مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1393، دوره 14، شماره 12، ص‌ص 190-198

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

یک روش جدید برای خم‌کاری فشاری لوله جدار نازک در خم‌کاری هیدرولیکی

سحرناز منتظری[1]، عبدالحمید گرجی[2*]، محمد بخشی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3- استاد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
* بابل،صندوق پستی 71167- 47148، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 فروردین 1393
پذیرش: 28 اردیبهشت 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:
خم‌کاری لوله
خم‌کاری هیدرولیکی
شبیه‌سازی اجزای محدود

چکیده

خم‌کاری لوله کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع هوافضا، خودروسازی و سایر صنایع دارد. چروکیدگی لوله‌های جدار نازک، تغییرشکل سطح مقطع و تغییرات ضخامت در حین خم‌کاری لوله، از مشکل‌های اصلی این فرایند بشمار می‌آید. نیروی فشاری و فشار داخلی می‌تواند به منظور کنترل بهتر فرایند خم‌کاری مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه نسبت شعاع خم به قطر لوله (R/D) در فرایند خم‌کاری بین 1 تا 1/5 باشد، خم‌کاری با روش‌های معمول قابل انجام نیست. ارائه روش جدیدی که بتواند سبب برطرف کردن چروک در لوله و کمترین تغییرات ضخامت در دیواره آن شود، حائز اهمیت است. در این پژوهش، لوله‌ها به صورت انتها بسته تولید شده است. از آنجا که تهیه لوله جدار نازک با انتهای بسته مشکل است، در این پژوهش ابتدا لوله‌های انتها بسته بدون درز به وسیله فرایندهای کشش عمیق و اتوکاری تولید شده و پس از ساخت این لوله‌ها، فرایند خم‌کاری لوله با نسبت (R/D) برابر یک توسط فرایند جدید خم هیدرولیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از بررسی مسیر فشار، مسیر فشاری که در آن لوله بدون چروکیدگی به طور کامل شکل قالب را به خود می‌گیرد، بدست آمد. همچنین اثر تغییرات فشار بر توزیع ضخامت لوله در شعاع داخلی و شعاع خارجی ناحیه خم لوله مورد بررسی قرار گرفت.

A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending

Saharnaz Montazeri[1], Abdolhamid Gorji[2*], Mohammad Bakhshi[3]

Department of mechanical engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 47148-71167, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 April 2014
Accepted 18 May 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
Tube bending
Hydrobending
Finite Element Method

ABSTRACT

Tube bending is used extensively in aerospace, automotive and other industries. Wrinkles in thin-walled tubes, changes in cross section and thickness changes during tube bending are the main problems in this process. Compressive force and internal pressure can be used to better control the bending process. If the bend radius to tube diameter ratio (R/D) in the bending process could be between 1 and 1.5, the bending is not done with conventional methods. Providing a new method that results in preventing both wrinkles and minimum tube wall thickness changes is important. In this paper, tubes producing with closed end. Since tube producing with closed end is difficult, in this study, initially closed end seamless tubes are produced by deep-drawing and ironing processes, thereafter tube bending process with ratio (R/D) equal to one was analyzed using experiments and simulations by hydrobending the new method. The pressure in which the tube takes the shape of the die completely without wrinkles, was obtained after investigating pressure changes. The effects of pressure changes on the thickness distribution of the tube inner radius and outer radius of the bent tube was also examined.

1- مقدمه

امروزه لوله‌های خمیده با شعاع خم کم، کاربرد بسیاری در صنایع خودروسازی، هوافضا و کشتی‌سازی دارند. در خم‌کاری لوله‌ها، هرچه میزان شعاع خم کوچک‌تر و ضخامت دیواره لوله کمتر باشد، احتمال ایجاد عیوبی نظیر چروک و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله بیشتر می‌شود [1]. چگونگی برطرف کردن این عیوب، یکی از مسایل مهمی است که سبب گسترش پژوهش‌ها در این زمینه شده است.

خم‌کاری لوله به روش‌های مختلف انجام می‌شود. در بین روش‌های مختلف خم‌کاری لوله، خم‌کاری چرخشی به روش کنترل عددی[1]، خم‌کاری فشاری[2] و خم‌کاری هیدرولیکی[3] کاربرد گسترده‌تری دارد.

در این زمینه، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. به منظور کاهش چروک و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله، تأثیر پارامترهای هندسی ابزار خم‌کاری، قالب و سایر پارامترهای مؤثر بر خم‌کاری، با این روش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [2-6].

یانگ و همکاران [7] یک مدل تحلیلی بر اساس معیار انرژی برای پیش‌بینی چروکیدگی ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از این معیار، به روش کنترل عددی، حد چروکیدگی را در فرایند خم‌کاری برای لوله‌های جدار نازک با قطر

1- NC Rotary Draw Bending

2- Pure Bending
3- hydrobending

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

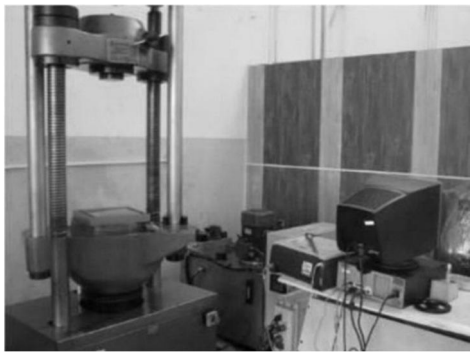
Please cite this article using:
S. Montazeri, A.H. Gorji, M. Bakhshi, A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 190-198, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]

زیاد به دست آوردند. زنگ و لی [8] خم‌کاری فشاری لوله‌ها و پارامترهای مؤثر بر آن را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و ردیکاپ [9] خم‌کاری لوله به روش فشاری را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند و تعدادی از پارامترهای مؤثر بر شکل‌پذیری، شامل شعاع خم‌کاری، فشار داخلی و ضریب اصطکاک را مورد تحلیل قراردادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش شعاع خم، سبب افزایش تغییرات ضخامت می‌شود و افزایش فشار داخلی میزان چروک را کاهش می‌دهد. آن‌ها دریافتند که تأثیر ضریب اصطکاک نسبت به سایر پارامترها کمتر بوده و افزایش آن باعث پیدایش چروک در نمونه می‌شود. کمی و همکاران [10] فرایند خم‌کاری فشاری لوله جدار نازک با مقطع مستطیلی را بصورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها تغییرات طول لوله را بر شعاع‌های داخلی، خارجی خم و تغییرات ضخامت لوله در پنج زاویه مختلف خم به صورت شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه کردند. آن محققان دریافتند که با افزایش زاویه خم، مقدار کرنش طولی افزایش می‌یابد. همچنین میزان ضخامت به‌تدریج، در شعاع داخلی خم افزایش، اما در شعاع خارجی خم کاهش می‌یابد و نازک‌شدگی رخ می‌دهد. یانگ و همکاران [11] فرایند خم‌کاری هیدروفرمینگ را برای ساخت قطعات خودرو به صورت شبیه-سازی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که میزان لقی بین لوله و قالب، بر میزان چروکیدگی لوله تأثیرگذار است. همچنین هر چه شعاع خم کمتر باشد، غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع و نازک‌شدگی بیشتر می-شود. وانگ و آگاروال [12] غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامتی دیواره لوله را در فرایند خم‌کاری هیدروفرمینگ لوله، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها دریافتند که با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع و چروکیدگی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه خم‌کاری لوله انجام گرفته است. محققان توانستند با روش‌های مختلف خم‌کاری، میزان چروک احتمالی را در فرایند خم‌کاری کاهش داده و در مواردی چروک را از بین ببرند و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله را در حین فرایند خم‌کاری به حداقل برسانند. هنگامی که نسبت شعاع خم به قطر لوله (R/D) کوچک می‌شود، نمی‌توان با روش‌های معمول در فرایند خم-کاری که در بالا به آن اشاره شد، خم‌کاری لوله را بدون عیب انجام داد. یکی از راه‌های کاهش عیوب در خم‌کاری لوله، استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله است که دارای مزایای بسیار زیادی نسبت به روش‌های قدیمی است. از مزایای این روش می‌توان به بهبود کیفیت سطحی، کاهش تغییرات ضخامت، افزایش استحکام و کاهش هزینه، بخصوص در مورد قطعات پیچیده اشاره کرد.

تاکنون محققان توانستند به حداقل نسبت شعاع خم به قطر لوله (R/D)، 1/5 دست یابند. بررسی‌ها نشان داد که خم‌کاری بدون عیب لوله‌ای با نسبت (R/D) کمتر از 1/5 با روش‌های قبلی امکان‌پذیر نیست. از این رو، در پژوهش حاضر روشی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان لوله‌ای با نسبت شعاع خم به قطر یک را بدون عیب تولید کرد. در این روش، لوله‌ها به صورت انتها بسته تولید شده و سپس در قالب خم قرار گرفته تا با استفاده از فشار سیالی که به جداره‌ها و انتهای بسته لوله اعمال می‌شود، پدیده چروک در لوله حذف شده و غیر دایره‌ای شدن سطح مقطع لوله به حداقل برسد. همچنین با توجه به اینکه تهیه لوله جدار نازک با انتهای بسته مشکل است، در ابتدا لوله‌های انتها بسته بدون درز، به وسیله فرایندهای کشش عمیق و اتوکشی تولید شده و پس از ساخت لوله‌ها، فرایند خم‌کاری فشاری این لوله‌ها تحت زاویه خم 90 درجه با روش جدید، مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفت.



شکل 1 دستگاه استفاده‌شده در آزمایش‌های تجربی

جدول 1 خواص مکانیکی ورق مسی [13]

مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پوآسون	چگالی (kg/m³)
.117	123	0/23	8940

2- مراحل آزمایشگاهی

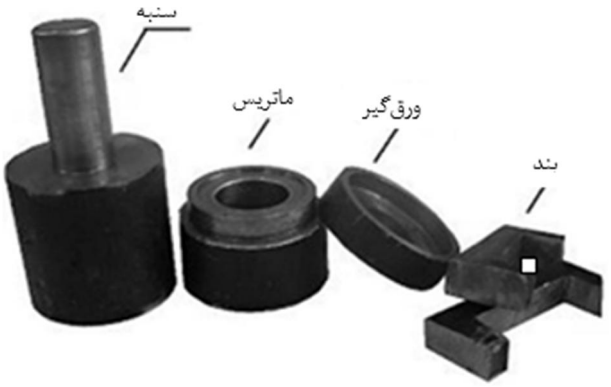
به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG[1] با ظرفیت 600kN که در شکل 1 نشان داده شده است، استفاده شد. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده و سرعت آن تا $200mm.min^{-1}$ قابل تغییر می‌باشد. آزمایش‌ها در سرعت $50mm.min^{-1}$ انجام شده است. برای تولید لوله جدار نازک از ورق مسی با ضخامت اولیه 2mm و قطر اولیه 40mm استفاده شد. جدول 1 خواص مکانیکی را نشان می‌دهد.

لوله جدار نازک مورد استفاده در فرایند خم‌کاری، از طریق دو مرحله کشش عمیق و چهار مرحله اتوکشی تولید شد. شکل 2- الف و ب به ترتیب مجموعه قالب‌های کشش عمیق مرحله اول و دوم را نشان می‌دهد. پس از اتمام فرایند کشش عمیق، با انجام چهار مرحله اتوکشی، از ضخامت نمونه کاسته شده و به طول آن افزوده شد. شکل 2- ج مجموعه قالب‌های فرایند اتوکشی را نشان می‌دهد. به منظور کاهش میزان کار سختی در نمونه، قبل از هر مرحله اتوکشی، عملیات آنیل صورت گرفته است. شکل 3 (مرحله IV تا مرحله VII) نمونه‌های حاصل از چهار مرحله اتوکشی را به ترتیب نشان می-دهد. پارامترهای هندسی لوله انتها بسته شکل داده شده در شکل 4 نشان داده شده است. ابعاد لوله در هر مرحله، نسبت کشش (β) در دو مرحله کشش عمیق و درصد نازک‌شدگی (α) در مراحل اتوکشی متناظر با قطعات شکل داده شده شکل 3، در جدول 2 آورده شده است. در رابطه‌های بکار برده شده برای محاسبه نسبت کشش و درصد نازک‌شدگی جدول 2، D قطر گرده اولیه، D_{out} قطر خارجی لوله در هر مرحله، d قطر لوله در اولین و دومین مرحله درکشش عمیق است. همچنین t_1 ضخامت اولیه و t_2 ضخامت ثانویه قطعه استوانه‌ای شکل داده شده در فرایند اتوکشی هست.

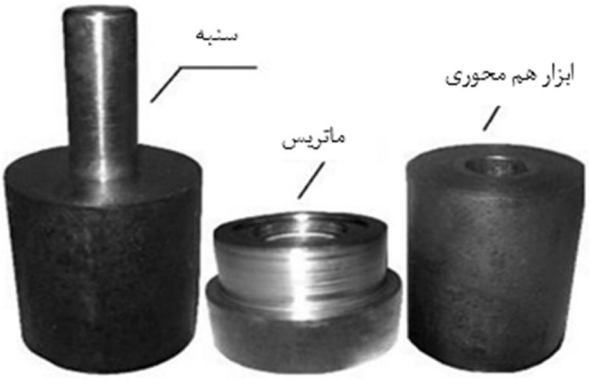
شکل 5- الف شماتیک مجموعه قالب طراحی‌شده برای عملیات خم‌کاری فشاری هیدرولیکی را نشان می‌دهد. مجموعه قالب ساخته شده در شکل 5- ب نشان داده شده است. لوله تولید شده با استفاده از فرایند کشش عمیق و اتوکاری به عنوان ماده اولیه برای فرایند خم‌کاری مورد استفاده قرار گرفت. در انجام آزمایش‌ها، ابتدا لوله میان دو کفه قالب قرار داده می‌شود، سنبه بر روی لوله قرار می‌گیرد و برای ایجاد آب‌بندی از اورینگ روی سنبه استفاده شده است. پس از هواگیری محفظه داخلی لوله، سیال از طریق سوراخی که در سنبه ایجاد گردید، وارد محفظه لوله می‌شود.

1- Dension Mayes Group

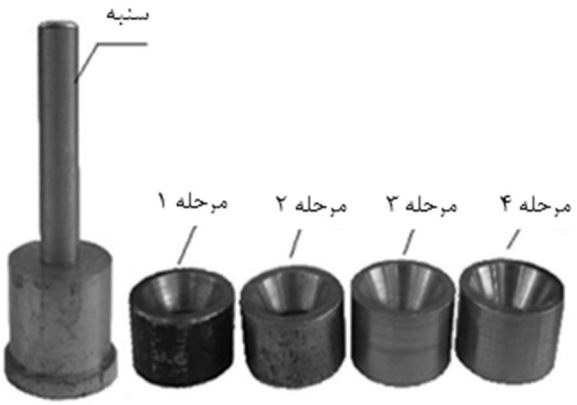
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]



(الف)

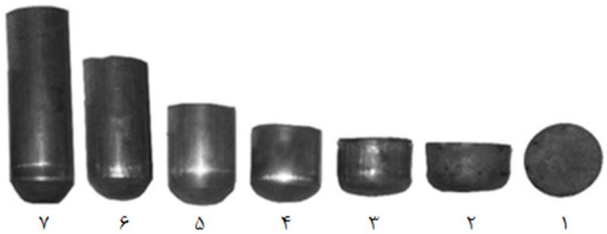


(ب)



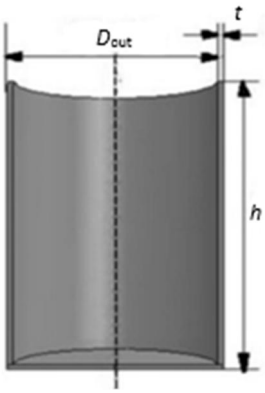
(ج)

شکل 2 الف) قالب کشش عمیق مرحله اول، ب) قالب کشش عمیق مرحله دوم ج) مجموعه قالب‌های مراحل اول تا چهارم اتوکشی

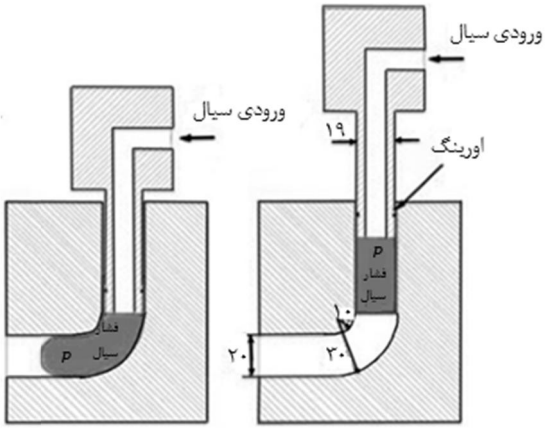


شکل 3 مراحل شکل‌دهی لوله در مرحله 1) ورق اولیه، 2) کشش عمیق مرحله اول، 3) کشش عمیق مرحله دوم، 4) اتوکشی مرحله اول، 5) اتوکشی مرحله دوم، 6) اتوکشی مرحله سوم، 7) اتوکشی مرحله چهارم

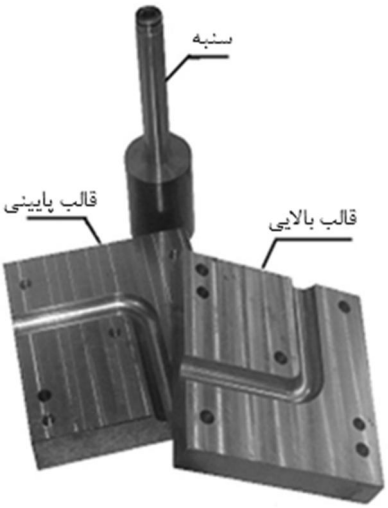
در ادامه، با افزایش فشار در لوله و با استفاده از حرکت سنبه، لوله به سمت جلو حرکت کرده و شعاع خم قالب در لوله ایجاد می‌شود. فشار سیال موجود در محفظه قالب از ایجاد چروک در قطعه جلوگیری می‌کند.



شکل 4 پارامترهای هندسی لوله



(الف)

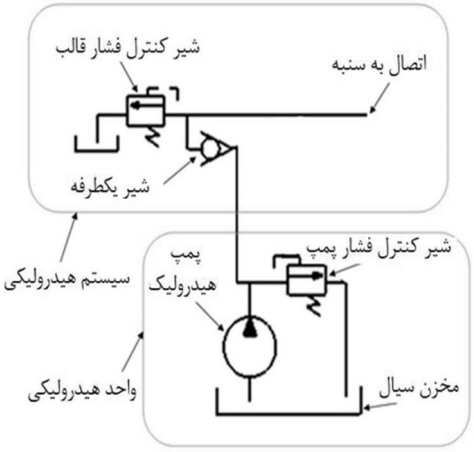


(ب)

شکل 5 الف) شماتیک قرارگیری نمونه در قالب جدید (خم هیدرولیکی لوله)، ب) قالب جدید خم هیدرولیکی لوله

برای تأمین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است که قابلیت اعمال فشار تا حداکثر 30MPa را دارد و دبی آن توسط یک پیچ تنظیم، قابل تغییر است. برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار هیدرولیکی از یک شیر کنترل فشار برای تنظیم فشار نهایی، یک فشارسنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل لوله، یک شیر یک طرفه، سه‌راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. شکل 6 مدار هیدرولیکی استفاده شده را نشان می‌دهد. تجهیزات سیستم هیدرولیکی مربوط به این مدار در شکل 7 نشان داده شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]



شکل 6 مدار هیدرولیک اعمال و کنترل فشار

شکل 7 تجهیزات سیستم هیدرولیکی کنترل فشار

جدول 2 ابعاد لوله شکل داده شده در مراحل مختلف

فرایند	مرحله	D_{out} (mm)	t (mm)	$\beta^1 = D/d$	$\alpha^2 = ((t_2-t_1)/t)*100$
ورق اولیه	I	40	2	-	-
کشش	II	25/6	2	1/56	-
عمیق	III	23	2	1/11	-
اتوکشی	IV	22	1/13	-	25
	V	21/26	0/78	-	25
	VI	20/56	8	-	31
	VII	20	0/5	-	36

1- نسبت کشش/ 2- درصد نازک شدگی

3- مراحل شبیه‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه 6.10.1[1] برای شبیه‌سازی فرایند خم‌کاری استفاده شده است. به دلیل تقارن لوله، فقط نیمی از هندسه لوله در نرم‌افزار مدل شده است. در شکل 8 مدل شبیه‌سازی شده فرایند خم هیدرولیکی لوله به روش جدید نشان داده شده است. در شبیه‌سازی المان محدود این فرایند، لوله به صورت سه بعدی توپر[2] و شکل‌پذیر[3] و اجزای قالب به صورت پوسته‌ای[4] صلب و گسسته[5] در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. خصوصیات مکانیکی لوله مطابق جدول 1 اعمال شده است. از آنجا که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. لوله مسی استفاده شده در شبیه‌سازی، همسانگرد فرض شده است. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح[6] و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی[7] تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب[8] و شرایط تماسی پنالتی[9] برای سطوح استفاده شده است. براساس مرجع [12] ضریب اصطکاک 0/1 و سرعت سنبه ثابت و با توجه به آزمون تجربی 50mm/min اعمال شد. در قسمت بارگذاری، فشار سیال با استفاده از قید فشار به محفظه داخلی لوله وارد گردید. قالب و سنبه با المان R3D4 و لوله با المان C3D8R با اندازه المان 0/0015 شبکه‌بندی شدند. همچنین تعداد سه المان در راستای ضخامت لوله در نظر گرفته شد.

یکی از مهم‌ترین موارد در شبیه‌سازی‌ها، پیش‌بینی پارگی است. در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای بررسی پارگی لوله استفاده شده است [14]. این کمیت با معادله (1) مشخص می‌شود.

$$\text{درصد نازک‌شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (1)$$

در معادله (1)، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی است که از معادله (2) بدست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی (e_r) در شرایط کرنش صفحه‌ای از معادله (3) تخمین زده می‌شود:

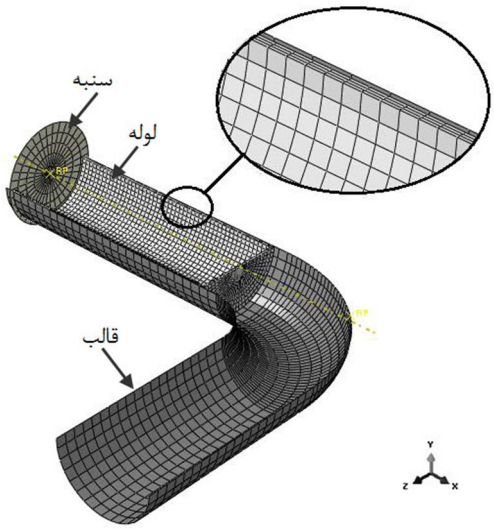
$$e_r = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right)\left(\frac{n}{0.21}\right) \quad (3)$$

که در آن، n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه لوله بر حسب میلی‌متر است. با توجه به برقراری معادله‌های (4) و (5) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ε_r و کرنش ضخامتی ε_t تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_r = ln(1 + e_r/100) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_r \quad (5)$$

با استفاده از معادله‌های (4) و (5) و محاسبه ε_t و ε_r و با جایگذاری ε_t در معادله (2) مقدار t_f بدست می‌آید و آنگاه طبق معادله (1) مقدار حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود.



شکل 8 مدل مونتاژ شده و نحوه مش‌بندی اجزا در شبیه‌سازی فرایند خم‌کاری

1- ABAQUS 6.10.1
2- 3D Solid
3- Deformable
4- Shell
5- 3D Discrete Rigid
6- Surface to Surface
7- Kinematic Contact Method
8- Colomb
9- penalty

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]

حداکثر نازک‌شدگی برای لوله مسی استفاده شده در آزمایش‌ها 39% بدست آمده است.

4- نتایج و بحث

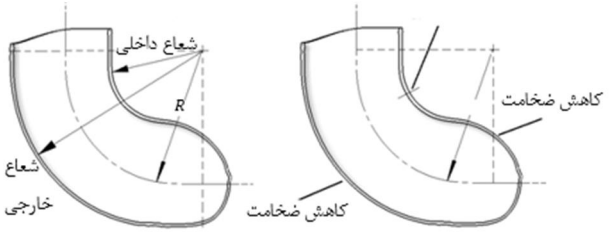
در فرایند خم‌کاری، ضخامت لوله در ناحیه دیواره داخلی به دلیل وجود کرنش‌های فشاری افزایش می‌یابد و بنابراین احتمال ایجاد چروک در این ناحیه وجود دارد. در دیواره خارجی نیز به دلیل وجود کرنش‌های کششی، کاهش ضخامت رخ می‌دهد. همچنین، در ناحیه خم، عموماً قطعه به دلیل کاهش قطر که به‌سبب کشش در دیواره خارجی اتفاق می‌افتد، قالب را پر نمی‌کند. در فرایند جدید ارائه‌شده، در ابتدای دیواره داخلی لوله به دلیل اعمال فشار سیال در قسمت انتهای لوله حین خم‌کاری علاوه بر کرنش‌های فشاری، کرنش‌های کششی نیز ایجاد می‌شود. مقدار کرنش کششی به فشار سیال بستگی دارد که ممکن است در فشارهای بالا در این ناحیه کرنش‌های کششی از کرنش‌های فشاری بزرگ‌تر شده که باعث ایجاد نازک شدگی در این ناحیه می‌شود. در شکل 9 ناحیه‌های بحرانی لوله در فرایند خم‌کاری فشاری هیدرولیکی نشان داده شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه‌هایی است که در اثر کاهش ضخامت در لوله پارگی رخ می‌دهد، یا در اثر افزایش ضخامت چروک در آن ایجاد می‌شود. پژوهش‌های بسیاری برای کاهش میزان چروکیدگی در ناحیه بحرانی لوله انجام شده است اما پژوهشگران تاکنون نتوانسته‌اند چروک احتمالی در این ناحیه را به طور کامل حذف کنند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، چنانچه نسبت شعاع خم به قطر لوله بین 1 تا 1/5 باشد، خم‌کاری با روش‌های معمول قابل انجام نیست. در این پژوهش، قطر لوله (D) 20mm، شعاع خم (R) 20mm و نسبت R/D برابر یک است، بنابراین خم‌کاری لوله با این نسبت به سادگی صورت نمی‌گیرد. همچنین ضخامت کم لوله (0/5 میلی‌متر)، شکل‌دهی را مشکل‌تر می‌کند و امکان پارگی و چروک را در لوله افزایش می‌دهد. یکی دیگر از پارامترهایی که باید در حین خم‌کاری به آن توجه نمود، تغییرات ضخامت دیواره لوله است. در روش جدید ارائه شده در این پژوهش، با انتها بسته کردن لوله، با وجود دشوار بودن شرایط شکل‌دهی، چروک در شعاع داخلی لوله بطور کامل بر طرف شده و تغییرات ضخامت نیز تا حدود زیادی کاهش می‌یابد.

در فرایند خم‌کاری فشاری جدید ارائه شده به روش هیدرولیکی، ابتدا فشار در سطح داخلی لوله اعمال می‌شود. سپس، با جابجایی سنبه و اعمال همزمان فشار سیال در سطح داخلی لوله، عملیات خم‌کاری صورت می‌گیرد. با توجه به نوع فرایند، فشار شکل‌دهی یکی از پارامترهای اصلی در فرایند خم‌کاری بشمار می‌آید. از این رو، شکل‌گیری کامل لوله در قالب با فشارهای مختلف به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به منظور مشاهده نحوه شکل‌گیری نمونه در خم ایجاد شده، نمونه بدون فشار سیال فقط با جابجایی سنبه در قالب شکل داده شد. نحوه شکل‌گیری نمونه در حالت بدون فشار سیال در شکل 10 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل نبودن فشار سیال، با جابجایی سنبه، نمونه چروک شد و شکل قالب را به خود نگرفت.

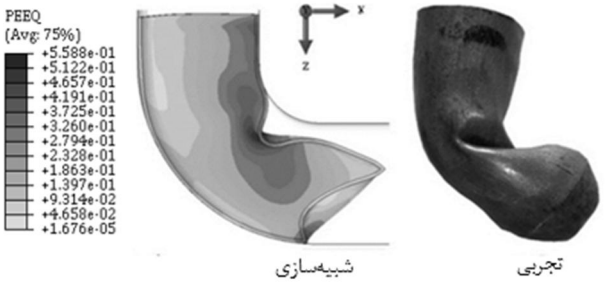
همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده شد، بدون اعمال فشار سیال در سطح داخلی لوله، نمونه در ناحیه شعاع داخل و خارج چروک می‌شود. بنابراین به منظور رفع پدیده چروکیدگی، فشار 10MPa به سطح داخلی لوله اعمال شد. با اعمال فشار سیال به سطح داخلی لوله و با جابجایی سنبه، نمونه شروع به شکل‌گیری کرده و تا حدودی شکل قالب را به خود می‌گیرد اما در این فشار هنوز چروک در ناحیه دیواره داخلی لوله مشاهده می‌شود. این چروکیدگی در شکل 11 نشان داده شده است.

شکل 12 لوله شکل داده‌شده در فشار 15MPa را نشان می‌دهد. در این فشار لوله به طور کامل شکل قالب را به خود نگرفته اما چروکیدگی به میزان زیادی نسبت به فشار 10MPa کاهش‌یافته ولی به طور کامل از بین نمی‌رود و مقداری چروک در شعاع داخلی مشاهده می‌شود. ناحیه چروک شده در شکل 12 نشان داده شده است.

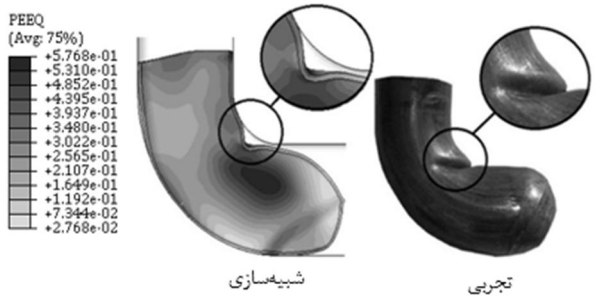
بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، انتظار می‌رفت که در فشار 20MPa، لوله به طور کامل سطح قالب را پر کند و چروک در لوله به طور کامل برطرف شود. بنابراین، شکل‌دهی لوله در این فشار به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 13 قطعه شکل داده‌شده در این فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، چروک در لوله شکل داده شده در فشار 20MPa به طور کامل برطرف شد و دیواره لوله به طور کامل شکل قالب را به خود گرفته است.



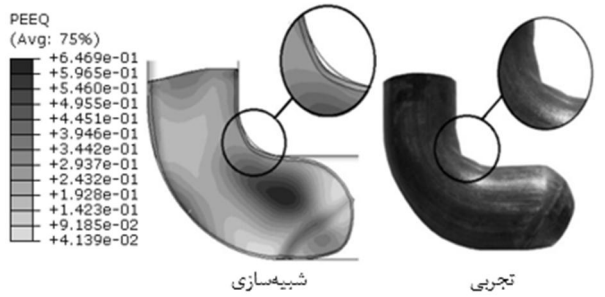
شکل 9 ناحیه‌های بحرانی لوله در فرایند خم جدید



شکل 10 لوله شکل داده‌شده بدون فشار سیال با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

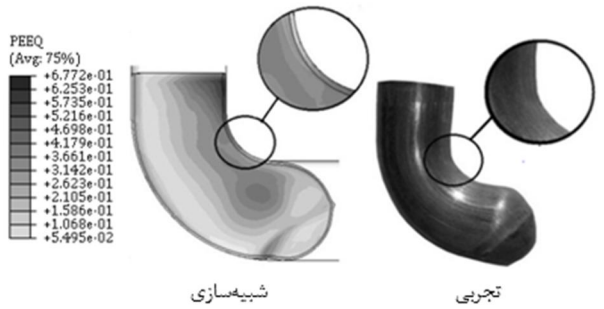


شکل 11 لوله شکل داده‌شده در فشار 10MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

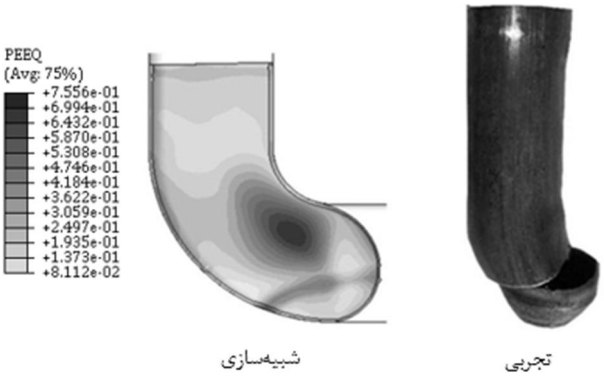


شکل 12 لوله شکل داده‌شده در فشار 15MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]



شکل 13 لوله شکل داده شده در فشار 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm



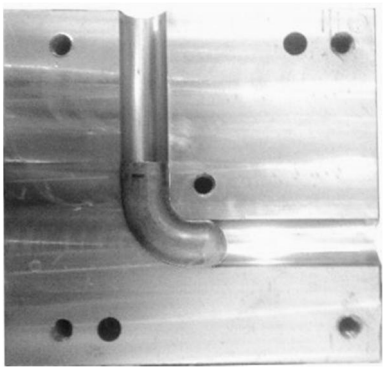
شکل 14 لوله شکل داده شده در فشار 27MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

شکل 14 قطعه شکل داده شده در فشار 27MPa را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به علت بالا بودن میزان فشار سیال، در ناحیه انتهایی قطعه، کرنش‌های کششی زیادی ایجاد شده و لوله در این ناحیه دچار پارگی شده است.

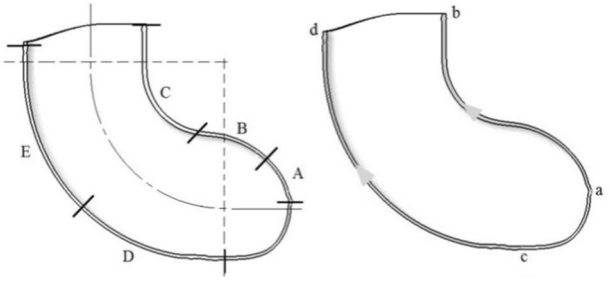
همان‌طور که در شکل‌های 10 تا 14 مشاهده شد در روش ارایه شده خم‌کاری لوله، بدون اعمال فشار هیدرولیک، لوله چروک شده است. با ایجاد فشار هیدرولیک، قطعه شکل قالب را به خود گرفت، اما در شعاع داخلی لوله چروک ایجاد شد. با افزایش فشار، چروک ایجاد شده کاهش یافته و در فشار 20MPa قطعه سالم تولید شد. اما افزایش فشار، باعث افزایش نیروی عمودی و در نتیجه افزایش اصطکاک بین لوله و جداره قالب و سخت‌تر شدن جریان لوله در قالب می‌شود. از طرفی، افزایش فشار باعث افزایش کرنش کششی در انتهای لوله نیز می‌گردد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که در فشار 27MPa، پارگی در ناحیه انتهایی شعاع داخلی خم قطعه ایجاد می‌شود.

شکل 15 قطعه‌ای را در داخل قالب خم نشان می‌دهد که به طور سالم و بدون چروک در آزمایش تجربی شکل گرفت. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، قطعه به طور کامل و بدون چروک شعاع خم را پر کرده و شکل قالب را به خود گرفته است. در این پژوهش، در فشار شکل‌دهی مناسب، پدیده چروک در ناحیه شعاع داخلی قطعه از بین رفته است. علاوه بر این، با وجود بحرانی بودن نسبت شعاع خم به قطر لوله، قطعه توانسته است قالب را به طور کامل پر کند. همچنین، در این روش کاهش قطر لوله در ناحیه خم وجود ندارد.

به منظور بررسی دقیق‌تر، منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی لوله در ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور بررسی ضخامت در دیواره قطعه‌کار، برای شعاع داخلی مسیر ab و برای شعاع خارجی مسیر cd انتخاب شده است. شکل‌های 16- الف و ب به ترتیب مسیرهای انتخاب شده برای اندازه‌گیری ضخامت در ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی و نیز نواحی بررسی شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 15 شکل‌گیری لوله سالم و بدون عیب در قالب در فشار 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm



(ب) (الف)

شکل 16 الف) مسیر اندازه‌گیری ضخامت قطعه‌کار، ب) نواحی بررسی شده

در شکل‌های 17 و 18، منحنی‌های توزیع ضخامت قطعه کار در فشارهای 10، 15 و 20 مگاپاسکال نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت قابل قبولی دارد و حداکثر اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی در دو دیواره داخلی و خارجی، به ترتیب 8 و 10 درصد است.

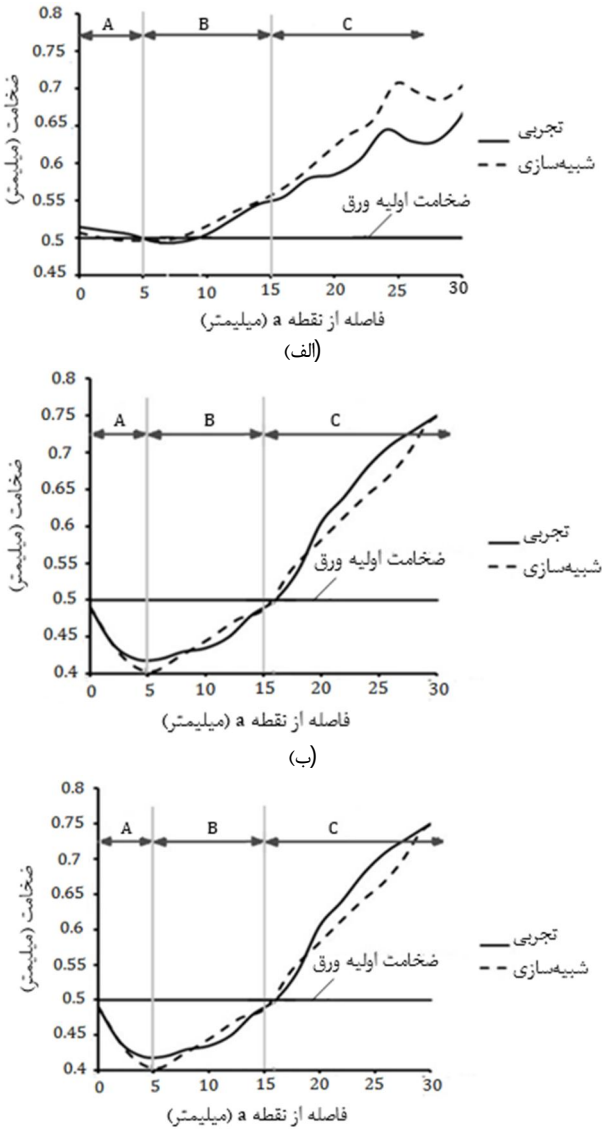
شکل 17 منحنی توزیع ضخامت لوله در ناحیه شعاع داخلی، در سه فشار 10، 15 و 20 مگاپاسکال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ته لوله (a)، ضخامت لوله خم شده با ضخامت اولیه لوله برابر است. در ناحیه A، با افزایش فاصله از نقطه a، نازک‌شدگی در قطعه نیز افزایش می‌یابد. بیشترین نازک‌شدگی در لوله، در فاصله‌ای در حدود 5mm از نقطه a اتفاق می‌افتد. از این نقطه به بعد، نازک شدگی با افزایش فاصله از ته لوله کم می‌شود و در سر لوله مشاهده می‌شود که ضخامت لوله خم شده از ضخامت لوله اولیه بیشتر می‌شود. همچنین از شکل می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش فشار شکل دهی، کاهش ضخامت در نقطه a و ناحیه B بیشتر می‌شود. در شعاع داخلی در ته لوله در ناحیه A، به دلیل اعمال فشار سیال، کرنش‌های کششی بوجود می‌آید که موجب نازک شدگی در این ناحیه می‌گردد. در سر لوله (ناحیه C) که فشار توسط سنبه اعمال می‌شود، کرنش‌های فشاری وجود دارد که موجب افزایش ضخامت قطعه در این ناحیه می‌شود. بیشترین کرنش کششی در فاصله 5 میلی‌متری از انتهای لوله ایجاد می‌گردد و از آن پس کرنش‌های فشاری افزایش یافته و کاهش ضخامت کم می‌شود. در نقطه‌ای در ناحیه C که به فشار شکل دهی بستگی دارد، کرنش کششی با کرنش فشاری برابر شده و ضخامت لوله خم شده با لوله اولیه برابر می‌شود و از آن پس به دلیل نیروی فشاری سنبه، کرنش فشاری بر کرنش کششی غلبه کرده و ضخامت قطعه از ضخامت لوله اولیه بیشتر می‌شود. همان‌گونه که در شکل 17- ج مشاهده می‌شود میزان ضخامت با افزایش فاصله از نقطه a به دلیل افزایش کرنش‌های کششی کاهش یافت.

ضخامت دیواره در فاصله 5mm از نقطه a در فشار 20MPa برابر با

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]

0/42mm بوده است. در ادامه، با افزایش زاویه خم، در ناحیه B میزان کاهش ضخامت کم شده به گونه‌ای که در فاصله 16mm از نقطه a ضخامت دیواره لوله با ضخامت اولیه ورق برابر شده است. از آن پس با غلبه کرنش فشاری بر کرنش کششی میزان ضخامت در ناحیه c تا مقدار 0/75mm افزایش می‌یابد. روند نمودارها در سایر فشارها مشابه بوده و تنها تفاوت موجود در میزان افزایش یا کاهش ضخامت، جابجایی محل بیشترین نازک شدگی و همچنین محل برابر شدن ضخامت اولیه لوله خم شده با ضخامت اولیه لوله می‌باشد.

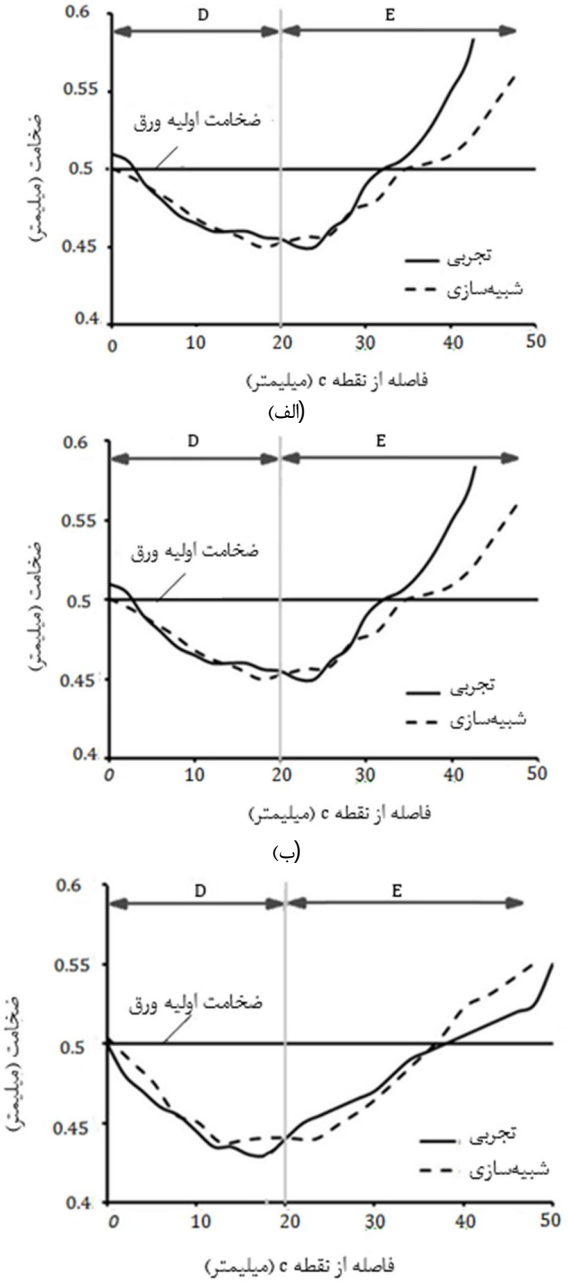
شکل 18 منحنی‌های توزیع ضخامت لوله در ناحیه شعاع خارجی را در سه فشار 10، 15 و 20 مگاپاسگال نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت همانند شکل 17 می‌باشد و تنها تفاوت موجود در این است که کرنش‌های کششی ناشی از شعاع خارجی نیز به کرنش‌های اعمال شده اضافه شده و منطقه کاهش ضخامت یافته در قطعه افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش ضخامت تقریبا در فاصله 20mm از انتهای لوله اتفاق افتاده است. در ابتدای لوله نیز به دلیل کرنش فشاری ناشی از فشار سنبه، کرنش فشاری بر کرنش کششی غلبه کرده و ضخامت لوله خم شده در این قسمت از ضخامت لوله اولیه بیشتر می‌شود.



شکل 17 منحنی توزیع ضخامت لوله در فشارهای الف) 10MPa، ب) 15MPa، ج) 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

با توجه به نمودار شکل 18- ج مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از نقطه c در ناحیه C میزان ضخامت به تدریج کاهش یافت، بگونه ای که در فاصله 18mm از نقطه c مقدار ضخامت به 0/43mm رسید و در ناحیه D میزان ضخامت افزایش یافته و در فاصله 32mm از نقطه c ضخامت دیواره لوله با ضخامت اولیه ورق برابر شده و پس از آن میزان ضخامت به دلیل وجود کرنش‌های فشاری به مقدار 0/58mm رسید. روند این نمودار در شعاع خارجی در سایر فشارها نیز مشابه بوده اما میزان کاهش ضخامت در فشارهای مختلف متفاوت است.

برای بررسی دقیق‌تر، منحنی توزیع ضخامت لوله در حالت شبیه‌سازی، در فشارهای مختلف برای ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی لوله در شکل 20 نشان داده شده است.

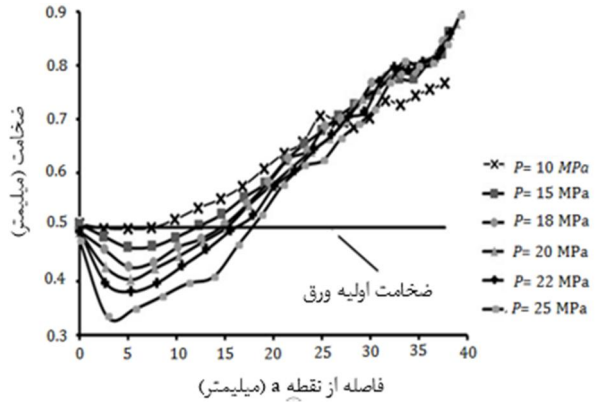


شکل 18 منحنی توزیع ضخامت لوله در فشارهای الف) 10MPa، ب) 15MPa، ج) 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

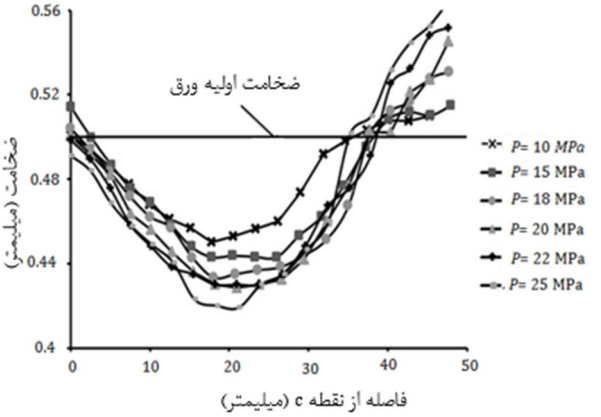
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]

همان‌گونه که اشاره شد و در شکل 19- الف مشاهده می‌شود، در شعاع داخلی با افزایش فاصله از نقطه a، نازک شدگی در قطعه افزایش یافته و بیشترین کاهش ضخامت در فاصله 20mm از انتهای لوله اتفاق می‌افتد و در ادامه میزان کاهش ضخامت کم می‌شود. در نقطه‌ای در ناحیه c، ضخامت لوله خم با ضخامت اولیه لوله برابر می‌شود. با افزایش فشار شکل‌دهی، این ناحیه به سمت انتهای لوله حرکت می‌کند. بیشترین کاهش ضخامت در فاصله 5 میلی‌متری از ته لوله اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که با افزایش فشار شکل‌دهی، مقدار کاهش ضخامت در این نقطه افزایش می‌یابد و در فشار 27 مگاپاسکال پارگی در این ناحیه بوجود می‌آید. کمترین میزان ضخامت در فشارهای 10MPa، 15MPa، 18MPa، 20MPa، 22MPa و 25MPa به ترتیب برابر 0/49mm، 0/47mm، 0/45mm، 0/42mm، 0/38mm، و 0/33mm است، همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان ضخامت دیواره با افزایش میزان فشار کاهش می‌یابد.

در ناحیه شعاع خارجی که منحنی‌های توزیع ضخامت آن در فشارهای مختلف در شکل 19- ب نشان داده شده است، با افزایش فاصله از نقطه c، مانند حالت قبل میزان نازک شدگی ابتدا افزایش و در فاصله تقریبی 20 میلی‌متری بیشترین کاهش ضخامت اتفاق می‌افتد. سپس کاهش ضخامت کم می‌شود. همچنین با افزایش فشار سیال در سطح داخلی قطعه‌کار، میزان نازک شدگی در دیواره خارجی لوله افزایش می‌یابد. اما مقدار کاهش ضخامت نسبت به ناحیه بحرانی شعاع داخلی کمتر است و پارگی در این ناحیه بوجود نمی‌آید. میزان کمترین ضخامت دیواره در فشار 10MPa برابر 0/46mm و این مقدار در فشار 25MPa به مقدار 0/42mm میرسد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان فشار، میزان تغییرات کاهش ضخامت ناچیز بوده است.



(الف)



(ب)

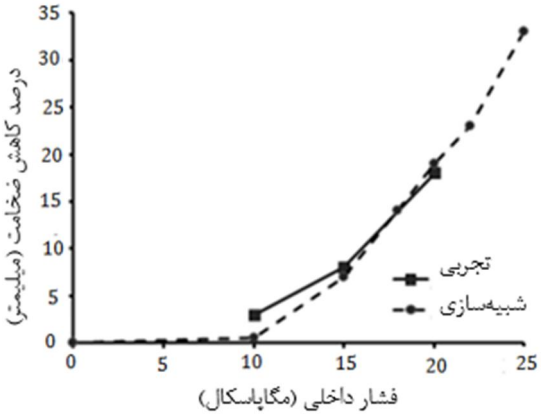
شکل 19 منحنی‌های توزیع ضخامت الف) دیواره داخلی و ب) دیواره خارجی در فشارهای مختلف، حاصل از شبیه‌سازی

شکل 20، درصد کاهش ضخامت را در ناحیه‌های بحرانی شعاع داخلی و شعاع خارجی لوله در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل 20- الف مشاهده می شود در فشار صفر تا 10 مگاپاسکال درصد کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی مقدار بسیار جزئی و نزدیک به صفر می باشد. با افزایش فشار از 10 مگاپاسکال درصد کاهش ضخامت با افزایش فشار با آهنگ تقریباً ثابت زیاد میشود. شکل 20- ب تغییرات درصد کاهش ضخامت برای نقطه با بیشترین کاهش ضخامت در شعاع خارجی را نشان می دهد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فشار داخلی لوله، میزان درصد کاهش ضخامت تا فشار 10 مگاپاسکال با شیب ثابتی تغییر می‌کند و از آن به بعد شیب منحنی کمتر می‌شود. در شعاع خارجی مشاهده می‌شود که درصد کاهش ضخامت مقدار کمی می‌باشد و پارگی در این ناحیه ایجاد نمی‌شود.

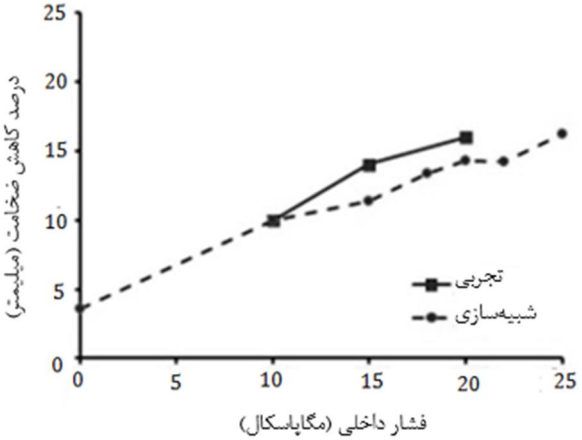
5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش جدیدی برای خم‌کاری فشاری لوله جدار نازک در فرایند خم‌کاری هیدرولیکی لوله، باهدف از بین بردن چروک در شعاع داخلی و دست‌یابی به کمترین تغییرات ضخامت در دیواره لوله ارائه شده است. همچنین اثر تغییرات فشار سیال بر توزیع ضخامت لوله در ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش در زیر آورده شده است:

1. با استفاده از قالب جدید امکان شکل دهی لوله جدار نازک با نسبت R/D یک امکان پذیر است.



(الف)



(ب)

شکل 20 درصد کاهش ضخامت در قطعه در فشارهای مختلف الف) شعاع داخلی، ب) شعاع خارجی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]

2. در قالب جدید علاوه بر شکل دهی قطعه، عیوب چروکیدگی، نازک شدگی و عدم پر شدن قطعه در مقطع خم برطرف شده است.

3. فشار شکل‌دهی پارامتر بسیار مهمی در شکل دهی و رفع عیوب است. در این پژوهش برای خمکاری لوله مورد نظر مشاهده شد در فشارهای کم (کمتر از 10MPa) درقطعه در ناحیه خم چروک با عمق زیاد ایجاد می‌شود. با افزایش فشار میزان چروک کم می‌شود و در فشار 15MPaچروک به مقدار کم بوجود می‌آید و قطعه حفره قالب را به طور کامل پر نمی‌کند. در فشار 20MPa عیوب در نمونه حذف شده و نمونه کامل شکل قالب را به خود گرفته است. در فشارهای بالاتر از 20MPa میزان تغییرات ضخامت افزایش می‌یابد.

4. تغییرات میزان ضخامت در شعاع داخلی و خارجی لوله با افزایش فشار از 10MPa تا 25MPa، افزایش می‌یابد. در شعاع داخلی میزان درصد کاهش ضخامت در شعاع داخلی و خارجی به ترتیب در فشار 20MPa که نمونه شکل قالب را بخود می‌گیرد برابر 18% و 16% می‌باشد.

5. با افزایش فشار داخلی تا فشار 20MPa، چروکیدگی در شعاع داخلی کمتر می‌شود اما با افزایش این فشار از 20MPa، احتمال پارگی لوله بیش‌تر می‌شود به گونه‌ای که در فشار 27MPa نمونه پاره می‌شود.

6- مراجع

[1] H. Yang, Y. Lin, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, *Journal of Materials Processing Technology,* VOL. 152, pp. 363–369, 2004.

[2] J. Fang, S. Lu, K. Wang, J. Xu, X. Xu, Zh.Yao, Effect of Mandrel on Cross-Section Quality in Numerical Control Bending Process of Stainless Steel 2169 Small Diameter Tube, Advances in Materials Science and Engineering 2013, 9Pages, 2013.

[3] 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, pp. 1164–1175, 2007.

[4] H. Li, H. Yang, M. Zhan, R.J. Gu, The interactive effects of wrinkling and other defects in thin-walled tube NC bending process, *Journal of Materials Processing Technology,* VOL. 187-188, pp. 502–507, 2007.

[5] L. Heng, Y. He, A Study on Multi-defect Constrained Bendability of Thin-walled Tube NC Bending Under Different Clearance, *Chinese Journal of Aeronautics,* Vol. 24, pp. 102–112, 2011.

[6] J. Zhiqianga, Zh.Mei, Y. He, X. Xudongb, L. Guangjun, Deformation Behavior of Medium-strength TA18 High-pressure Tubes During NC Bending with Different Bending Radii, *Chinese Journal of Aeronautics,* Vol. 24, pp. 657–664, 2011.

[7] H. Li, H. Yang, M. Zhan, R.J. Gu, A new method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths, *Journal of Materials Processing Technology ,* Vol. 177, pp. 192–196, 2006.

[8] Y.S. Zeng, Z.Q. Li, Experimental research on the tube push bending process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 122, pp. 237–240, 2002.

[9] Y. Zhang, D. Redekop, Shell element simulation of the push method of tube bending, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering,* Vol. 17, pp. 301–304, 2006.

[10] A. kami, B.Molaee, F. Biglari, Finite element simulation of the push bending of rectangular tubes, *The Ninth Conference on Manufacturing, March 3,* 2009. (In Persian)

[11] J.b. Yang, B.h. Joen, S.I. Oh, the bending technology of a hydroforming process for an automotive part, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 111, pp. 175–181, 2001.

[12] J. Wang, R.Agarwal, Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 128, pp. 598–605, 2006.

[13] A. Gorji, Experimental and Finite element simulation method for forming a sharp conical parts, Ph.D. thesis, *Department of Mechanical Engineering, noshirvani uni University,* 2012. (In Persian)

[14] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and exprimental verification, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 146, pp. 137-143, 2004.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.19.0]