرایط مقدار اکثر نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده بیش از نیروهای شعاعی محاسبه شده می‌باشند و مقدار نیروهای محوری اندازه‌گیری شده کمتر از نیروهای محوری محاسبه شده می‌باشند. بنابراین باید توجه داشت که نیروهای شکل‌دهی مستقیما" فقط تابعی از پارامترهای فرایند نیستند، بلکه به‌طور غیرمستقیم از میزان انباشتگی، فرار مواد و رشد قطری به‌عنوان تابعی از پارامترهای ابزار و فرایند تبعیت می‌کنند. عکس این موضوع نیز صادق است. هر عاملی که موجب تغییر نیروها از مقدار ایده‌آل شود، می‌تواند عاملی برای تغییر جریان مواد باشد. یعنی جریان مواد و نیروها اثر متقابل روی یکدیگر دارند. البته می‌توان گفت که در تحقیق حاضر با ثابت نگاه داشتن کلیه پارامترها و تغییر فقط یک پارامتر نتایج معناداری برای آن پارامتر بدست آمده و اثرات متقابل به حداقل رسیده است.

4- پیشنهادات

در این تحقیق از بررسی پارامترهای هندسی ابزار بر جریان مواد، نیروها و توسعه عیوب صرف نظر شده است. با توجه به اثر مهم پارامترهای ابزار پیشنهاد می‌گردد در آینده ادامه تحقیقات بر نحوه تاثیر پارامترهای ابزار بر شکل‌دهی این آلیاژ متمرکز گردد و شرایط بهینه و حداکثر قابلیت اسپینیگ با ابزارهایی با زاویه حمله‌ها و قطرهای مختلف ابزار بررسی گردد.

5- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر پارامترهای فرایند بر روی نحوه توسعه عیوب و نیروهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله بررسی شدند. آزمون‌هایی به‌منظور تحلیل جریان مواد در شکل‌دهی چرخشی آلیاژ آلومینیوم 6061 انجام شدند. مهمترین پارامترهای فرایند شامل نسبت کاهش ضخامت در 3 سطح و مقدار پیشروی بر دور در 3 سطح بررسی شدند. حالت‌های مختلف جریان مواد تحلیل شد و براساس معیارهای کیفیت قطعات در خصوص عوامل تاثیرگذار بر خروج جریان مواد از جریان ایده‌ال مواد و نیروهای فرایند بحث شد. نتایج بررسی نحوه تغییر شکل قطعات نشان می‌دهد که در شکل‌دهی این آلیاژ، عیوبی مثل انباشتگی و رشد قطری را با استفاده از نسبت کاهش ضخامت و مقدار پیشروی بر دور مناسب می‌توان کنترل نمود. به طور کلی می‌توان نتایج زیر را برای تحلیل بیشتر فرایند ارائه داد:

- افزایش درصد کاهش ضخامت، نیروهای شکل‌دهی را افزایش می‌دهد و موجب انباشتگی شدید و پارگی سطح قطعه در زوایه حمله 30 درجه در پیشروی‌های پایین می‌شود که دلیل آن برش داخلی مواد در زاویه حمله‌ای کوچکتر از زاویه حمله ابزار ذکر شد.
- مطالعه پارامتر پیشروی بر دور نشان داد، که افزایش مقدار پیشروی از 0.11 میلی‌متر به 0.2 و سپس 0.32 بر دور نیروهای فرایند را افزایش می‌دهد و همچنین به دلیل فرار مواد موجب کاهش دقت ابعادی در قطر خارجی می‌شود.
- افزایش مقدار پیشروی بر دور با ابزار استفاده شده (زاویه حمله 30 درجه) می‌تواند به جلوگیری از انباشتگی شدید کمک کند و موجب محو شدن ترک‌های سطحی شود. ولی موجب کاهش دقت ابعادی و مشهود شدن آثار رزوه‌زنی در سطح خارجی قطعه می‌شود.
- همچنین نتیجه مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده فرایند با نیروهای محاسباتی تئوری هایاما نشان داد که در کلیه شرایط مقدار نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده بیش از نیروهای شعاعی محاسبه شده می‌باشند و مقدار نیروهای محوری اندازه‌گیری شده کمتر از نیروهای محوری محاسبه شده می‌باشند.
- افزایش درصد کاهش ضخامت و افزایش مقدار پیشروی غلتک بر دور، نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده و محاسباتی را به هم نزدیک می‌نمایند.
- افزایش درصد کاهش ضخامت و کاهش مقدار پیشروی غلتک بر دور، نیروهای محوری اندازه‌گیری شده و محاسباتی را به هم نزدیک می‌نماید.

6- مراجع

[1] S. Kalpakcioglu, A Study of Shear-Spin Ability of Metals, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 83, No. 4, pp. 478-483, 1961.

[2] S. Kobayashi, E. G. Thomsen, Theory of Spin Forging, *CIRP Annals*, Vol. 10, No.2, pp. 114-123, 1962.

[3] M. Hayama, Theoretical Study of Tupe Spinning, *Bulletin of the Faculty of Engineering , Yokohama National University*, Vol. 15, No.3, pp. 33-48, 1966.

[4] M. Hayama, H. Kudo, Analysis of Diametrical Growth and Working Forces in Tube Spinning, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*,Vol. 22, No. 167, pp. 776-784, 1979.

[5] R. P. Singhal, P. K. Saxena, R. Prakash, Estimation of Power in the Shear Spinning of Long Tubes in Hard-to-Work Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 29-40, 1990.

[6] J. W. Park, Y. H. Kim, W. B. Bae, Analysis of Tube-Spinning Processes by the Upper-Bound Stream-Function Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 66, No. 3, pp. 195-203, 1997.

[7] Y. Xu, S. H. Zhang, P.Li, K. Yang, D. B. Shan, Y. Lu, 3d Rigid–Plastic Fem Numerical Simulation on Tube Spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 3, pp. 710-713, 2001.

[8] M. H. Parsa, A. M. A. Pazooki, M. Nili, Flow-forming and flow formability simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 5, pp. 463-473, 2009.

[9] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2, pp. 389-395, 2010.

[10] H. Zoghi, A. F. Arezoodar, M. Sayeaftabi, Enhanced finite element analysis of material deformation and strain distribution in spinning of 42CrMo steel tubes at elevated temperature, *Materials and Design*, Vol. 47, No. 5, pp. 234-242, 2013.

[11] R. Prakash, R. P. Singhal, Shear Spinning Technology for Manufacture of Long Thin Wall Tubes of Small Bore, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, No.4, pp. 186-192, 1995.

[12] S. C. Chang, C. A. Huang, S. Y. Yu, Y. Chang, W. C. Han, T. S. Shieh, H. C. Chung, H. T. Yao, G. D. Shyu, H. Y. Hou, C. C. Wang, W. S. Wang, Tube Spinnability of AA 2024 and 7075 Aluminum Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, No.1, pp. 676-682, 1998.

[13] K. M. Rajan, K. Narasimhan, An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes, *Practical Failure Analysis*, Vol. 1, No. 5, pp. 69-76, 2001.

[14] A. R. Fazeli, M. Ghoreishi, Investigation of effective parameters on surface roughness in thermomechanical tube spinning process, *International Journal*

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]

of Material Forming, Vol. 2, No. 4, pp. 261-270, 2009.

[15] Z. H. Song, W. M. Le, S. C. Chen, W. B. Gu, X. M. Qian, Real time defects detection in flow forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 365-370, 1992.

[16] J. Yao, M. Murata, An experimental study on paraxial spinning of one tube end, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 66, pp 1-6, 2002.

[17] X. S. Wang, Z. L. Hu, S. J. Yuan, L. Hua, Influence of tube spinning on formability of friction stir welded Aluminum alloy tubes for hydroforming application, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 607, No. 23, pp. 245-252, 2014.

[18] S. Ekinovic, H. Đukic, I. Plancic, E. Begovic, Assessment of the surface topography of Al 99.5% tubular products formed by cold flow forming technology, *Procedia Engineering*, Vol. 132, No.12, pp. 389-396, 2015.

[19] M. Srinivasulu1, M. Komaraiah, C. S. Krishna Prasada Rao, Prediction of the surface roughness of AA6082 flow-formed tubes by design of experiments, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 1835-1842, 2013.

[20] D. Tsivoulas, J. Quinta da Fonseca, M. Tuffs, M. Preuss, Effects of flow forming parameters on the development of residual stresses in Cr–Mo–V steel tubes, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 624, No. 29, pp. 193-202, 2015.

[21] H. N. Nagarajan, H. Kotrappa, C. Mallanna, V. C. Venkatesh, Mechanics of Flow Forming, *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Vol. 30, No.1, pp. 159-162, 1981.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.31.6]