مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 287-297

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی جایگزینی فشار سیال داخلی به‌جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله‌های جدارنازک با شعاع خم بحرانی

جابر سلیمانی[1]، مجید الیاسی[2*]، مرتضی حسین‌زاده[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت‌الله آملی، آمل

* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 اردیبهشت 1395

پذیرش: 22 مرداد 1395

ارائه در سایت: 03 مهر 1395

کلید واژگان:

خم‌کاری کششی دورانی

مندرل

فشار سیال داخلی

شبیه‌سازی المان محدود

چکیده

امروزه خم‌کاری لوله‌های جدارنازک ($D/t\geq20$، Dقطر خارجی لوله و t ضخامت لوله) در نسبت خم بحرانی ($R/D\leq2$، R شعاع خم) از جمله فرآیندهای تولیدی پرکاربرد در صنعت هوافضا، خودروسازی و صنایع دیگر است. طی خم‌کاری لوله، تغییرات ضخامت و اعوجاج سطح مقطع قابل توجهی رخ می‌دهد. ضخامت در انحنای داخلی لوله خمیده افزایش و در انحنای خارجی کاهش می‌یابد. همچنین در اکثر موارد، وقتی شعاع خم کوچک باشد، چین‌خوردگی در انحنای داخلی اتفاق می‌افتد. در صنعت برای رفع چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع از مندرل استفاده می‌شود، که انتخاب مندرل به جنس لوله، زاویه خم، شعاع لوله و شعاع خم بستگی دارد. اما، در مواردی که شعاع قالب خم کوچک باشد، استفاده از مندرل اجتناب می‌شود زیرا مندرل، علاوه بر هزینه فرآیند، نازک‌شدگی دیواره لوله را در انحنای خارجی افزایش می‌دهد و این در عملیات تولید نامطلوب است. در پژوهش حاضر با توجه به توسعه هیدروفرمینگ لوله‌ها، اثر فشار سیال داخلی به‌جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، بمنظور امکان‌سنجی، مشاهده و آنالیز نحوه شکل‌گیری لوله طی فرآیند خم‌کاری، فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با دو راهبرد با مندرل و فشار سیال داخلی به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده از پژوهش ارایه شده نشان داد، جاگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی، حداکثر نازک‌شدگی دیواره لوله را در انحنای خارجی به میزان چشمگیری بهبود می‌بخشد. اما حداکثر اعوجاج سطح مقطع و حداکثر ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی، نسبت به حالت با مندرل افزایش می‌یابد.

Embedding of internal fluid pressure investigation in mandrel through tube rotary draw bending of thin-walled tubes with critical bend radius

Jaber Soleimani[1], Majid Elyasi[1*], Morteza Hoseinzadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Mazandaran, Iran

* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 May 2016
Accepted 12 August 2016
Available Online 24 September 2016

Keywords:
Rotary draw bending
Mandrel
Internal fluid pressure
Finite element simulation

ABSTRACT

Nowadays, thin-walled tube bending ($D/t\geq20$, D-tube diameter and t-tube thickness) in the critical bend ratio ($R/D\leq2$, R bend radius) is a widely used manufacturing process in the aerospace industry, automotive, and other industries. During tube bending, considerable cross-sectional distortion and thickness variation occurs. The thickness increases at the intrados and reduces at the extrados. Also, in some cases, when the bend die radius is small, wrinkling occurs at the intrados. In industry, the mandrel is used to eliminate wrinkling and reduce cross-sectional distortion, the choice of the mandrel depends on tube material, bending angle, radius tube and bending radius. However, in the case of a close bend die radius, using the mandrel is avoided. Because in addition to the cost of the process, with the mandrel the thinning of the wall increases at the extrados and this is undesirable in the manufacturing operation. So, in the present study, with regard to development of tube hydroforming, internal fluid pressure is used instead of the mandrel. Therefore, the purpose of the feasibility study, observation and analysis of the formation of tube bending process, the tube rotary draw bending process with two of the mandrels and the internal fluid pressure is simulated by software ABAQUS.

1- مقدمه

امروزه خم‌کاری لوله‌های جدار نازک کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع پیشرفته نظیر هواپیماسازی، هوافضا، کشتی‌سازی، اتومبیل، انرژی و پزشکی پیدا کرده است، مساله کاهش وزن و کاهش فضای اشغال شده توسط لوله‌ها

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

J. Soleimani, M. Elyasi, M. Hoseinzadeh, Embedding of internal fluid pressure investigation in mandrel through tube rotary draw bending of thin-walled tubes with critical bend radius, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 287-297, 2016 (in Persian)

سبب شده است تا این قطعات، با شعاع خم کوچک شکل‌دهی شوند. خم‌کاری لوله با شعاع خم کوچک نیازمند به‌کارگیری روش‌های نوین خم‌کاری می‌باشد.، زیرا با کاهش شعاع خم‌کاری امکان ایجاد عیوب چین‌خوردگی در شعاع داخلی خم، نازک‌شدگی بیش از حد دیواره خارجی لوله، تغییرشکل سطح مقطع و مانند آن‌ها افزایش می‌یابد.

درمیان انواع روش‌های جدیدی که جهت تولید خم مطلوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، خم‌کاری کششی دورانی به‌عنوان معمول‌ترین و تحت کنترل‌ترین روش خم‌کاری لوله شناخته شده است به‌طوری‌که امروزه حدود 95% عملیات خم‌کاری لوله‌ها با این روش انجام می‌شود. این روش در مقایسه با سایر روش‌های خم‌کاری لوله‌ها دارای مزایایی مانند سرعت تولید بالا، دقت خوب، تولید خم با کیفیت مناسب، امکان کنترل جریان ماده در ناحیه خم، امکان ایجاد خم‌های متوالی در زوایای مختلف روی یک شاخه لوله و در نتیجه کاهش ضایعات و کاهش هزینه باتوجه به کاهش نیروی‌کار، تجهیزات و مصرف انرژی است [1].

"شکل 1" ابزارهای استفاده شده در خم‌کاری کششی دورانی را نشان می‌دهد [2]. اجزای قالب خم‌کاری در این فرآیند، عبارتند از: قالب خم[1] که شعاع آن، شعاع خم‌کاری محسوب می‌شود و گشتاور خمشی از این قطعه به لوله وارد می‌شود. قالب نگهدارنده[2] همواره لوله را روی قالب خم، فشرده نگه‌داشته و لوله توسط آن در حین خم‌کاری مهار می‌شود. قالب فشار[3] از چرخش لوله به همراه قالب خم جلوگیری می‌کند و لوله را در مقابل گشتاوری که قالب خم به لوله وارد می‌کند نگه می‌دارد. همچنین با ایجاد یک نیروی فشاری کافی در برابر قالب جاروب‌کن از چروکیدگی لوله جلوگیری می‌کند. قالب فشار می‌تواند ثابت یا متحرک باشد و در صورت متحرک بودن، به جریان ماده به داخل منطقه خم‌کاری کمک می‌کند و باعث کاهش درجه نازک‌شدگی شعاع بیرونی خم می‌شود. قالب جاروب‌کن[4] برای جلوگیری از چروکیدگی قسمت داخلی خم در مواقعی که شعاع خم کوچک باشد استفاده می‌گردد. مندرل[5] برای جلوگیری از چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع بکار برده می‌شود. البته در استفاده از مندرل باید در حد امکان پرهیز کرد زیرا هزینه تولید را افزایش می‌دهد. مندرل یک عامل حمایت کننده از داخل لوله است که معمولا به صورت ثابت و مفصلی ساخته می‌شود. همچنین از مواد نرم مانند سرب، قیر، فشار روغن نیز می‌توان به‌عنوان مندرل استفاده کرد. در روش خم‌کاری کششی دورانی، ابتدا لوله از یک انتها توسط قالب نگهدارنده و قالب خم مهار می‌شود. سپس با چرخش همزمان قالب خم و قالب نگهدارنده، لوله در امتداد قالب فشار و روی شیار قالب خم کشیده می‌شود. چرخش قالب دورانی به اندازه‌ای است که زاویه خم موردنظر روی لوله ایجاد شود. در مرحله بعد توسط یک بازویی، مندرل از درون لوله خارج می‌شود. اکنون قالب‌ها از لوله جدا شده و لوله باربرداری می‌شود.

برای هر فرآیند خم‌کاری، با شروع تغییرشکل، توزیع تنش فشاری و کششی به ترتیب در شعاع داخلی و خارجی لوله ایجاد شده که باعث عیوب متعددی مانند چین‌خوردگی، نازک‌شدگی بیش از حد (شکست)، اعوجاج سطح مقطع، برگشت فنری و غیره می‌شود (شکل 2) [3]. پیش‌بینی درست پدیده‌های فیزیکی و کنترل موثر بر متغیرهای فرآیند خم‌کاری از مسایل اساسی در زمینه خم‌کاری است [4]. طی فرآیند خم‌کاری می‌توان از عیوب

[1] Bend die
[2] Clamp die
[3] Pressure die
[4] Wiper die
[5] Mandrel

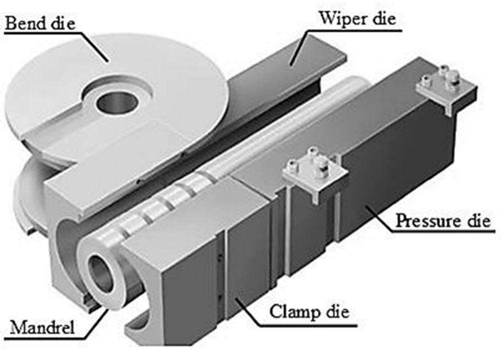


Fig. 1 The main components of rotary draw bending die [2]
شکل 1 اجزای اصلی قالب خم‌کاری کششی دورانی [2]

چروکیدگی جلوگیری کرد، اما عدم گردی سطح مقطع و نازک‌شدگی دیواره ناچارا پدیدار خواهند شد [5]. هر چه مقطع لوله‌ی خم‌کاری شده به حالت دایروی نزدیک‌تر باشد، مقاومت آن در برابر فشارهای داخلی، بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، نازک‌شدگی در قوس بیرونی باعث تضعیف استحکام لوله می‌شود [6].

در گذشته، محققان روی مسئله اعوجاج سطح مقطع، تغییرات ضخامت دیواره و چروکیدگی در فرآیند خم‌کاری لوله‌ها تحقیقاتی انجام داده‌اند. ژان و همکاران [7] فرآیند خم‌کاری کنترل عددی لوله را برای لوله‌های جدار نازک شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش زاویه خم، نسبت حداکثر نازک‌شدن دیواره در انحنای خارجی اندکی افزایش داشته، اما نسبت حداکثر ضخیم‌شدن دیواره در انحنای داخلی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

یانگ و ژئو [8] با شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی به این نتیجه رسیدند که در مورد خم با مندرل، مقطع لوله به حالت دایروی نزدیک باقی می‌ماند، اما کاهش ضخامت در انحنای بیرونی می‌تواند قابل‌توجه باشد.

هنگ و همکاران [9] اثر پارامترهای مندرل را بر کیفیت خم‌کاری لوله جدار نازک به روش کنترل عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند با افزایش قطر مندرل تنش‌های فشاری و کششی مماسی به یکدیگر نزدیک می‌شوند و چروکیدگی در فرآیند خم‌کاری کنترل عددی لوله، متاثر از تنش‌های فشاری دو محوره (مماسی و حلقوی) است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند هرچه قطر مندرل بزرگتر باشد، تمایل به چروک در نمونه کمتر می‌شود. آن پژوهشگران تأثیر تعداد 0، 1، 2 و 3 ساچمه در فرآیند خم‌کاری را مورد مقایسه قرار دادند و مشاهده کردند، چروکیدگی لوله با تعداد ساچمه 0 و 1 رخ می‌دهد، درحالی‌که چروک در فرآیند خم‌کاری با 2 و 3 ساچمه از بین می‌رود. همچنین میزان عدم دایروی بودن سطح مقطع با افزایش تعداد ساچمه‌ها کاهش می‌یابد.

لی و همکاران [10] در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با شعاع خم‌کاری کوچک، قالب فشاری و تقویت کننده را به‌عنوان نیروی هل دهنده‌ی محوری به لوله، برای کنترل جزء به جزء جریان ماده در ناحیه خم به‌کار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد، برای بهبود قابلیت خم‌کاری لوله به‌طور موثرتر، ابزار فشارنده شامل قالب فشاری متحرک و تقویت‌کننده بصورت مطابقت همزمان می‌تواند به‌عنوان بارگذاری فشارنده کمکی برای خم‌کاری کششی دورانی لوله جدار نازک به‌کار برده شود.

وانگ و آگاروال [11] غیردایروی بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامت دیواره لوله را در فرآیند خم‌کاری هیدرولیکی، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به‌صورت تحلیلی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار

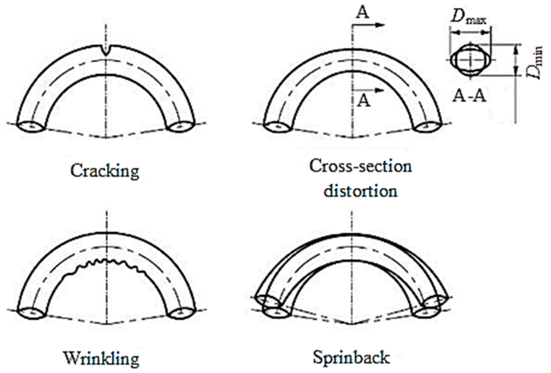


Fig. 2 Multiple defects or instabilities in tube bending [3]

شکل 2 عیوب یا ناپایداری‌های متعدد در خم لوله [3]

دادند. آن‌ها دریافتند که با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیردایروی بودن سطح مقطع و چروکیدگی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد.

لازارسکو [12] تاثیر فشار سیال داخلی بر کیفیت خم‌کاری لوله آلومینیمی را در خم‌کاری کششی دورانی مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با افزایش فشار داخلی، عدم گردی سطح مقطع و ضخیم‌شدگی انحنای درونی خم، کاهش یافته و درصد نازک‌شدگی دیواره لوله در انحنای بیرونی خم افزایش می‌یابد.

منتظری و همکاران [13] با بیان این‌که وقتی نسبت شعاع خم به قطر لوله (R/D) کوچک می‌شود، نمی‌توان با روش‌های معمول در فرایند خم‌کاری، خم‌کاری لوله را بدون عیب انجام داد، یک روش جدید برای خم‌کاری فشاری لوله ارایه کردند.

یافته‌های مهم متعددی که در تحقیقات قبلی در زمینه خم‌کاری لوله‌ها به‌دست آمده است انگیزه پژوهش حاضر شد تا با توجه به این‌که در دهه‌های اخیر، هیدروفرمینگ لوله‌ها به‌عنوان یک تکنولوژی جدید در تولید قطعات شناخته شده است از فشار سیال داخلی به‌جای مندرل در خم‌کاری کششی دورانی استفاده شود، زیرا ایجاد فشار سیال درون لوله، باعث به وجود آمدن تماس بهتر قالب با لوله در مقایسه با استفاده از مندرل می‌شود. همچنین افزایش جریان پلاستیک ماده به سبب نبودن اصطکاک بین لوله و سیال را در پی دارد. در این پژوهش با توجه به پیشرفت نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، به‌منظور امکان‌سنجی و مشاهده و آنالیز نحوه شکل‌گیری لوله طی فرآیند خم‌کاری، فرآیند خم‌کاری لوله با دو راهبرد با مندرل و فشار سیال داخلی به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری با مندرل در نسبت‌های خم متفاوت بیان شده و در ادامه با جاگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی، نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی و مقایسه آن با حالت با مندرل مورد بررسی قرار گرفته است.

2- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این قسمت، نحوه شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با دو راهبرد با مندرل و به همراه فشار سیال داخلی بیان شده است. در پژوهش حاضر، مطابق با نحوه عملکرد اجزای مختلف دستگاه خم‌کاری کششی دورانی، از نرم‌افزار آباکوس نسخه 6.14-2[1] برای شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری لوله استفاده شده است.

2-1- مراحل مدل‌سازی با مندرل

مدل‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با مندرل، مطابق با شرایط آزمایش‌های لی و همکاران [14] انجام گرفته است. لی و همکاران، لوله از جنس آلومینیوم 5052O با شعاع 50 میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر را در شعاع خم‌کاری 100 میلی‌متر با موفقیت خم نمودند. جدول 1 پارامترهای شکل‌دهی خم‌کاری لوله توسط لی و همکاران را نشان می‌دهد.

در این پژوهش به‌دلیل تقارن، فقط نیمی از هندسه اجزای قالب و قطعه‌کار در نرم‌افزار مدل شده است. لوله به صورت سه‌بعدی پوسته‌ای[2] و شکل‌پذیر[3] و سایر اجزای قالب به صورت پوسته‌ای صلب و گسسته[4] در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. "شکل 3" مدل خم‌کاری لوله 50×1×100 (D×t×R)، D- قطر لوله، t- ضخامت دیواره و R- شعاع خم‌کاری) را نشان می‌دهد.

خصوصیات لوله شامل منحنی تنش-کرنش حقیقی، ضریب پواسون، مدول الاستیک، چگالی و ضریب ناهمسانگردی در جدول 2 بیان گردیده است. برای بیان رفتار ماده طی شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری، جنس لوله یک ماده الاستو-پلاستیک با کرنش سختی ناهمسانگرد فرض شده است. برای توصیف این رفتار، از معادله کرنش سخت $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ و تابع تسلیم هیل[5] با ضریب ناهمسانگردی 0.55 استفاده شده است.

"شکل 4" چگونگی استقرار مجموعه قالب را نشان می‌دهد. در این پژوهش انجام شبیه‌سازی فرآیند در یک گام تنظیم گردیده است. با توجه به نوع فرآیند که در حالت سرد انجام شده است و تغییر شکل ماده زیاد است، از گزینه حل صریح دینامیکی[6] استفاده شد. چون شکل‌دهی سرد مستقل از زمان است، برای کاهش زمان محاسبات، مطابق مرجع [14] زمان شکل دهی 1.964 ثانیه در نظر گرفته شد. همواره دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی داخلی شکل‌دهی تجاوز نکند تا آن‌که طبیعت شبه استاتیکی مساله حفظ شود. در قسمت تعیین داده‌های خروجی، تنش، کرنش و تغییرات ضخامت به عنوان پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده است.

جدول 1 شرایط تجربی خم‌کاری لوله جنس Al-5052O با ابعاد 50×1×100 توسط لی و همکاران [14]

Table1 Experimental conditions for Al-5052O tube bending with 50×1×1000 by Lee et al [14]

پارامتر	مقدار
قطر دنباله مندرل (mm)	47.6
قطر ساچمه مندرل (mm)	47.6
طول پیش‌آمدگی مندرل از نقطه مماس e (mm)	6
تعداد ساچمه‌های مندرل	3
ضخامت ساچمه k (mm)	20
گام بین ساچمه‌ها p (mm)	21
سرعت خم‌کاری v (rad/s)	0.8
سرعت قالب فشار v_p (mm/s)	0.08
زاویه خم‌کاری θ (rad)	π/2

[1] Abaqus 6.14-2

[2] Shell
[3] 3D deformable
[4] 3D discrete rigid
[5] Hill yield function
[6] Dynamic Explicit

مشخصات تماس به‌کار رفته در این پژوهش شامل تماس مستقیم فلز با فلز است. برای تعریف تماس‌های جفت سطوح قالب خم/ لوله، قالب فشار/ لوله، قالب نگهدارنده/ لوله و قالب جارب‌کن/ لوله از تماس سطح به سطح[1] و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی[2] استفاده شده است. اما برای تعریف تماس سطح مندرل/ لوله از تماس سطح به سطح و نوع قید پنالتی[3] استفاده شده است. همچنین به منظور تعریف سطوح، در تمام موارد سطح قالب به عنوان سطح پایه و سطح لوله به عنوان سطح پیرو انتخاب شدند.

در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس، برای سطوح قالب خم/ لوله، قالب فشار/ لوله، قالب جارب‌کن/ لوله و مندرل/ لوله از مدل اصطکاکی کلمب[4] و شرایط تماسی پنالتی استفاده شده است. اما در تعریف مشخصات

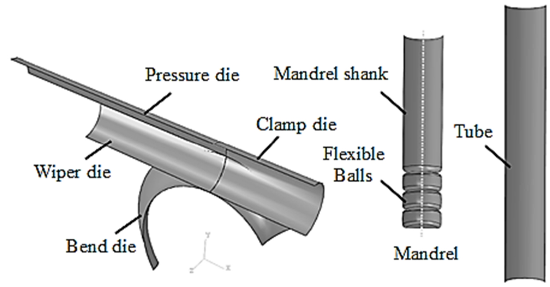


Fig. 3 Geometry of die components and tube simulation in software

شکل 3 هندسه اجزای قالب و لوله شبیه سازی شده در نرم‌افزار

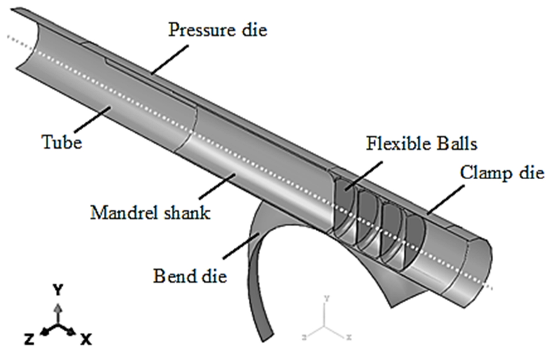


Fig. 4 Assembly dies components and tube in simulation

شکل 4 مونتاژ اجزای قالب و لوله در شبیه‌سازی

جدول 2 خواص مکانیکی لوله جدارنازک جنس Al-5052O [14]

Table2 Mechanical properties of the tube materials [14]

پارامتر	مقدار
استحکام کشش نهایی UTS (MPa)	206
تنش تسلیم اولیه σ_y (MPa)	88
ازدیاد طول (%)	21.8
نمای کرنش سختی n	0.25
ضریب استحکام K(MPa)	431
مدول یانگ E (GPa)	56
ضریب پواسون v	0.34
چگالی ρ(kg/m3)	2700
ضریب لانکفورد (ضریب ناهمسانگردی نرمال)	0.55

[1] Surface to surface
[2] Kinematic Contact method
[3] Penalty
[4] Coulomb

تماسی سطح قالب نگهدارنده/ لوله، چون در عمل برای جلوگیری از لغزش لوله، سطح قالب نگهدارنده شیادار است و توسط نیروی هیدرولیکی، لوله روی قالب خم محکم می‌شود از مدل خشن[5] استفاده شد.

ضرایب اصطکاک برای تماس بین اجزای قالب با سطح لوله از مرجع [14] و مطابق با جدول 3 تعریف شده است. همچنین برای تعریف رفتار تماسی بین دنباله مندرل با ساچمه‌های مندرل، از قسمت اتصال دهنده[6] استفاده شد. "شکل 5" موضع قرارگیری و نحوه اتصال مندرل و ساچمه‌ها را با یکدیگر نشان می‌دهد، که نقطه مماس؛ نقطه شروع تغییر شکل لوله، e؛ طول پیش‌آمدگی مندرل از نقطه مماس، k ضخامت ساچمه‌ها و p گام بین ساچمه‌ها است. اندازه این پارامترهای در جدول 1 آورده شده است.

در این پژوهش با توجه به کیفیت حرکت قالب‌ها، به سه دسته قید تقسیم می‌شود. نوع اول، قید مربوط به تقارن است که به لبه لوله اعمال می‌شود. نوع دوم قید جابجایی است که برای محدود کردن حرکت قطعات، به قالب جاروب‌کن و مندرل اعمال می‌شود. نوع سوم قید سرعت است که برای حرکت قالب خم و قالب فشاری استفاده شده است. قالب خم با سرعت دورانی 0.8 رادیان بر ثانیه حول محور Z (شکل 4) می‌چرخد و قالب فشار برحسب شعاع خم و همزمان با قالب خم، در راستای محور x حرکت خطی دارد. قیدهای استفاده شده برای قالب‌ها، به نقطه مرجع آنها اعمال می‌شود.

با توجه به این‌که لوله تحت تغییرشکل، به صورت پوسته‌ای مدل شده است المان به‌کار رفته در مدل لوله از نوع S4R است که یک المان چهار گره‌ای می‌باشد. المان به‌کار رفته در مدل قالب‌ها که به‌صورت پوسته‌ای صلب و گسسته مدل شده‌اند، از المان چهار گره‌ای R3D4 استفاده شده است. برای به‌دست آوردن ابعاد و تعداد المان‌ها، مدل‌هایی با عدد دانه‌بندی مختلف شبیه‌سازی شده است. برای به‌دست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از همگرایی کرنش در انحنای بیرونی لوله خمیده استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج مقدار 0.004 برای عدد دانه‌بندی لوله و مندرل و مقدار 0.006 برای عدد

جدول 3 شرایط اصطکاکی در سطوح تماسی مختلف [14]

Table3 Friction conditions at various contact interfaces [14]

سطح تماس	ضریب اصطکاک
قالب جاروب‌کن - سطح خارجی لوله	0.05
قالب فشار - سطح خارجی لوله	0.25
قالب نگهدارنده - سطح خارجی لوله	0.6 (یا "خشن")
قالب خم - سطح خارجی لوله	0.1
مندرل – سطح داخلی لوله	0.05

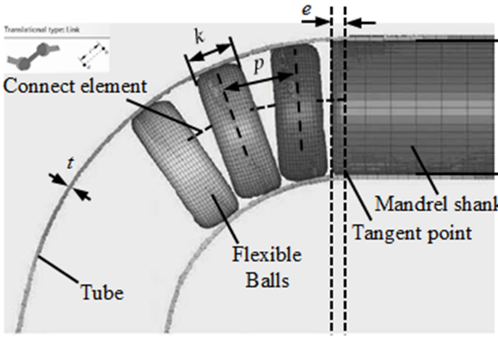


Fig. 5 How to connect the mandrel and balls [14]

شکل 5 نحوه اتصال مندرل و ساچمه‌ها [14]

[5] Rough
[6] Connector section

دانه‌بندی قالب خم، قالب فشار، قالب نگهدارنده و قالب جاروب‌کن انتخاب شده است.

2-2- مراحل مدل‌سازی به همراه فشار سیال داخلی

مراحل مدل‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی به همراه فشار سیال داخلی مشابه با مراحل مدل‌سازی با مندرل است با این تفاوت که در این مدل، به جای مندرل در محیط بار از فشار یکنواخت استفاده شده است.

3- پارامترهای سنجش کیفیت لوله‌های خم‌کاری شده

پس از فرآیند خم‌کاری لوله، نیاز است تا صحت و دقت فرآیند با معیارهایی سنجیده شود، بنابراین در ادامه، معیارهای ارزیابی یا کنترل کیفیت یک لوله خم‌کاری شده بیان گردیده است.

با توجه به تحقیقات قبلی منتشر شده در زمینه خم‌کاری لوله، "شکل 6" ناحیه‌های بحرانی لوله را در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی نشان می‌دهد، این ناحیه‌ها شامل ناحیه‌هایی است که در اثر کاهش ضخامت در لوله پارگی رخ می‌دهد، یا در اثر افزایش ضخامت در آن چروک ایجاد می‌شود، همچنین اعوجاج سطح مقطع لوله از جمله مسایل اساسی در زمینه خم‌کاری می‌باشد.

به‌منظور ارزیابی مقدار تغییرشکل نامطلوب سطح مقطع لوله‌های خم‌کاری شده، پارامتر عدم دایروی بودن سطح مقطع (اعوجاج سطح مقطع) تعریف شده است. این فاکتور با ψ نشان داده شده و از رابطه (1) پیروی می‌کند:

$$\psi = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{r_0} \times 100 \qquad (1)$$

که r_0 شعاع اولیه لوله، $r_{\max}$ شعاع بزرگتر و $r_{\min}$ شعاع کوچکتر سطح مقطع لوله تغییرشکل یافته است که در "شکل 6" نشان داده شده است.

جهت بررسی توزیع ضخامت دیواره لوله در انحنای داخلی روی مسیر cd و در انحنای خارجی روی مسیر ab، به ترتیب از رابطه‌های (2) و (3) استفاده شده است:

$$\xi = \frac{t_{\max} - t_0}{t_0} \times 100 \qquad (2)$$

$$\zeta = \frac{t_0 - t_{\min}}{t_0} \times 100 \qquad (3)$$

که t_0 ضخامت اولیه لوله، $t_{\max}$ ضخامت دیواره در انحنای داخلی و $t_{\min}$ ضخامت دیواره در انحنای خارجی لوله خم‌کاری شده است.

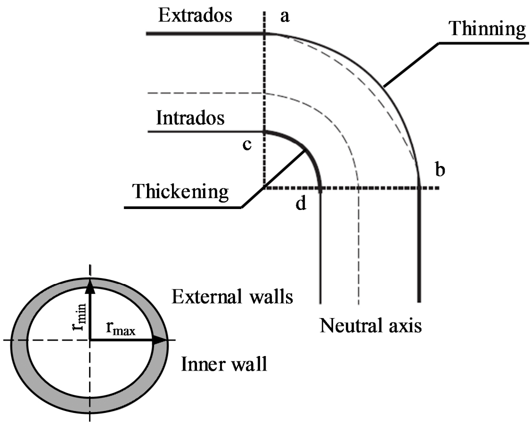


Fig. 6 Tube critical areas in rotary draw bending process [1]

شکل 6 ناحیه‌های بحرانی لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی [1]

با توجه به این‌که سرعت همراهی قالب فشار می‌تواند کمتر، بیشتر یا برابر با سرعت خطی قالب خم باشد، یک شاخص اسمی سطح همراهی f_{p} برای قالب فشار به صورت رابطه (4) درنظر گرفته می‌شود.

$$f_{\mathrm{p}} = \frac{V_{\mathrm{p}}}{V} \times 100 \qquad (4)$$

که V_{p} سرعت همراهی قالب فشار و $V = \omega R$ سرعت خطی مماس در شعاع خم‌کاری از مرکز قالب خم است.

برای کنترل کیفیت لوله خم‌کاری شده در این پژوهش، از جدول تلرانس کیفیت خم‌کاری که با در نظر گرفتن بیشترین درصد ارتفاع چروکیدگی، نازک‌شدگی و اعوجاج سطح مقطع توسط استاندارد SAE برای صنایع مختلف منتشر شده، استفاده شده است. جدول 4 تلرانس شکل‌دهی لوله را براساس استاندارد SAE نشان می‌دهد [15].

4- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا شبیه‌سازی انجام گرفته برای فرآیند خم‌کاری کششی دورانی با مندرل، با یک نمونه آزمایش تجربی راستی آزمایی شده است. سپس با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، برای حالات با مندرل به بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در نسبت‌های خم متفاوت و تاثیر کاهش نسبت خم بر پارامترهای اعوجاج سطح مقطع، نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی دیواره لوله پرداخته شده است. در ادامه با توجه به این‌که در فرآیند هیدروفرمینگ، میزان فشار اعمال شده به سطح داخلی لوله نقش مهمی در شکل‌دهی آن ایفا می‌کند، از این رو، با جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله‌های جدارنازک با نسبت‌های خم بحرانی، نحوه شکل‌گیری لوله و اثر تغییرات فشار داخلی لوله بر کیفیت قطعات تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است. درنهایت، با مقایسه حالت با مندرل و فشار سیال داخلی، مزایا و معایب به‌کار بردن فشار سیال داخلی به جای مندرل بیان شده است.

4-1- راستی‌آزمایی شبیه‌سازی با مندرل

برای راستی‌آزمایی شبیه‌سازی انجام گرفته، نتایج توزیع ضخامت در انحنای خارجی لوله خم‌کاری شده و تغییرات اعوجاج سطح مقطع به‌دست آمده توسط مدل شبیه‌سازی شده، با نتایج تجربی لی و همکاران مقایسه شده است، همان‌گونه که در "شکل 7" مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی لی و همکاران مطابقت خوبی دارد، به‌طوری‌که حداکثر اختلاف فقط 2.468 درصد است.

4-2- بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری با مندرل

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، برای بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با مندرل، مطابق با شرایط آزمایش‌های لی و همکاران شبیه‌سازی فرآیند انجام گرفته است. "شکل 8" لوله خم شده از جنس آلومینیوم Al5052-O را با نسبت خم 2 (نسبت شعاع خم 100 میلی‌متر به قطر لوله 50 میلی‌متر) و ضریب دیواره 50 (نسبت قطر لوله به ضخامت لوله 1 میلی‌متر) نشان می‌دهد.

بررسی‌ها نشان داد، در فرآیند خم‌کاری، ضخامت دیواره لوله در انحنای داخلی خم به‌دلیل کرنش‌های فشاری افزایش می‌یابد و بنابراین احتمال ایجاد چروک در این ناحیه وجود دارد. در انحنای خارجی نیز به‌دلیل وجود کرنش‌های کششی، کاهش ضخامت رخ می‌دهد. همچنین در این ناحیه، عموما قطعه به دلیل کاهش قطر که به سبب کشش در راستای طولی لوله در

جدول 4 تلرانس‌های خم‌کاری لوله با در نظر گرفتن سه عیب اصلی [15]

Table4 Diverse bending tolerances with respect to the three major defects [15]

فشار کاری (MPa)	جنس لوله	بیشترین ارتفاع چروکیدگی (%)	نازک‌شدگی (%)	اعوجاج سطح مقطع (%)
کمتر از 3.5	آلیاژ آلومینیوم، فولاد	2	30	10
	آلیاژ تیتانیوم	2	30	5
بیشتر از 3.5	آلیاژ آلومینیوم، فولاد	2	25	5
	آلیاژ تیتانیوم	0	25	3

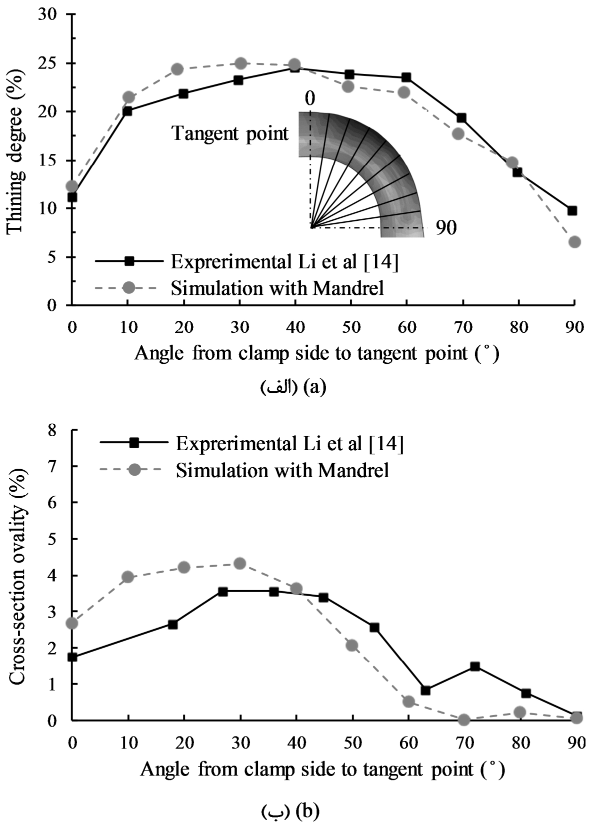


Fig. 7 Comparison of simulation results with experimental results Li et al, a-extrados thinning, b- cross-section.

شکل 7 مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی لی و همکاران، الف- نازک‌شدگی دیواره در انحنای خارجی، ب- اعوجاج سطح مقطع

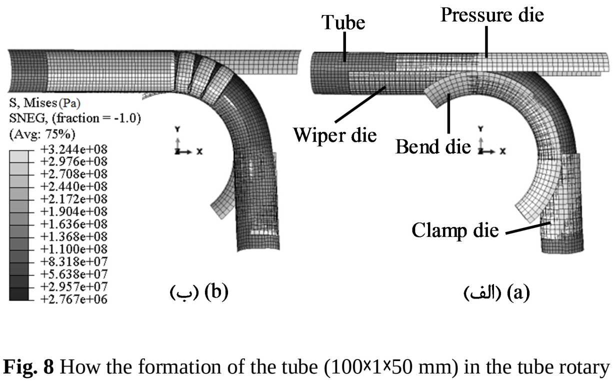


Fig. 8 How the formation of the tube (100×1×50 mm) in the tube rotary draw bending process with mandrel, a) complete model, b) sectioned model in X-Y plane

شکل 8 نحوه شکل‌گیری لوله (50×1×100 mm) در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با مندرل، الف- مدل کامل، ب- مدل برش خورده نسبت به صفحه x-y

انحنای خارجی اتفاق می‌افتد، دچار اعوجاج در سطح مقطع می‌شود. در خم حاضر به‌دلیل وجود قالب جاروب‌کن، جریان ماده در انحنای داخلی خم کنترل شده و حداکثر ضخامت دیواره لوله به 1.132 میلی‌متر رسیده است، ساچمه‌های انعطاف‌پذیر مندرل نیز از اعوجاج زیاد سطح مقطع لوله جلوگیری می‌کنند، به‌طوری‌که حداکثر درصد اعوجاج سطح مقطع در ناحیه خم فقط 4.307 درصد است که در زاویه 60 درجه از ناحیه خم $(\theta = 60^{\circ})$ اتفاق می‌افتد. کمترین ضخامت لوله در انحنای خارجی لوله تغییرشکل یافته 0.734 میلی‌متر است، بنابراین حداکثر نازک‌شدگی دیواره لوله به 25.7 درصد رسیده است. در خم‌کاری انجام شده، با وجود نقش موثر قالب جاروب‌کن و مندرل هیچ‌گونه چروکیدگی در خم مشاهده نشد. درنتیجه طبق پارامترهای جدول 4 و براساس استاندارد SAE، لوله آلومینیومی 5052O در نسبت خم 2 و ضریب دیواره 50 با موفقیت خم شده است.

در ادامه با کاهش نسبت خم و سخت‌شدن شرایط خم‌کاری، به بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در نسبت‌های خم 1.75، 1.5، 1.25 و 1 پرداخته شده است، بدین صورت که در مدل شبیه‌سازی شده فرآیند خم‌کاری، شعاع خم از 100 میلی‌متر به ترتیب به 87.5، 75، 62.5 و 50 میلی‌متر کاهش یافته است. در شبیه‌سازی هر مورد سرعت قالب خم 0.8 رادیان بر ثانیه و سطح همراهی قالب فشار f_p برابر با 1 در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در "شکل 9" نشان داده شده در نسبت‌های خم کمتر از 2، لوله بدون چروکیدگی و با درصد اعوجاج سطح مقطع مجاز، به خوبی شکل گرفته است، اما درصد نازک‌شدگی در نسبت‌های خم 1.5، 1.25 و 1 بیشتر از حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد. بنابراین خم‌کاری لوله موردنظر به روش خم‌کاری کششی دورانی با مندرل در نسبت‌های خم بحرانی 2 و 1.75 با موفقیت انجام شده است، اما با کاهش بیشتر نسبت خم، لوله خم‌کاری شده با این روش، کیفیت مناسب را براساس استاندارد SAE نخواهد داشت. "شکل 9" تغییرات کرنش پلاستیک معادل در نسبت‌های خم مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد کرنش پلاستیک معادل در انحنای خارجی خم، با کوچکتر شدن شعاع خم، به شدت افزایش می‌یابد.

"شکل 10" مقدار تغییرات اعوجاج سطح مقطع ناحیه خم را در نسبت‌های خم مختلف خم‌کاری با مندرل نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد ناحیه شکل‌گیری لوله به دو قسمت از 0 تا 35 درجه و از 35 تا 90 درجه تقسیم می‌شود، در قسمت اول با افزایش نسبت خم، اعوجاج سطح مقطع تغییر چندانی نمی‌کند، زیرا ساچمه‌های مندرل در همه‌ی نسبت‌های خم، قسمت اول ناحیه شکل‌گیری لوله را پوشش می‌دهند. از خط مماس به بعد، لوله شروع به تغییرشکل می‌کند و هرچه شعاع خم کمتر باشد لوله با تغییرشکل شدیدتری مواجه است به همین دلیل در قسمت اول برای نسبت خم 1، اعوجاج سطح مقطع بیشتری رخ داده است. در قسمت دوم، با کاهش نسبت خم، اعوجاج سطح مقطع کمتری مشاهده می‌شود، زیرا هر چه شعاع خم کمتر باشد، ناحیه خم کوچکتر است و ساچمه‌های مندرل فضای بیشتری از ناحیه خم را پر می‌کنند، به‌طوری‌که در نسبت خم 1، ساچمه‌های مندرل

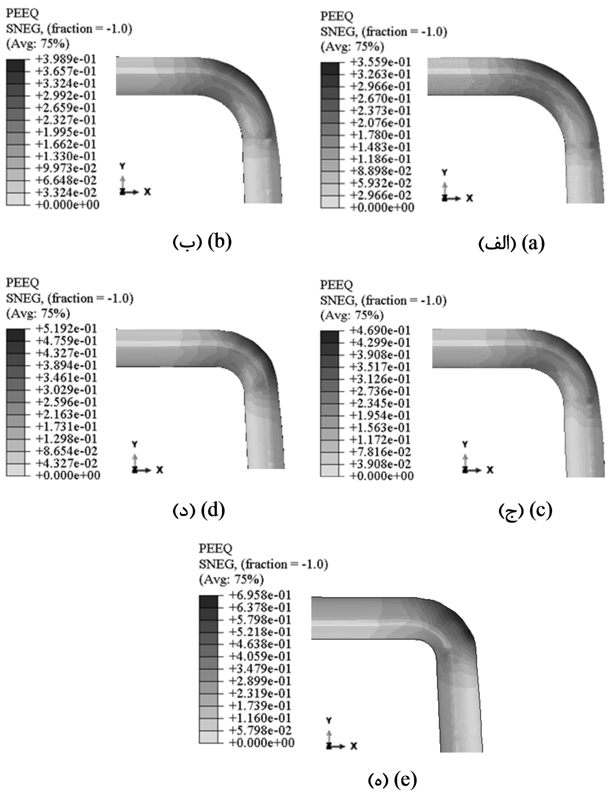


Fig. 9 Equivalent plastic strain changes in bend ratio a)2, b)1.75, c)1.5, d)1.25 and e)1

شکل 9 تغییرات کرنش پلاستیک معادل در نسبت‌های خم الف- 2، ب-1.75 ، ج- 1.5، د- 1.25، ه- 1

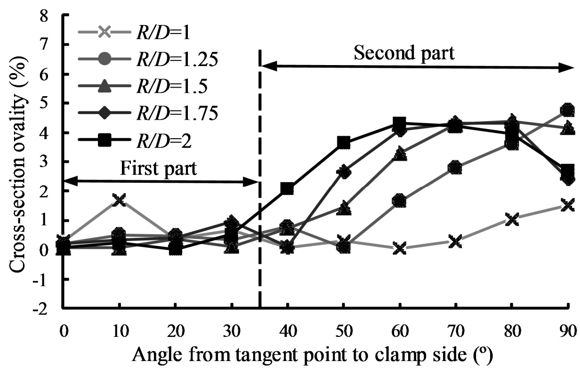


Fig. 10 Cross-section distortion percentage change in different bend ratios

شکل 10 تغییرات درصد اعوجاج سطح مقطع در نسبت‌های خم مختلف

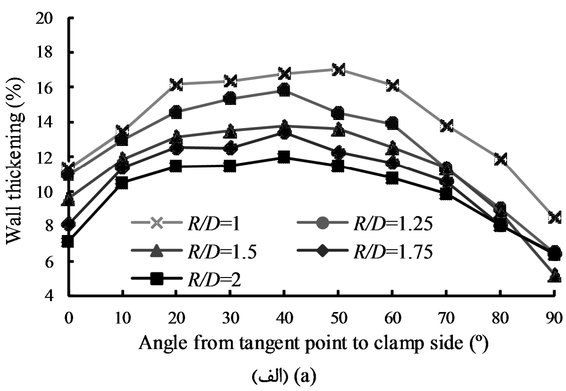
بدین ترتیب، اگرچه امروزه خم‌کاری لوله به روش خم‌کاری کششی دورانی با مندرل در صنعت معمول می‌باشد، اما به دلیل وجود اصطکاک بین لوله و مندرل، نازک‌شدگی شدیدی در انحنای خارجی لوله خم‌کاری شده اتفاق می‌افتد. در ادامه، با هدف کاهش نازک‌شدگی دیواره لوله جایگزینی فشار سیال داخلی به جای مندرل، مورد بررسی قرار گرفته است.

3-4- بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی

به منـظور بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآینـد خم‌کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی، شبیه‌سازی فرآیند، مطابق با شرایط شبیه‌سازی انجام گرفته برای فرآیند خم‌کاری با مندرل، براساس آزمایش‌های لی و همکاران انجام گرفته است. در شبیه‌سازی حاضر به جای استفاده از مندرل از فشار سیال یکنواخت استفاده شده است. برای بررسی اثر فشار سیال داخلی، ابتدا به منظور مشاهده نحوه شکل‌گیری نمونه (لوله از جنس Al5052-O به قطر خارجی 50 میلی‌متر، ضخامت دیواره 1 میلی‌متر، نسبت خم 2 و ضریب دیواره 50) در خم ایجاد شده، نمونه بدون مندرل و بدون اعمال فشار سیال داخلی شکل داده شد. نحوه شکل‌گیری نمونه در حالت بدون عامل حمایت کننده از درون لوله در "شکل 12" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد به دلیل نبود مندرل یا فشار سیال، مقطع لوله از حالت دایروی خارج شده و چروکیدگی شدیدی در انحنای داخلی خم رخ داده است.

به منظور رفع چروکیدگی و بهبود اعوجاج سطح مقطع، فشار 1 مگاپاسکال به سطح داخلی لوله اعمال گردید. همان‌گونه که در "شکل 13" حدود 90 درصد ناحیه خم را پوشش می‌دهند. بنابراین اعوجاج سطح مقطع کمتر خواهد شد.

"شکل 11" تغییرات نسبی ضخامت دیواره لوله را در نسبت خم مختلف برای خم‌کاری کششی دورانی لوله با مندرل نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با کاهش نسبت خم، به دلیل افزایش کرنش‌های کششی و فشاری، ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی و نازک‌شدگی دیواره در انحنای خارجی افزایش می‌یابند. به‌طوری‌که با کاهش نسبت خم از 2 به 1، حداکثر ضخیم‌شدگی دیواره لوله از 11.989 درصد به 17.017 درصد و حداکثر نازک‌شدگی از 25.7 درصد به 47.937 درصد افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در "شکل 11" نشان داده شده است، حداکثر نازک‌شدگی در نسبت‌های خم 1.5، 1.25 و 1 بیشتر از حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد.



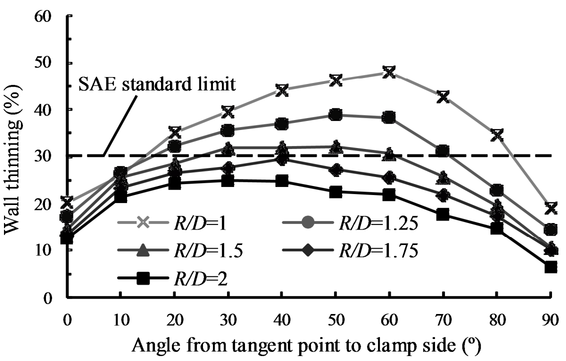


Fig. 11 Relative changes of the tube wall thickness change in different bend ratios, a-intrados thickening, b-extrados thinning

شکل 11 تغییرات نسبی ضخامت دیواره لوله در نسبت‌های خم مختلف، الف- ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی، ب- نازک‌شدگی دیواره در انحنای خارجی

نشان داده شده است با اعمال فشار سیال، چروکیدگی در انحنای داخلی لوله و اعوجاج سطح مقطع تا حد زیادی کاهش یافته است.

جهت بهبود چروکیدگی در انحنای داخلی و اعوجاج سطح مقطع لوله، فشار سیال 2 مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار تا 2 مگاپاسکال چروکیدگی در لوله شکل داده شده به طور کامل برطرف گردید. همچنین اعوجاج سطح مقطع از 21.764 درصد در فشار 1 مگاپاسکال به 13.089 درصد در فشار 2 مگاپاسکال بهبود یافته است.

افزایش بیشتر فشار از 2 مگاپاسکال به 3 مگاپاسکال تاثیری بر کیفیت انحنای داخلی لوله ندارد اما باعث کاهش اعوجاج سطح مقطع می‌شود. همان‌گونه که در "شکل 13" مشاهده می‌شود، افزایش فشار سبب بهبود سطح مقطع لوله شده است. با افزایش فشار به 3 مگاپاسکال قطر لوله در منطقه خارج از ناحیه خم به 50.224 میلی‌متر افزایش می‌یابد، بنابراین برای جلوگیری از خراشیدگی در سطح لوله، قالب جاروب‌کن به اندازه 1 درجه نسبت به راستای لوله زاویه داده شد. در فشار 4 مگاپاسکال قطر لوله در منطقه خارج از ناحیه خم به 50.525 میلی‌متر می‌رسد، بنابراین فشار 3 مگاپاسکال به عنوان فشار مناسب برای شکل‌دهی انتخاب شده است.

همان‌گونه که در "شکل‌های 12 و 13" مشاهده شد در روش ارایه شده خم‌کاری کششی دورانی به همراه فشار سیال داخلی، بدون اعمال فشار سیال، لوله چروک شده و اعوجاج سطح مقطع زیاد است. با اعمال فشار سیال، نیـمه پایینی لوله شکل قالب را به خود گرفت و چروکیدگی در انحنای داخلی لوله برطرف گردید. در ادامه با افزایش فشار مقدار اعوجاج سطح مقطع کاهش یافته و در فشار 3 مگاپاسکال قطعه با کیفیت مناسب تولید شد. افزایش فشار، باعث افزایش نیروی عمودی و در نتیجه اصطکاک بین سطوح لوله/ قالب جاروب‌کن و لوله/ قالب خم می‌شود که سخت‌تر شدن جریان لوله روی قالب را در پی دارد، بنابراین چروکیدگی در انحنای داخلی برطرف گردید. از طرفی، در مقطع لوله، افزایش فشار باعث افزایش بیشتر کرنش حلقوی نسبت به کرنش طولی می‌شود به همین دلیل قطر لوله هم در راستای عمودی و هم در راستای افقی به قطر اولیه لوله نزدیک شده است. درنتیجه با افزایش فشار اعوجاج سطح مقطع نیز کاهش یافت. "شکل 14" تغییرات کرنش طولی و کرنش حلقوی را در فشارهای مختلف برای مقطع A-A (میانه خم) نشان می‌دهد. باتوجه به "شکل 14" مشاهده می‌گردد در نیمه بالایی لوله کرنش طولی کششی مثبت و کرنش حلقوی منفی است درحالیکه در نیمه پایینی لوله کرنش طولی منفی و کرنش حلقوی کششی و مثبت می‌باشد. بنابراین، می‌توان حالت کرنش را در ناحیه خم برای یک مقطع لوله، به صورت "شکل 15" نشان داد.

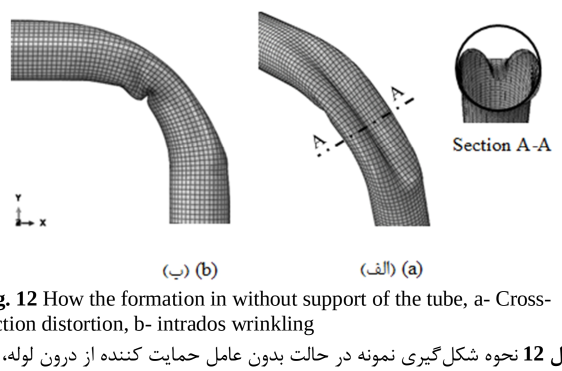


Fig. 12 How the formation in without support of the tube, a- Cross-section distortion, b- intrados wrinkling

شکل 12 نحوه شکل‌گیری نمونه در حالت بدون عامل حمایت کننده از درون لوله، الف- اعوجاج شدید سطح مقطع لوله، ب- چروکیدگی در انحنای داخلی

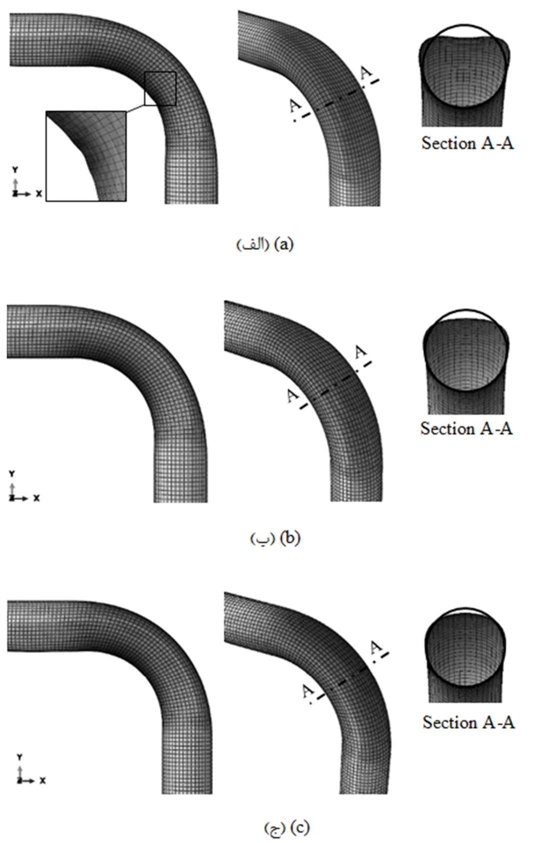


Fig. 13 Shaped tubes bent under different pressure, a- 1 MPa, b- 2 MPa, c- 3 MPa

شکل 13 لوله شکل داده شده در فشارهای مختلف، الف- 1 مگاپاسکال، ب- 2 مگاپاسکال، ج- 3 مگاپاسکال

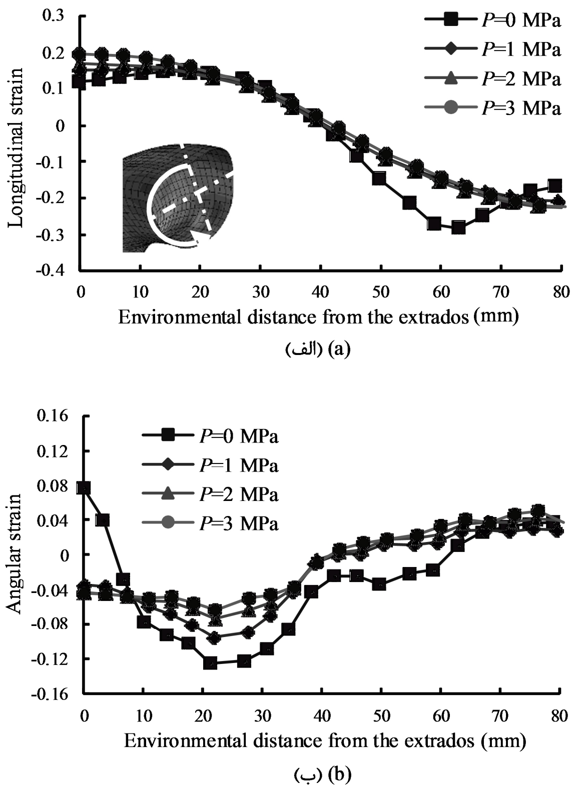


Fig. 14 Changes of strain in different pressure, a-longitudinal strain b-annular strain

شکل 14 تغییرکرنش در فشارهای مختلف، الف-کرنش طولی، ب-کرنش حلقوی

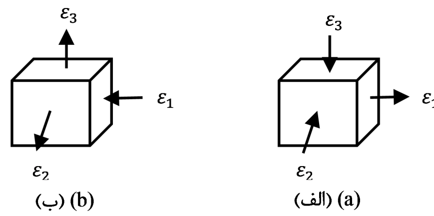


Fig. 15 Strain in a cross from the bend area, a-the upper half tube b-bottom half tube

شکل 15 کرنش‌ها در یک مقطع از ناحیه خم ، الف-نیمه بالایی لوله، ب- نیمه پایینی لوله

4-3-1- اثر فشار داخلی روی تغییرشکل سطح مقطع

به منظور بررسی اثر فشار داخلی روی تغییرشکل سطح مقطع و تغییرات ضخامت دیواره از پارامترهای توصیف شده در قسمت 3 استفاده شده است. با توجه به اینکه مقطع لوله در راستای قطر افقی ($D_{\max}$) توسط شیار قالب خم‌کن محدود شده است، اما در راستای قطر عمودی ($D_{\min}$) تحت تغییرشکل آزاد قرار دارد. بنابراین، در حالت بدون فشار داخلی تغییرشکل سطح مقطع کمتری در راستای قطر افقی نسبت به راستای قطر عمودی مشاهده شد.

"شکل 16" اثر فشار داخلی را روی تغییرات قطر خارجی لوله ($D_{\max}$ و $D_{\min}$) نشان می‌دهد. هنگامی‌که خم‌کاری بدون فشار داخلی انجام شده است کمترین قطر عمودی در ناحیه خم 18.279 میلی‌متر است که یک کاهش 31.721 میلی‌متری را نسبت به قطر اصلی بیان می‌کند. اما زمانی‌که فشار

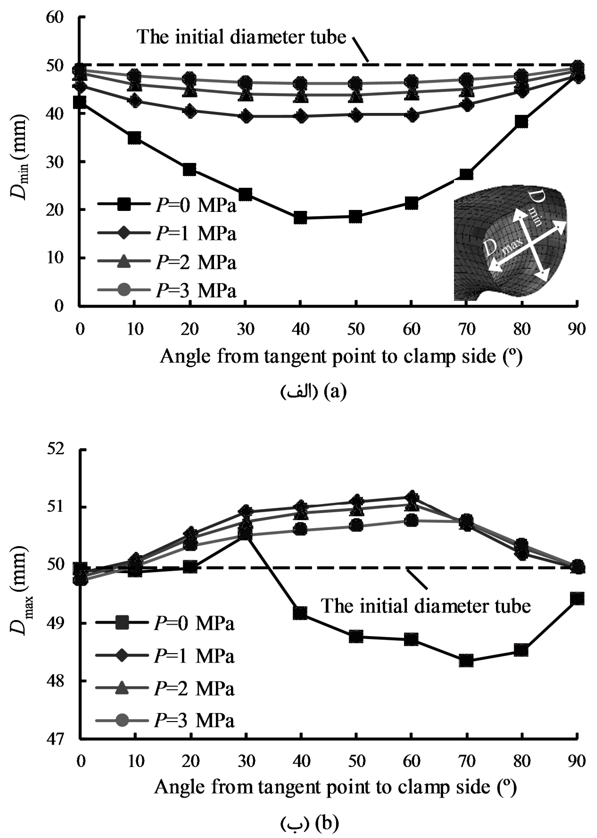


Fig. 16 The effect of internal pressure on the pipe diameter changes, a-$D_{\min}$, b-$D_{\max}$

شکل 16 اثر فشار داخلی را روی تغییرات قطر خارجی لوله، الف- قطر لوله در راستای عمودی سطح مقطع، ب- قطر لوله در راستای افقی سطح مقطع

داخلی 3 مگاپاسکال اعمال گردید، کمترین قطر عمودی 46.072 میلی‌متر شد که فقط 3.928 میلی‌متر از قطر اصلی کوچکتر است. همچنین افزایش فشار داخلی، باعث نزدیک شدن اندازه قطر افقی، به قطر اولیه لوله می‌شود. به‌طوری‌که وقتی خم‌کاری بدون فشار داخلی انجام گردید، اختلاف بین کمترین قطر افقی در ناحیه خم و قطر اولیه لوله 1.658 میلی‌متر است. درحالی‌که افزایش فشار این اختلاف را کاهش داد و در فشار 3 مگاپاسکال این مقدار به 0.758 میلی‌متر رسید. بنابراین با افزایش فشار داخلی، بهبود قطر خارجی لوله هم در راستای قطر عمودی و هم در راستای قطر افقی حاصل گردیده است.

"شکل 17" تاثیر فشار داخلی را روی اعوجاج سطح مقطع نشان می‌دهد. آن‌چه در "شکل 17" حائز اهمیت است، وابستگی شدید اعوجاج سطح مقطع لوله به فشار داخلی می‌باشد، به‌طوری‌که با افزایش فشار داخلی از 0 تا 3 مگاپاسکال، بیشترین اعوجاج سطح مقطع لوله در ناحیه خم از 61.736 درصد به 9.184 درصد کاهش یافت. بنابراین، زمانی‌که فشار داخلی از 0 به 3 مگاپاسکال افزایش داده شد اعوجاج سطح مقطع به میزان 52.525 درصد بهبود پیدا کرده است.

4-3-2- اثر فشار داخلی روی تغییرات ضخامت دیواره

به‌منظور بررسی توزیع ضخامت در دیواره لوله، مطابق با "شکل 6" برای انحنای خارجی مسیر ab و برای انحنای داخلی مسیر cd انتخاب شده است. "شکل 18" تغییرات ضخامت دیواره را در برابر فشار داخلی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده شد در حالت بدون فشار سیال، لوله در انحنای داخلی دچار چروکیدگی شدیدی می‌شود. در ادامه با ایجاد فشار داخلی به منظور رفع چروکیدگی، مشاهده می‌گردد با افزایش فشار از 1 به 3 مگاپاسکال، بیشترین ضخامت لوله در انحنای داخلی از 1.248 میلی‌متر به 1.209 میلی‌متر کاهش می‌یابد. هنگامی‌که لوله در فشار داخلی 1 مگاپاسکال شکل داده شد، اختلاف بین بیشترین ضخامت دیواره در انحنای داخلی با ضخامت اولیه لوله 0.248 میلی‌متر است. درحالی‌که با افزایش فشار به 3 مگاپاسکال این مقدار به 0.209 میلی‌متر کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش فشار داخلی از 1 به 3 مگاپاسکال انحراف بیشترین ضخامت دیواره در انحنای داخلی را به مقدار 0.039 میلی‌متر بهبود می‌بخشد.

همچنین با توجه به "شکل 18" مشاهده می‌گردد، افزایش فشار داخلی ضخامت دیواره لوله را در انحنای خارجی کاهش می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش فشار سیال از 0 به 3 مگاپاسکال، کمترین ضخامت دیواره در انحنای خارجی از 0.931 میلی‌متر به 0.858 میلی‌متر کاهش می‌یابد. بنابراین با

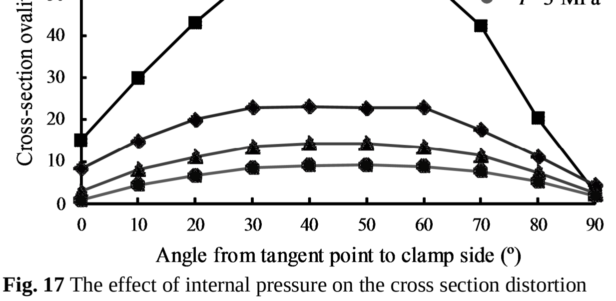


Fig. 17 The effect of internal pressure on the cross section distortion

شکل 17 اثر فشار داخلی روی اعوجاج سطح مقطع لوله خم‌کاری شده

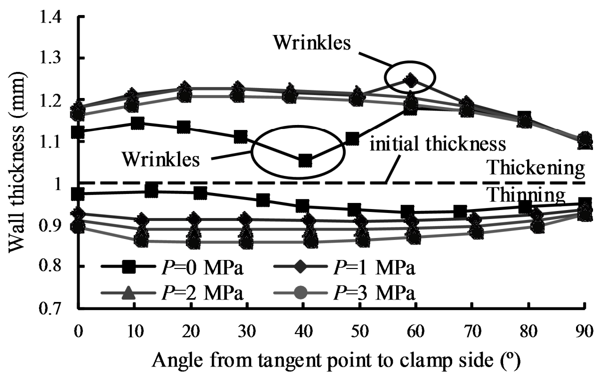


Fig. 18 The effect of internal pressure on the tube wall thickness

شکل 18 اثر فشار داخلی بر ضخامت دیواره لوله

به‌کار بردن فشار داخلی در طی خم، انحراف ضخامت دیواره در انحنای خارجی نسبت به ضخامت اولیه لوله 0.073 میلی‌متر افزایش داشته است.

"شکل 19" اثر فشار داخلی روی نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی دیواره لوله را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد با افزایش فشار داخلی از 1 به 3 مگاپاسکال درجه ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی از 22.803 درصد به 20.87 درصد کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش فشار داخلی از 0 به 3 مگاپاسکال درجه نازک‌شدگی از 6.943 درصد به 14.2 درصد افزایش پیدا کرده است، تراکم نمودارها در "شکل 19" بیانگر تاثیر بیشتر فشار داخلی بر نازک‌شدگی نسبت به ضخیم‌شدگی دیواره لوله می‌باشد.

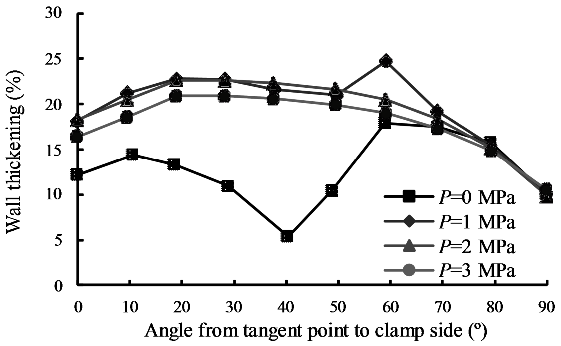
با بررسی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت، به‌دلیل اعمال فشار سیال، تنش‌های فشاری طولی و حلقوی به‌وجود آمده در انحنای داخلی کاهش می‌یابد، بنابراین موجب کاهش ضخیم‌شدگی در این ناحیه شده است، همچنین با ایجاد فشار، تنش‌های کششی طولی و حلقوی در انحنای خارجی، کرنش‌های کششی را بوجود می‌آورند که باعث نازک‌شدگی در این ناحیه می‌گردد.

بدین ترتیب لوله جنس Al5052-O به ابعاد 100×1×50 با حداکثر اعوجاج سطح مقطع 9.184 درصد، حداکثر نازک‌شدگی دیواره 14.2 درصد و بدون چروکیدگی در انحنای داخلی، مطابق با استاندارد SAE در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی به همراه فشار سیال داخلی، به خوبی شکل گرفته است.

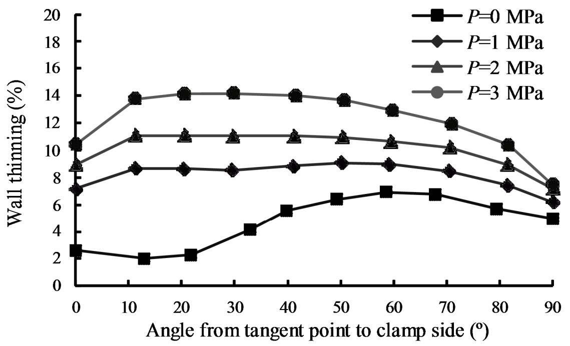
درنتیجه، با بکارگیری فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله، حداکثر نازک‌شدگی دیواره لوله از 25.7 درصد به 14.2 درصد کاهش یافته است که یک بهبود 44.75 درصدی کاهش ضخامت را در انحنای خارجی لوله نسبت به حالت استفاده از مندرل بیان می‌کند. اما خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی نسبت به خم‌کاری با مندرل، حداکثر اعوجاج سطح مقطع را از 4.307 درصد به 9.184 درصد و حداکثر ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی را از 11.989 درصد به 20.87 درصد افزایش داده است. یعنی احتمال ایجاد چروکیدگی در انحنای داخلی خم، در خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی بیشتر از خم‌کاری با مندرل می‌باشد.

4-3-3- اثر تغییر نسبت خم در خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی

در بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری با مندرل مشاهده شد، خم‌کاری لوله در نسبت‌های خم 2 و 1.75 با موفقیت انجام شد. اما با کاهش نسبت خم به 1.5، 1.25 و 1، حداکثر نازک‌شدگی لوله در انحنای خارجی بترتیب به 32.11، 38.82 و 47.94 درصد می‌رسد که بیشتر از حد مجاز



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 19 The effect of internal pressure on the tube wall thinning and thickening, a-intrados thickening, b-extrados thinning

شکل 19 اثر فشار داخلی روی نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی دیواره لوله، الف- ضخیم‌شدگی دیواره در انحنای داخلی، ب- نازک‌شدگی دیواره در انحنای خارجی

استاندارد SAE است.

در ادامه با بررسی نحوه خم‌کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی مشاهده شد، لوله خم‌کاری شده در نسبت خم 2 با بهبود 44.75 درصدی حداکثر نازک‌شدگی نسبت به خم‌کاری با مندرل، به خوبی شکل گرفت، حداکثر نازک‌شدگی در نسبت‌های خم کمتر از 2 یعنی، 1.75، 1.5، 1.25 و 1 به‌وسیله این روش، به‌ترتیب 15.39، 17.24، 17.26 و 19.87 درصد می‌شود که در حد مجاز استاندارد SAE می‌باشد. اما با کاهش نسبت خم به 1.75 در خم‌کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی، حداکثر اعوجاج سطح مقطع به 11.798 درصد می‌رسد که بیشتر از حد مجاز استاندارد SAE است، همچنین با کاهش نسبت خم به 1.5، 1.25 و 1، به دلیل تنش‌های فشاری شدیدتر در انحنای داخلی خم، لوله دچار چروکیدگی در سطح داخلی می‌شود، بنابراین لوله‌های شکل داده شده در نسبت‌های خم 1.75، 1.5، 1.25 و 1 به‌وسیله فرآیند خم‌کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی، دارای کیفیت مناسب براساس استاندارد SAE نمی‌باشند. "شکل 20" لوله شکل داده شده در نسبت‌های خم مختلف بوسیله فرآیند خم‌کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب با کاهش نسبت خم، افزایش حداکثر نازک‌شدگی عامل عدم کیفیت مناسب لوله‌های خم شده به روش خم‌کاری با مندرل می‌باشد، درحالیکه در فرآیند خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی، عیوب چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع باعث شکست خم‌کاری با کیفیت مناسب می‌شود.

5- نتیجه گیری

در صنعت امروز برای حذف چروکیدگی و کاهش اعوجاج سطح مقطع

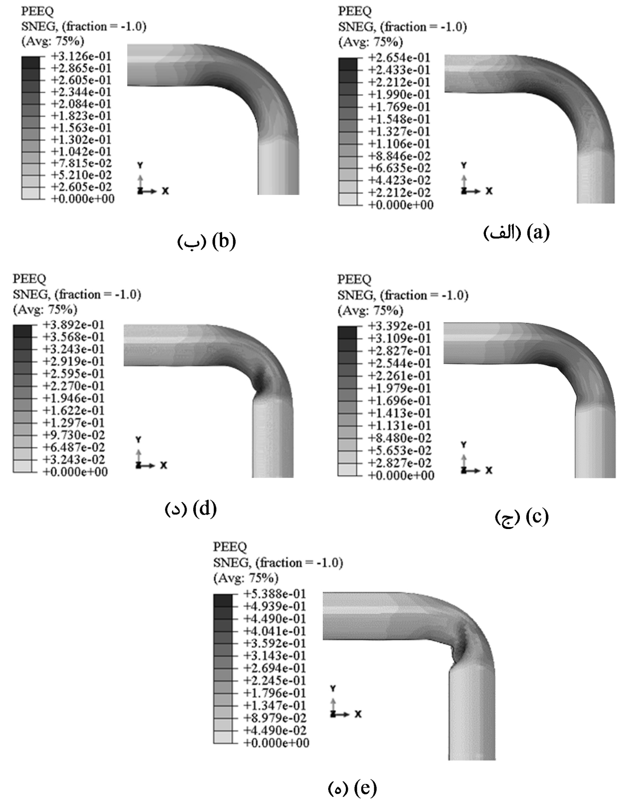


Fig. 20 Equivalent plastic strain changes in Bend ratio a-2, b-1.75, c-1.5, d-1.25 and e-1

شکل 20 تغییرات کرنش پلاستیک معادل در نسبت‌های خم الف- 2، ب-1.75 ، ج-1.5، د- 1.25، ه- 1

لوله‌های خمیده، از مندرل تنها و یا مندرل به همراه قالب جاروب‌کن استفاده می‌شود، که انتخاب مندرل به جنس لوله، شعاع لوله، شعاع خم و زاویه خم بستگی دارد. در پژوهش حاضر خم‌کاری لوله‌های جدارنازک آلومینیومی با شعاع خم بحرانی به همراه مندرل و قالب‌جاروب‌کن با حالت استفاده از فشار سیال داخلی به جای مندرل مقایسه شده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله با دو راهبرد با مندرل و به همراه فشار سیال داخلی برای بدست آوردن شناخت کافی در مورد رفتار فشار سیال داخلی در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله‌ها انجام شد، مهمترین نتایج حاصل از پژوهش در زیر آورده شده است:

1- شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله در نسبت خم 2 به صورت با مندرل و به همراه فشار سیال داخلی نشان داد، با به‌کارگیری فشار سیال داخلی به جای مندرل در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله، حداکثر نازک‌شدگی دیواره به میزان چشمگیری بهبود می‌یابد، اما خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی نسبت به خم‌کاری با مندرل، حداکثر اعوجاج سطح مقطع و حداکثر ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی را افزایش می‌دهد. یعنی احتمال ایجاد چروکیدگی در انحنای داخلی خم، در خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی بیشتر از خم‌کاری با مندرل است.

2- با بررسی نحوه شکل‌گیری لوله در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی لوله به همراه فشار سیال داخلی، مشاهده گردید. با اعمال فشار سیال، نیمه پایینی لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد و چروکیدگی در انحنای داخلی لوله برطرف می‌شود.

3- افزایش فشار داخلی باعث نزدیک شدن اندازه قطر خارجی لوله هم در راستای قطر عمودی و هم در راستای قطر افقی به قطر اولیه لوله می‌گردد و اعوجاج سطح مقطع کاهش می‌یابد. همچنین افزایش فشار داخلی درجه ضخیم‌شدگی در انحنای داخلی لوله را کاهش و درجه نازک‌شدگی در انحنای خارجی را افزایش می‌دهد، اما تاثیر افزایش فشار داخلی بر نازک‌شدگی دیواره لوله نسبت به ضخیم‌شدگی بیشتر می‌باشد.

4- مقایسه خم‌کاری لوله به همراه فشار سیال داخلی و با مندرل در نسبت‌های خم مختلف نشان می‌دهد، با کاهش نسبت خم و سخت‌تر شدن شرایط خم‌کاری، کاهش شدید ضخامت لوله در انحنای خارجی عامل عدم کیفیت مناسب لوله‌های خم شده به روش خم‌کاری با مندرل است. درحالیکه در فرآیند خم‌کاری به همراه فشار سیال داخلی، نازک‌شدگی ضخامت لوله در انحنای خارجی کاهش می‌یابد، اما عیوب چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع باعث شکست خم‌کاری با کیفیت مناسب می‌شود.

6- مراجع

[1] M. Gregory, *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*, pp. 72-110, Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 2003.

[2] *The 5 basic bending tooling components explained*, Accessed on 28 october 2015; http://www.tubeformsolutions.com/blog.

[3] H. Li, *Study on Wrinkling behaviors under multi-die constraints in thin-walled tube NC bending*, PhD thesis, Northwestern Polytechnical University, Chinese, 2007.

[4] H. Yang, H. Li, Z. Zhang, M. zhan, J. Liu, G. Li, Advances and trends on tube bending forming technologies, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-12, 2012.

[5] A.V. Kale, H.T. Thorat, Effect of precompression on ovality of pipe after bending. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Transactions of the ASME**,** Vol. 131, Issue. 1, No. 011207-7, 2008.

[6] A.Veerappan, S. Shanmugam, Analysis for flexibility in the ovality and thinning limits of pipe bends, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 31–41. 2008.

[7] M. Zhan, H. Yang, Z. Q. Jiang, Z. S. Zhao, Y. Lin, A Study ona 3D FE Simulation Method of the Bending Process of Thin–Walled Tube, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 129, No. 1–3, pp. 273–276, 2002.

[8] J. Yang, B. Jeon, The Tube Bending Technology of a Hydroforming Process from an Automotive Part, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, Issues. 1–3, pp. 175–181, 2001.

[9] L. Heng, Y. He, Zh. Mei, S. Zhichao, G. Ruijie, Role of mandrel in Nc precision bending process of thin-Walled tube, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, Issues. 7–8, pp. 1164-1175, 2007.

[10] H. Li, H. Yang, M. Zhan, Y. L. Koy, Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 1, PP. 143-158, 2010.

[11] J. Wang, R. Agarwal, Tube bending under axial force and internal pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 2, pp. 598–605, 2006.

[12] L. Lazaresco, Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bendig, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 64, No. 1, pp. 85-91, 2013.

[13] S. Montazeri, A. H. Gorji, M. Bakhshi, A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 190-198, 2014. (in Persian فارسی)

[14] H. Li, H. Yang, J. Yan, M. Zhan, Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius, *Computational Materials Science*, Vol. No. 4, 45, pp. 921-934, 2009.

[15] H. Li, H. Yang, Z.Y. Zhang, G.L. Li, N. Liu, T. Welo, Multiple instability-constrained tube bending limits, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 445-455, 2014.