ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(06):371-380

Improvement of Rotary Draw Bending of Commercial Pure Titanium Tubes with Resistance Deformation and Using Steel Ball

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Taghizadeh Rami F[1],
Elyasi M[1*].

How to cite this article
Taghizadeh Rami F, Elyasi M. Improvement of Rotary Draw Bending of Commercial Pure Titanium Tubes with Resistance Deformation and Using Steel Ball. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(06):371-380.

[1] Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Correspondence
Address: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran.

elyasi@nit.ac.ir

Article History
Received: November 21, 2021
Accepted: January 24, 2022
ePublished: April 03, 2022

ABSTRACT

In this study, bending of titanium tubes using steel balls in 0.5- and 0.85-mm sizes and resistance heating with experimental and simulation methods have been investigated. For the experiments, titanium tube grade-2 with an outer diameter of 25.4 mm and a thickness of 0.5 mm has been used and to prevent the balls from leaving and applying pressure at the two ends of the tube, the two-head blocking cap and plug of the tube are designed and used. In order to apply temperature in rotatory draw bending of tubes, electric current cables were connected to both sides of the tube, and experiments were performed at room temperatures, 100°C, 200°C, 300°C and 400 °C with a bending ratio of 1.8 and a bending angle of 90 ° was done. After the experiments, cross-sectional distortion, wrinkles, cracking and thickness distribution of bent tubes were investigated. The results of this study showed that in the case of bending at room temperature with and without metal balls, the tubes could not be bent. In the bending process with a constant speed of 0.8 Rad/s, by placing metal balls inside the tube and increasing the temperature 100°C, 200°C and 300°C, the thickening in the intrados of the bent tube decreased by 9.8% and the thinning at the extrados of the bent tube increased by 8.4%. Also, by changing the bending speed from 0.8 to 0.4 Rad/s the cracking defect was eliminated at 400°C. Due to increased pressure due to steel balls in bending area, cross section distortion in tubes decreased by 10.4%. The best bending conditions and the least amount of defects were obtained at 300°C with steel balls.

Keywords Steel balls, Resistance heating, Cross-sectional Distortion, Wrinkling, Thickness Distribution, Cracking

CITATION LINKS

[1] Modelling of hot rotary draw bending for thin-walled titanium alloy tubes. [2] Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide. [3] Effect of mandrel, its clearance and pressure die on tube bending process via rotary draw bending method. [4] Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending. [5] Introducing the method of bending pipes ... [6] Deformation behavior of tube rotary draw bending filled with steel balls. [7] Information fusion algorithm for vehicle state estimation based on extended ... [8] Research on a new process of filler push bending for very thin metal tubes. [9] The Tube Bending Technology of a Hydroforming Process from an Automotive Part. [10] Modelling and Predicting the Deformed Geometry of Thick-walled Pipes Subjected to Induction Bending. [11] Conductive heating during press hardening by hot metal gas forming for curved complex part geometries. [12] Residual stress modeling of warm-bent tight-radius candu feeder bends. [13] The effect of tube bending, heat treatment and loading paths on pricess responses of hydroforming for automobile intercooler pipe: numerical and experimental investigations. [14] High accuracy direct hot bending of hollow profiles", Manufacturing Letters. [15] Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. [16] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. [17] Springback prediction of thick-walled high-strength titanium tube bending. [18] Thermo-mechanical coupled 3D-FE modeling of heat rotary draw bending for large-diameter thin-walled CP-Ti tube.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بهبود خم‌پذیری لوله‌های تیتانیومی خالص با استفاده از شکل‌دهی مقاومتی و ساچمه‌های فولادی به عنوان ماندرل

فاطمه تقی زاده رمی
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
مجید الیاسی*
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در این مقاله، خم‌کاری لوله‌های تیتانیومی با استفاده از ساچمه‌های فولادی در سایزهای ۰/۵ میلی‌متر و ۰/۸۵ میلی‌متر و گرم‌کاری مقاومتی با روش‌های تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده است. برای انجام آزمایش‌ها، لوله تیتانیوم گرید ۲ با قطر خارجی ۲۵/۴ میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده و برای جلوگیری از خروج ساچمه و اعمال فشار در دو انتهای لوله، درپوش‌های مسدود کننده دو سر لوله، طراحی و استفاده شده است. جهت اعمال دما در خم‌کاری کششی دورانی لوله‌ها، کابل‌های جریان الکتریکی به دو طرف لوله متصل گردید و آزمایش‌هایی در دماهای محیط، ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C با نسبت خم ۱/۸ و زاویه خم ۹۰° انجام گردید. پس از انجام آزمایش‌ها، اعوجاج سطح مقطع، چروک، پارگی و توزیع ضخامت لوله‌های خم‌کاری شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این مقاله نشان داد که در صورت خم‌کاری در دمای محیط با ساچمه و بدون ساچمه‌های فلزی، لوله‌ها قابل خم‌کاری نبودند. در فرآیند خم‌کاری با سرعت ثابت ۰/۸ رادیان بر ثانیه، با قرارگیری ساچمه‌های فلزی درون لوله و افزایش دما به دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C و ۳۰۰°C ضخیم‌شدگی در ناحیه داخلی خم ۹/۸ درصد کاهش یافته و نازک‌شدگی در دیواره خارجی خم به میزان ۸/۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین عیب پارگی در دمای ۴۰۰°C با تغییر سرعت خم‌کاری از ۰/۸ به ۰/۴رادیان بر ثانیه برطرف شد. به دلیل افزایش فشار ناشی از ساچمه‌های فولادی در منطقه خم، اعوجاج سطح مقطع در لوله‌ها به میزان ۱۰/۴ درصد کاهش یافت. لوله‌هایی که در دمای ۳۰۰°C به همراه ساچمه‌های فولادی خم شدند دارای بهترین شرایط خم و کمترین میزان عیب بودند.

کلیدواژه‌ها: ساچمه‌های فولادی، گرم‌کاری مقاومتی، اعوجاج سطح مقطع، چروکیدگی، تغییر ضخامت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴
*نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، لوله‌های خم شده با وزن کم و کیفیت بالا در صنایع مختلف کاربرد زیادی پیدا نموده است. همچنین، روش‌های مختلفی برای خم‌کاری لوله با جنس و هندسه‌های مختلف وجود دارد. روش خم‌کاری کششی دورانی یکی از روش‌های ساده و در عین حال پرکاربرد صنعتی است. به‌طوری‌که امروزه حدود ۹۵ درصد عملیات خم‌کاری لوله‌ها با این روش انجام می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع خم‌کاری در صنایع مختلف، محققان بسیاری این فرایند را به صورت عددی، تحلیلی و تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند[1,2].

معصومی و همکاران[3] تاثیر ماندرل انعطاف پذیر، موقعیت مکانی و تغییر فاصله آن برای لوله فولادی AISI304 در روش خم‌کاری کششی دورانی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که استفاده از ماندرل توپی و کاهش لقی آن باعث افزایش نیروی خم‌کاری و بهبود کیفیت خم نهایی شده است.

لازارسکو[4] در مقاله خود به بررسی تاثیر فشار سیال داخلی بر لوله‌های آلیاژی آلومینیوم با روش خم‌کاری کششی دورانی پرداخته است. نتایج این مقاله نشان داد که با افزایش فشار سیال درون لوله، بیضوی شدن سطح مقطع کاهش یافته است. همچنین، نازک‌شدگی دیواره خارجی لوله بیشتر از ضخیم‌شدگی داخلی منطقه خم به دست آمده و در زاویه خم ۹۰° با فشار ۱/۸ مگاپاسکال بهترین کیفیت خم مشاهده شده است.

رجبی و همکاران[5] با قرار دادن ماندرل سیمی درون لوله فولادی به این نتیجه دست یافتند که ماندرل سیمی از کاهش مقطعی ضخامت به میزان ۱۷/۵ درصد جلوگیری می‌کند و همچنین توزیع ضخامت در طول خم یکنواخت می‌نماید، میزان تغییر شکل مقطع ۹۰ درصد کاهش یافته و فرورفتگی شعاع خارجی خم کاملا حذف می‌گردد.

سونگ چائوشی و همکاران[6] لوله‌هایSS201 را با استفاده از ساچمه‌های فولادی در یک سایز مشخص به عنوان ماندرل در خم‌کاری کششی دورانی و در دمای محیط خم کردند. نتایج نشان داد که چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع، با قرارگیری ساچمه‌های فلزی درون لوله کاهش یافت. با اعمال فشار داخلی به ساچمه‌های فولادی درون لوله، ضخیم‌شدگی قسمت داخلی خم لوله کاهش می‌یابد در حالیکه نازک‌شدگی قسمت خارجی خم افزایش یافته است.

ژائو[7] در مقاله خود به این نتیجه دست یافت که شکل‌دهی لوله‌ها با مشکل آب‌بندی ناشی از فشار سیال داخلی مواجه خواهد شد. او پیشنهاد کرد که گرانول‌های جامد به‌جای سیال داخلی لوله جایگزین شود و با این جایگزینی، مشکلات به وجود آمده از آب‌بندی سیال درون لوله در حین شکل‌دهی لوله را برطرف نمود.

چن[8] نیز روند خم‌کاری را با استفاده از فشارِ پرکننده‌ها بر روی انواع لوله‌های فلزی را در دمای محیط مطالعه نمود. در خم‌کاری لوله‌های بدون درز مسی TU1 به این نتیجه دست یافت که ساچمه‌های فولادی دارای مزایایی چون کیفیت خوب، مقاومت در برابر فشار و عاری از هرگونه آلودگی هستند.

یانگ و ژئو[9] با شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری کششی دورانی به این نتیجه دست یافتند که خم‌کاری با ماندرل، مقطع لوله به حالت دایروی نزدیک باقی می‌ماند، اما کاهش ضخامت در انحنای بیرونی می‌تواند قابل توجه باشد.

در مراجع[10-13] محققان در مقالات خود روش‌های مختلف گرمایش برای لوله را در روش‌های شکل‌دهی لوله بررسی نمودند. آن‌ها از ماندرل‌های متفاوتی استفاده نمودند و به این نتیجه دست یافتند که افزایش دما اثر مثبتی در بهبود خم‌کاری و یا شکل‌دهی لوله‌ها خواهد داشت. روش‌های گرمایش لوله مورد استفاده در این

مقالات، گرمایش القایی، گرمایش توسط المنت‌های الکتریکی و عملیات حرارتی بر روی لوله‌ها قبل از فرآیند شکل‌دهی بوده است. در این مقالات برای نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی نتایج تقریبا مشابه حاصل گردیده است. مزایای استفاده از روش‌های مختلف گرمایش در خم‌کاری کششی دورانی و یا دیگر روش‌های شکل‌دهی به این صورت است که جریان ماده به دلیل افزایش دما به طور یکسان صورت خواهد گرفت و باعث می‌شود توزیع ضخامت لوله در حین و بعد از فرآیند به میزان قابل توجهی بهبود یابد. همچنین درصد اعوجاج سطح مقطع لوله کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر مزایای نام برده شده، معایبی نیز به همراه خواهند داشت که باعث شد محققان دیگر روش‌های دیگر گرمایش را با روش خم‌کاری کششی دورانی تلفیق نمایند.

سیمونتو و همکاران[14] با استفاده از روش خم‌کاری کششی دورانی با گرمایش مقاومتی بر روی لوله‌های HSS بر محدودیت‌های موجود در دمای اتاق غلبه نمودند. آنان به فرآیندی با دقت بالاتر، حذف تقریبی پدیده برگشت‌فنری و بهبود خواص مکانیکی ماده دست یافتند.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه خم‌کاری لوله، ماندرل‌های مختلفی درون لوله مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از روش گرمایش مقاومتی در خم‌کاری لوله فولادی استفاده شده است. اما تلفیق روش خم‌کاری کششی دورانی با گرمایش مقاومتی برای لوله تیتانیومی با ساچمه‌های فلزی به عنوان ماندرل تاکنون دیده نشده است. از جمله مزایای مهم ساچمه فولادی به عنوان ماندرل پرنمودن فضای خالی درون لوله، استفاده از ساچمه در دفعات متعدد و خروج آسان آن از لوله پس از فرایند خم‌کاری است. در این مقاله سعی شده است اثر ساچمه‌های فولادی بر هندسه ناحیه خم در حالت گرم بررسی شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله از لوله تیتانیومی خالص گرید ۲ با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر، ضخامت ۰/۵ میلی‌متر (۰/۵ × ۲۵/۴ میلی‌متر) و به طول ۳۵۰ میلی‌متر که عناصر تشکیل دهنده آن در جدول‌های (۱) و (۲) مشخص شده، استفاده شده است.

در فرآیند خم‌کاری از مجموعه قالب که شامل قالب خم، قالب نگهدارنده، قالب فشار، قالب جاروب‌کن استفاده گردیده است. سرعت قالب خم‌کن ۰/۸ رادیان بر ثانیه، ۰/۵ رادیان بر ثانیه و ۰/۴ رادیان بر ثانیه تنظیم شد. برای تمامی آزمایش‌ها سرعت قالب فشار و جاروب‌کن به صورت ثابت صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی تیتانیوم گرید ۲ مورد استفاده در این پژوهش

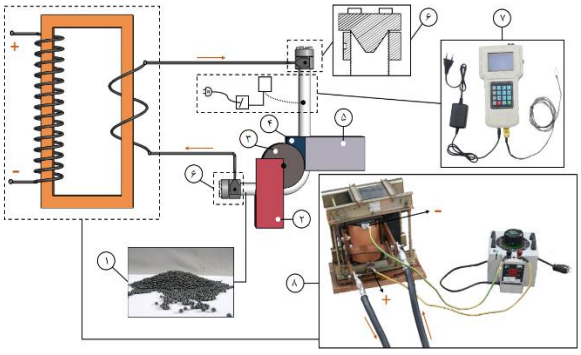
عنصر	Al	V	Cr	Cu	Fe	Mn
درصد	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۳	۰/۰۱	<۰/۰۰۲	۰/۰۳	<۰/۰۰۴
عنصر	Mo	Nb	Sn	Ni	Si	Zr
درصد	<۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۱	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۵
عنصر	Pd	Ru	C	W	Ti	
درصد	۰/۰۰۶	<۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	<۰/۰۱	پایه	

جدول ۲) خواص مکانیکی لوله تیتانیوم

جنس	استحکام کششی		استحکام نهایی	ازدیاد طول	چگالی	کاهش سطح مقطع
	Ksi	MPa	Ksi	%	$\frac{gr}{Cm^3}$	%
تیتانیوم گرید ۲	۶۵	۴۴۸	۸۰	۱۸	۴/۵۱	۳۲

انتخاب سرعت قالب‌ها به گونه‌ای بوده که سرعت نسبی آن‌ها صفر شود و در نتیجه لغزشی بین لوله و قالب‌ها به وجود نیاید. زیرا یکی از وظایف قالب‌های فشار و جاروب‌کن، هل دادن لوله به ناحیه خمش و جلوگیری از نازک‌شدگی بیش از حد است. بنابراین اگر سرعت قالب‌ها به درستی انتخاب نشود، ممکن است سبب عیوبی در خم شود.

مجموعه قالب به همراه لوله و دستگاه گرمایش مقاومتی در شکل (۱) نشان داده شده است. برای کاهش میزان چروکیدگی ناحیه قوس داخلی و دست‌یابی به خم بهینه، دمای لوله افزایش داده می‌شود. برای اعمال گرما به لوله از روش مقاومتی استفاده شده است. با اتصال کابل‌های جریان الکتریکی به دو انتهای لوله، گرمایش مقاومتی در لوله، ساچمه‌ها و درپوش‌های مسدود کننده متصل به دو سر لوله ایجاد می‌گردد و باعث افزایش دمای لوله در حین فرآیند می‌شود.



۱. ساچمه‌های فولادی درون لوله
۲. قالب نگهدارنده
۳. قالب خم‌کن
۴. قالب جاروب‌کن
۵. قالب فشار
۶. درپوش‌های مسدود کننده دو سر لوله
۷. دماسنج دیجیتال
۸. تجهیزات مقاومتی (به ترتیب از سمت راست تصویر واریاک و ترانس)

شکل ۱) شماتیک مجموعه خم‌کاری کششی دورانی مقاومتی با ماندرل ساچمه فلزی

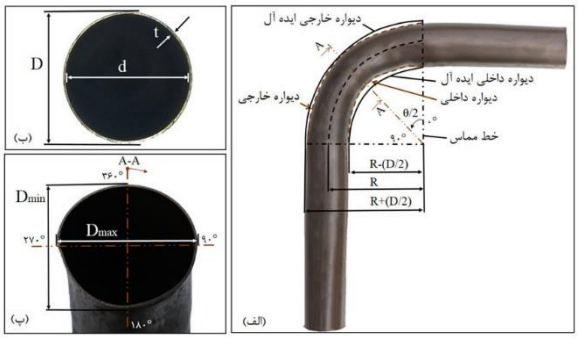
برای اعمال گرمایش مقاومتی از دو دستگاه ترانس و واریاک که در شکل (۱) با شماره ۸ مشخص است، استفاده شده است. در این روش واریاک از برق شهر تک‌فاز با ولتاژ 220 ولت تغذیه شده و خروجی آن ولتاژی متغیر است که از صفر تا 250 ولت بطور پیوسته قابل تغییر بوده و توسط نمایشگری که بر روی آن نصب شده، جریان و ولتاژ خروجی مشخص خواهد شد. خروجی این واریاک به ترانسفورماتور اصلی متصل شده که دارای ۸۸ دور سیم‌پیچ اولیه و ۲ دور سیم‌پیچ ثانویه است. با توجه به مقاومتی که در مسیر خروجی این جریان قرار دارد می‌توان ولتاژ خروجی

واریاک (ورودی به ترانس) را بگونه‌ای تغییر داد که جریان خروجی از ترانس، بطور پیوسته تغییر کند. مقاومت ایجاد شده دمای لوله را افزایش می‌دهد. با تنظیم ولتاژ خروجی واریاک و مشاهده دما توسط دماسنج دیجیتال که نوک پراب آن به یک سمت لوله متصل است، دمای لوله را مشاهده نمود. هنگامی که با تغییر ولتاژ خروجی، هر کدام از دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C بر روی صفحه نمایش دماسنج مشاهده می‌گردد، فرآیند خم‌کاری بر روی لوله‌های تیتانیومی صورت می‌گیرد. برای کنترل دمای لوله و اندازگیری دما در حین فرآیند از دماسنج دیجیتال استفاده شده است که در شکل (۱) با شماره ۷ مشخص شده است.

برای نگهداری ساچمه‌ها درون لوله و اتصال کابل‌های عبور جریان الکتریکی از دو سمت لوله، از درپوش‌های مسدود کننده استفاده شده است. یک طرف درپوش به شکل مخروطی است و قسمت دیگر آن مکمل کننده آن بوده که برای اتصال به دو انتهای لوله دارای سطح صاف است. در شکل (۲) درپوش‌های مسدود کننده قابل نمایش است. با قرارگیری کابل‌های جریان الکتریکی بر روی درپوش مسدود کننده به کمک سیستم پیچ و مهره، جریان الکتریکی از دستگاه مقاومتی به یک سمت لوله وارد شده و از سمت دیگر لوله به دستگاه برمی‌گردد.

شکل ۲) قالب‌های رابط برای اتصال دستگاه مقاومتی به لوله و نگهداری ساچمه‌های فلزی

با تکرار این چرخه و با توجه به جنس لوله که تیتانیوم گرید ۲ است، لوله در مدت زمان کوتاهی به دمای مورد نظر می‌رسد. بعد از گذشت ۵۰ ثانیه لوله تا دمای ۱۰۰°C گرم شده و به ثبات می‌رسد. برای انجام آزمایش در دمای ۲۰۰°C مدت زمان ۷۰ ثانیه نیاز است تا جریان از دو سمت لوله بگذرد. همچنین مدت زمان مورد نیاز برای گرمایش لوله تا دماهای ۳۰۰°C و ۴۰۰°C به ترتیب ۱۱۰ و ۱۴۰ ثانیه است.



شکل ۳) الف- لوله بدون برش، ب- سطح مقطع تغییر شکل نیافته، پ- سطح مقطع تغییر شکل یافته

در این مقاله از قالب خم با شعاع ۴۷/۵ میلی‌متر و نسبت شعاع خم به قطر خارجی لوله (R/D=۱/۸) که در شکل (۱) با شماره ۳ مشخص است، استفاده شده است. قطر ساچمه‌های فولادی مورد استفاده در این پژوهش، در اندازه‌های ۰/۵ و ۰/۸۵ میلی‌متر بوده است.

برای جلوگیری از اتلاف حرارت، لوله توسط پشم سرامیک عایق‌بندی می‌شود. قسمتی از لوله که در دو طرف با درپوش‌های مسدود کننده در تماس است به دلیل عبور جریان الکتریکی بدون عایق بوده اما می‌توان از اتلاف حرارت توسط درپوش‌های مسدود کننده به دلیل تماس آن‌ها با لوله برای عبور جریان الکتریکی صرف نظر نمود.

برای اندازه‌گیری اعوجاج سطح مقطع، در ابتدا نیم‌ساز °۴۵ برای منطقه خم مشخص نموده و لوله‌ها توسط دستگاه وایرکات، برش عرضی داده شده‌اند. برای محاسبه میزان تغییرشکل سطح مقطع لوله بعد از فرآیند خم‌کاری از رابطه (۱) استفاده شده است[15].

$$\psi = \frac{D_{max} - D_{min}}{(D_{max} + D_{min})/2} \qquad (۱)$$

پارامترهای این رابطه در شکل (۳) نشان داده شده است. D_{max} حداکثر قطر خارجی لوله پس از خم‌کاری است که از برش در مقطع قطری لوله بدست می‌آید. D_{min} حداقل قطر خارجی لوله پس از خم‌کاری است که از لوله بدون برش بدست می‌آید. D قطر خارجی لوله، d قطر داخلی لوله و R شعاع خم است.

۳-مراحل شبیه‌سازی

به منظور تحلیل مکانیک تغییر شکل و تعمیم اثر دما و سرعت خم‌کاری در فرآیند خم‌کاری کششی دورانی مقاومتی به همراه ساچمه‌های فلزی، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۲ . ۱۴ .۶ جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. در شبیه‌سازی فرآیند، لوله به صورت سه‌بعدی پوسته‌ای و شکل‌پذیر و اجزای قالب به صورت سه‌بعدی گسسته و پوسته‌ای در نظر گرفته شدند. جنس ماده به صورت همسانگرد فرض شده است. شرایط تماسی از نوع تماس مکانیکی با رفتار مماسی با بیان ریاضی جنبشی استفاده شده است. همچنین برای تعریف تماس‌ها از تماس سطح به سطح

استفاده شده است. به منظور تعریف سطوح قالب، سطح بیرونی لوله به عنوان سطح پایه و سطح قالب‌های خم‌کاری به عنوان سطح پیرو انتخاب شده است. در قسمت تعیین مشخصات سطوح تماس، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. ضرایب اصطکاک بین سطوح قالب‌ها و لوله از نوع پنالتی بوده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول۳) شرایط اصطکاکی بین قالب‌ها و لوله[16,17]

سطوح تماس	ضریب اصطکاک
لوله – قالب نگهدارنده	۰/۶ ("یا خشن(Rough)")
لوله – قالب خم	۰/۱
لوله – قالب جاروب‌کن	۰/۰۵
لوله- قالب فشار	۰/۳

برای دست‌یابی به ضریب اصطکاک بین سطوح قالب و لوله، مدل‌سازی با انواع ضریب اصطکاک انجام شده و نمونه شبیه‌سازی با نمونه تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. ضرایب اصطکاک انتخاب شده، تطابق خوب نمونه تجربی و شبیه‌سازی را نشان داده است.

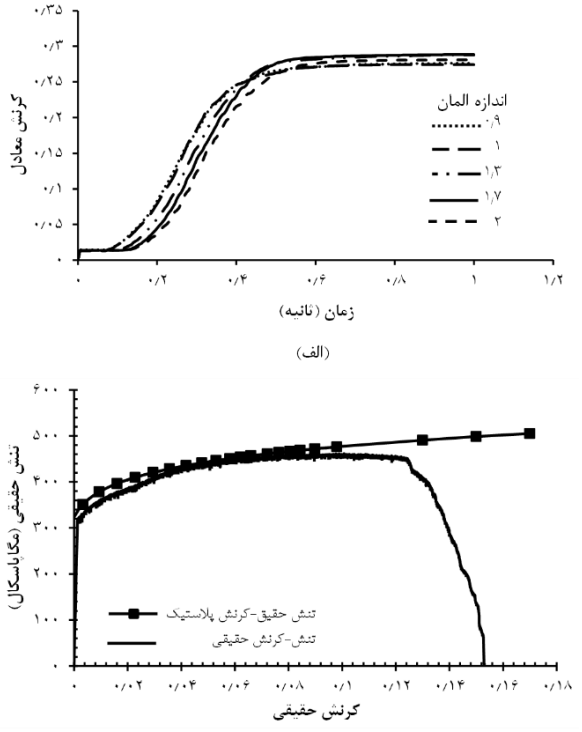
المان‌های لوله از نوع S4R و اندازه تقریبی یک، شبکه‌بندی شده و ۲۷۸۸۷ عدد در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-الف) برای دست‌یابی به اندازه المان مناسب، شبیه‌سازی‌های گوناگونی صورت گرفت و در نهایت اندازه المان پس از بررسی همگرایی کرنش پلاستیک معادل در ناحیه خارجی خم حاصل گردید.

در اندازه المان‌های ۰/۹ و ۱ به دلیل همگرایی کرنش پلاستیک، فرآیند با زمان کمتر انتخاب می‌گردد. با توجه به اینکه زمان انجام فرآیند خم‌کاری در آزمون تجربی ۲، ۳ و ۴ ثانیه است، برای هر تحلیل با تنظیم زمان مورد نظر به ترتیب در حدود ۸، ۱۲ و ۱۶ ساعت به طول می‌انجامد.

در شبیه‌سازی‌ها قطر خارجی و ضخامت اولیه لوله به ترتیب ۲۵/۴ و ۰/۵ میلی‌متر بوده و خم‌کاری تحت نسبت خم ۱/۸ و قرارگیری ساچمه‌های فولادی درون لوله مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

برای تعریف خواص ماده در نرم‌افزار از نمودار تنش-کرنش ماده که از نمونه‌های تست کشش طبق استاندارد ASTM E8M تهیه شدند، استخراج شده است. شکل (۴-ب) نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده را نشان می‌دهد که با استفاده از آن ویژگی‌هایی چون چگالی، ضریب پواسون، مدول الاستیک و رفتار پلاستیک به لوله نسبت داده شدند. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی فرآیند خم‌کاری، قالب‌ها به صورت صلب مدل شده‌اند، خواص مکانیکی به آن‌ها نسبت داده نشد. جنس لوله یک ماده الاستو-پلاستیک با کرنش سختی همسانگرد فرض شده است.

از معادله هولومون برای تعریف کارسختی ماده و از معادله نورتن-هوف برای تحلیل اثر دما و نرخ کرنش بر تنش جریان ماده در دماهای مختلف استفاده شده که مقادیر به‌دست آمده به ترتیب در رابطه‌های (۲) و (۳) پردازش شده است.



شکل ۴) الف- اثر تغییر ابعاد دانه‌بندی بر روی نتایج کرنش پلاستیک معادل برای لوله تیتانیوم گرید ۲، ب- نمودار تنش-کرنش حقیقی تیتانیوم گرید ۲

$$\bar{\sigma} = k\,(\bar{\varepsilon})^n \qquad (۲)$$

$$\bar{\sigma} = C'\,(\bar{\varepsilon})^n\,(\dot{\bar{\varepsilon}})^m \qquad (۳)$$

در نرخ کرنش‌های S^{-1} ۰/۰۰۱، S^{-1} ۰/۰۱ و S^{-1} ۳۰۰ مقادیر جدول (۴) برای دماهای مورد نظر محاسبه شده‌اند.

جدول ۴) خواص مکانیکی تیتانیوم خالص در دماهای مختلف[18]

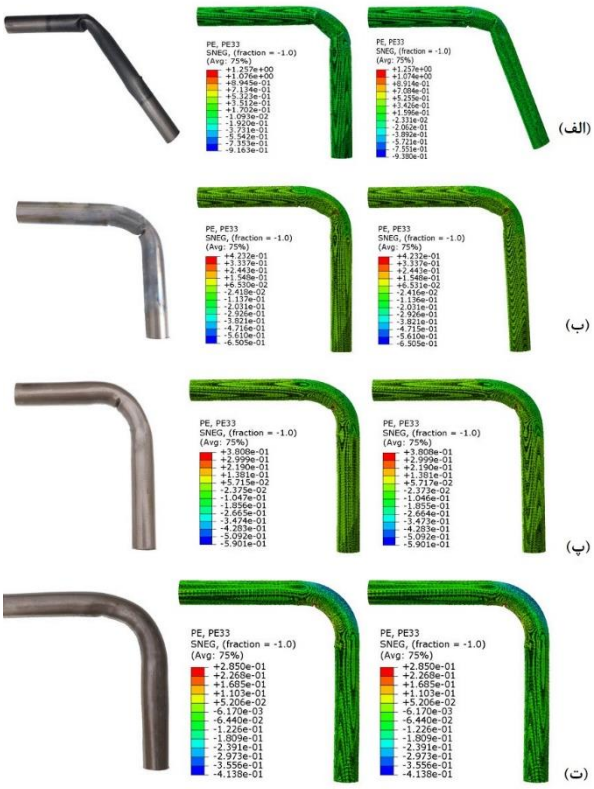
ضریب پواسون	چگالی [ton/mm3]	حساسیت به نرخ کرنش m	نمای کرنش سختی n	ضریب استحکام در حالت گرم [MPa] C'	تنش تسلیم [MPa]	دما [°C]
۰/۴۱	e-۹ ۴/۵۱*	۰/۰۰۷	۰/۰۹	۶۵۰/۲۵	۱۰۵۴۵۰	۲۵
		۰/۰۳	۰/۰۹	۵۵۷/۸۲	۷۳۲۲۰	۱۰۰
		۰/۰۲	۰/۱۵	۵۲۳/۲۱	۶۶۱۰۰	۲۰۰
		۰/۰۰۳	۰/۲۱	۴۸۱/۱۵	۶۱۸۳۰	۳۰۰
		-۰/۰۱	۰/۱۷	۳۵۹/۵۵	۵۴۸۶۰	۴۰۰

در این روابط k ضریب استحکام، C'ضریب استحکام در حالت گرم، n نمای کرنش سختی، m حساسیت به نرخ کرنش، $\dot{\bar{\varepsilon}}$ نرخ کرنش، $\bar{\varepsilon}$ کرنش حقیقی و $\bar{\sigma}$ تنش حقیقی نامیده می‌شوند.

۴- نتایج و بحث

با توجه به آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی انجام شده در دماهای مختلف، توزیع ضخامت در ناحیه قوس خارجی و داخلی خم بررسی شده است. در شکل (۵) بر اساس داده‌های تجربی مشاهده می‌گردد که بعد از استفاده از ساچمه‌های فولادی به عنوان ماندرل

درون لوله، ضخیم‌شدگی و میزان چروک در قوس داخلی کاهش یافته است.



شکل ۵) توزیع کرنش مماسی در سرعت خم‌کاری Rad/s ۰/۸ قبل و بعد از بازگشت فنری در دماهای، الف- محیط، ب- ۱۰۰°C، پ- ۲۰۰°C، ت- ۳۰۰°C

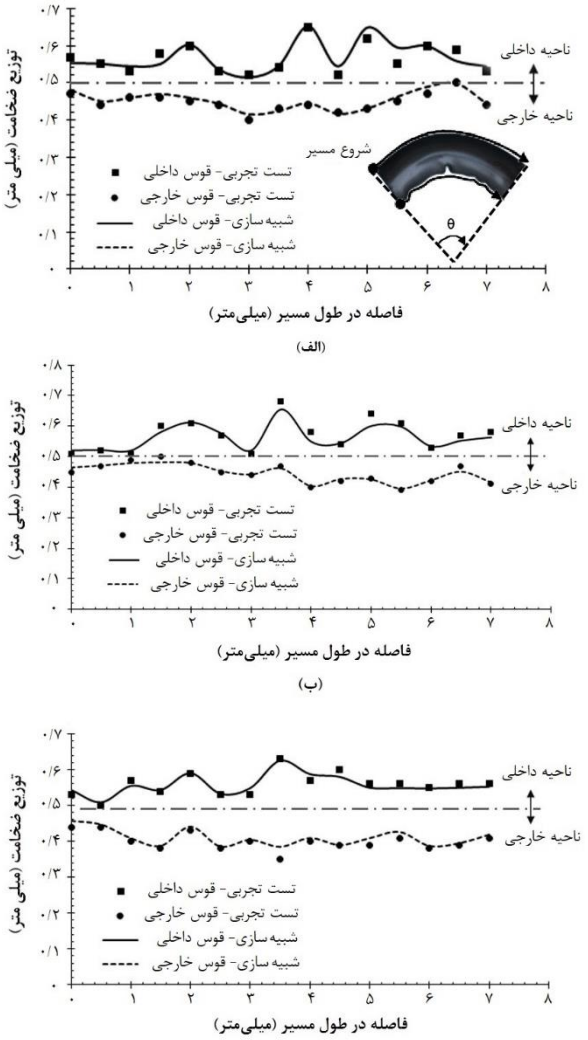
به دلیل شکل‌پذیری پایین فلز تیتانیوم در دمای محیط، لوله دارای لهیدگی شده است. به عبارتی عمق چروک برای لوله در دمای محیط، ۱/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با افزایش دما به میزان ۱۰۰°C، عمق چروک به ۰/۷ میلی‌متر کاهش یافته است. عمق چروک برای لوله‌های با دمای ۲۰۰°C به ۰/۵ میلی‌متر و در دمای ۳۰۰°C با یک فرورفتگی به عمق ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین نتیجه می‌شود با افزایش دما در کنار استفاده از ساچمه‌های فولادی درون لوله، عمق چروک کاهش یافته است.

جهت تایید نتایج شبیه‌سازی، شبیه‌سازی‌هایی مطابق با شرایط واقعی فرآیند در دماهای محیط، ۱۰۰°C، ۲۰۰°C و ۳۰۰°C انجام گردید. توزیع کرنش مماسی در حین فرآیند خم‌کاری کششی دورانی در شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش دما کرنش روند کاهشی داشته و به طور مساوی در منطقه خمش توزیع شده است. بیشترین مقدار کرنش در ناحیه داخلی خم و در قسمت چروک شده لوله مشاهده می‌شود. کمترین مقدار کرنش با توجه به شکل (۵-ت) در ناحیه خارجی خم قابل مشاهده است. همچنین با مشاهده تغییرات کم کرنش مماسی بعد از بروز پدیده برگشت‌فنری نتیجه می‌شود که این پدیده تاثیر آشکاری بر کرنش مماسی ندارد.

با توجه به شکل (۵)، دلیل کاهش چروک داخلی لوله را می‌توان افزایش دما در کنار پر کردن لوله از ساچمه‌های فولادی بیان نمود. در شکل (۶) توزیع ضخامت طولی در طول مسیر خم برای لوله‌های با دمای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C و ۳۰۰°C در حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. مطابق شکل، تغییرات ضخامت بیشینه و کمینه در برش طولی از منطقه خم برای دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما از ۱۰۰°Cبه ۳۰۰°C، ضخامت بیشینه در انحنای داخلی خم از ۰/۶۵ میلی‌متر به ۰/۶۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد، به عبارتی ضخامت بیشینه به اندازه ۴/۶ درصد کاهش یافته است. افزایش دما، ضخامت کمینه در انحنای خارجی را نیز کاهش می‌دهد. با افزایش دما از ۱۰۰°Cبه ۳۰۰°C، ضخامت کمینه به صورت خطی از ۰/۴۱ میلی‌متر به ۰/۳۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش دما، ضخامت کمینه، به اندازه ۱۴/۶ درصد کاهش یافته است؛ بنابراین تاثیر افزایش دما بر نازک‌شدگی، در حدود ۳/۱ برابر بیشتر از تاثیر آن بر ضخیم‌شدگی است. دلیل این تاثیر بیشتر، نداشتن تماس انحنای خارجی خم با قالب‌هاست که سبب شکل‌دهی آزاد انحنای خارجی خم و در نتیجه تغییرشکل بیشتر آن می‌شود، اما در انحنای داخلی خم، دیواره داخلی لوله از یک سمت تحت اثرات اصطکاکی با شیار قالب خم‌کن است که مانع از جریان آسان مواد و تغییرات ضخامت زیاد آن می‌شود. در شکل (۶) درصد اختلاف شبیه سازی با تجربی در تعیین ضخامت، ۲/۷ درصد است.

در شکل‌های (۵ و ۶) اختلاف شبیه‌سازی و تست‌های تجربی کمتر از ۱۰ درصد بوده است؛ بنابراین مدل اجزای محدود طراحی شده می‌تواند فرآیند خم‌کاری را به خوبی پیش‌بینی کند. تست‌های تجربی در نسبت خم ۱/۸ و سرعت خم‌کاری ۰/۸ رادیان بر ثانیه در دماهای محیط، ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C انجام گرفته و برای سایر سرعت‌های خم‌کاری به پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی اعتماد شده است.

نازک‌شدگی ناحیه خارجی لوله و ضخیم‌شدگی ناحیه داخلی مقطع لوله به ترتیب در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۷-الف) بیشترین مقدار نازک‌شدگی قسمت خارجی لوله در منطقه خم از ۲/۶ درصد به ۱۱ درصد افزایش یافته است. همچنین در شکل (۷-ب) بیشترین مقدار ضخیم‌شدگی داخلی از ۱۰/۲ درصد به ۰/۴ درصد کاهش یافته است. به دلیل تحت کشش بودن لوله در ناحیه خارجی خم، نازک‌شدگی قوس خارجی لوله به میزان ۸/۴ درصد افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش دما، ضخیم‌شدگی در قوس داخلی خم کاهش یافته اما نازک شدگی در قوس خارجی خم افزایش می‌یابد. برای بهبود منطقه خم با استفاده از گرمایش مقاومتی، آزمایش‌ها در دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C تکرار نموده و میزان اثرگذاری دما و پر نمودن لوله با ساچمه‌های فولادی بر اعوجاج سطح مقطع بررسی گردید. با قرارگیری ساچمه‌های فولادی درون لوله و انجام فرآیند خم‌کاری

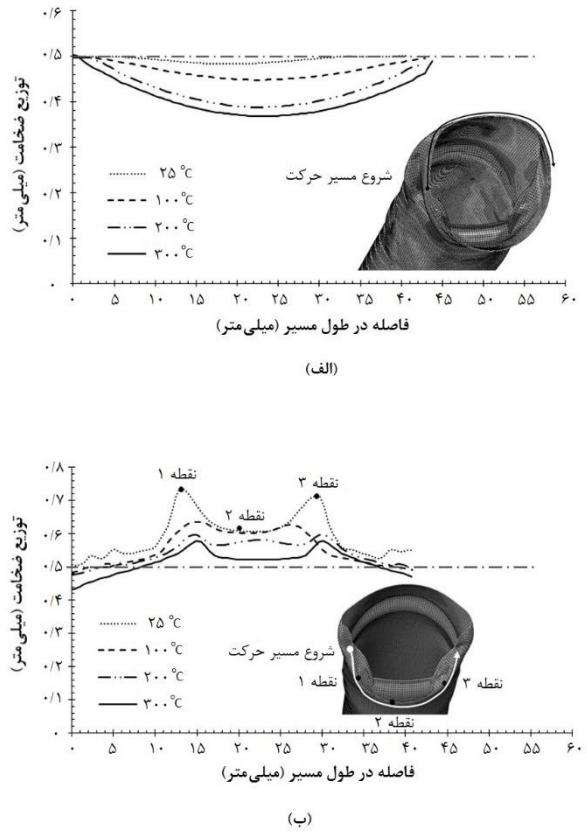


شکل ۶) توزیع ضخامت طولی به صورت تجربی و شبیه سازی در دماهای، الف- ۱۰۰°C، ب- ۲۰۰°C، پ- ۳۰۰°C

کششی دورانی در دمای محیط، لوله خم شده در ناحیه قوس داخلی دچار چروکیدگی می‌شود.

به بیان دیگر علت ایجاد چروکیدگی در لوله‌ها را می‌توان وجود تنش‌های فشاری در ناحیه قوس داخلی بیان نمود. به دلیل اینکه این تنش‌های فشاری خنثی نمی‌شوند و مسیر جریان ماده به درستی در هنگام خم‌کاری هدایت نمی‌شود، چروکیدگی و تغییر شکل‌های نامطلوب در لوله در قسمت داخلی خم به وجود می‌آید. با پر نمودن حجم داخلی لوله از ساچمه و حذف تقریبی فضای خالی بین ساچمه‌ها با استفاده از دو سایز با قطرهای ۰/۵ میلی‌مترو ۰/۸۵ میلی‌متر، فشار داخلی در لوله ایجاد می‌شود که میزان چروکیدگی را به دلیل هدایت مسیر جریان ماده‌ی لوله، کاهش می‌دهد.

تغییر شکل لوله‌های تیتانیومی در محدوده خم بحرانی و در دمای محیط بسیار دشوار و یا غیر ممکن است. اعمال دما و قرارگیری ساچمه‌ها درون لوله به طور همزمان باعث کاهش پدیده چروک و



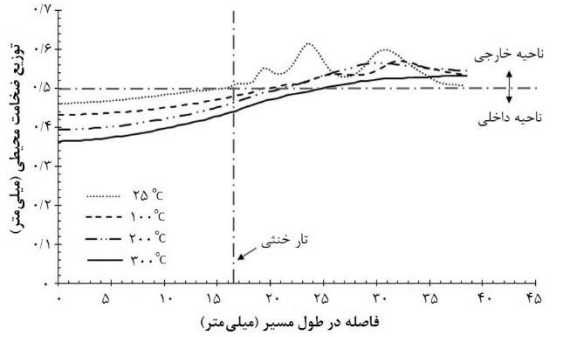
شکل ۷) مقایسه توزیع ضخامت عرضی با سرعت خم‌کاری۰/۸ Rad/s ، الف- نازک‌شدگی، ب- ضخیم‌شدگی

حذف آن خواهد شد.

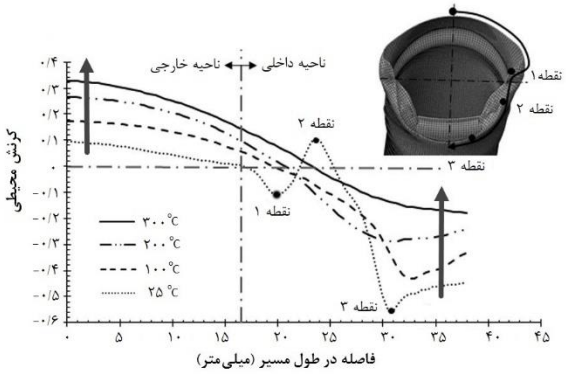
۴-۱- اثر دما و ساچمه‌های فولادی بر توزیع ضخامت لوله

شکل (۸-الف) تاثیر دما و ساچمه‌های فولادی بر توزیع ضخامت سطح مقطع میانی خم در راستای محیطی لوله و در نسبت خم ۱/۸ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بدیهی است مکان تار خنثی برای لوله در دمای محیط در فاصله ۰/۵ میلی‌متر قبل از موقعیت اصلی خود که بر روی شکل (۸-الف) مشخص شده است قرار گرفته است.

برای آزمون در دمای ۳۰۰°C در فاصله ۰/۵ میلی‌متر بعد از موقعیت اصلی تار خنثی قرار دارد. اما موقعیت تار خنثی برای آزمون‌های با دمای ۱۰۰°C و ۲۰۰°C در نزدیکی موقعیت اصلی تار خنثی قرار گرفته‌اند، این مکان موقعیتی است که ضخامت دیواره لوله با ضخامت اولیه آن برابر است. مطابق با شکل (۸-الف) نتیجه می‌شود موقعیت مکان تار خنثی در دمای محیط به ناحیه خارجی لوله نزدیک‌تر بوده و با افزایش دما به موقعیت اصلی تار خنثی حرکت می‌کند و برای دمای ۳۰۰°C به ناحیه داخلی لوله نزدیک‌تر است. محل تقاطع خط افقی با منحنی‌ها و ضخامت‌های کمتر از ۰/۵ میلی‌متر نشان‌دهنده انحنای خارجی و ضخامت‌های بیش از mm5/0 انحنای داخلی خم را نشان می‌دهد. بنابراین جابجایی تار خنثی با افزایش دما به سمت انحنای داخلی خم جابجا می‌شود. شکل (۸-ب) نشان می‌دهد با افزایش دما از دمای محیط تا ۳۰۰°C



(الف)



(ب)

شکل ۸) تاثیر دما و ساچمه‌های فلزی در سرعت خم‌کاری ۰/۸ Rad/s، الف- توزیع ضخامت محیطی لوله، ب- کرنش عرضی

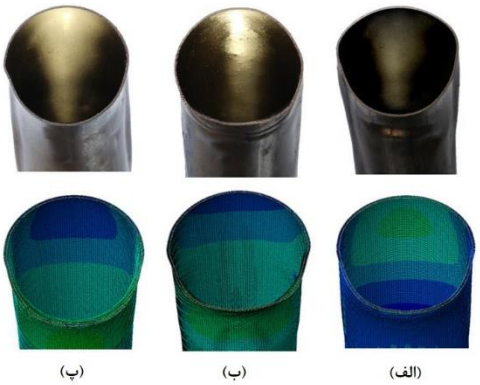
کرنش عرضی در انحنای قوس خارجی، کاهش داشته که به معنای کاهش ضخامت است. نوسان در قوس داخلی به دلیل وجود چین و چروک در قسمت داخلی خم بوده است. در محل تار خنثی با افزایش دما، اندازه کرنش طولی پیوسته افزایش می‌یابد. این افزایش به معنای این است که دیواره لوله در نواحی تار خنثی نازک شده است.

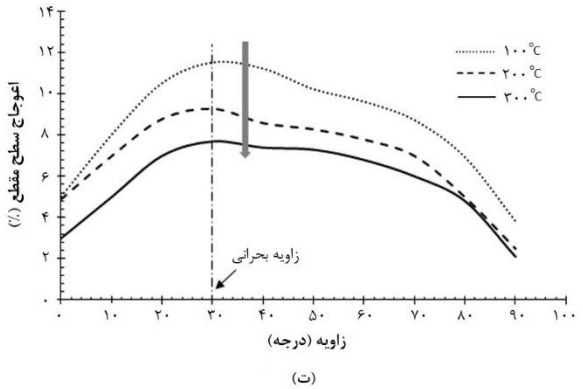
برای مکان‌یابی بیضوی‌شدن بیشینه سطح مقطع حاصل از تقاطع صفحه گذرنده از محور خمش تحت زوایای مختلف θ (شکل ۳- الف) با لوله خمیده را به وجود آورده و مقدار بیضوی‌شدن در آن مقاطع با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

۴-۲- اثر دما و ساچمه‌های فلزی بر روی تغییر شکل سطح مقطع لوله

در شکل‌های (۹-الف)، (۹-ب) و (۹-پ) سطح مقطع لوله با افزایش دما و قرارگیری ماندرل در حالت تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

بیشترین تغییر شکل ناحیه خارجی خم در دمای ۱۰۰°C به همراه ساچمه‌های فولادی به عنوان ماندرل ۱۲/۵ درصد بوده است که در دمای ۳۰۰°C این مقدار به ½ درصد کاهش یافته است. به عبارتی هر چه دما افزایش یابد عیوبی مانند اعوجاج ناحیه خم بهبود خواهد یافت. درصد بیضوی‌شدن مقاطع بر حسب موقعیت زاویه‌ای آن‌ها در شکل (۹-ت) نشان داده شده است. نکته مهمی





(ت)

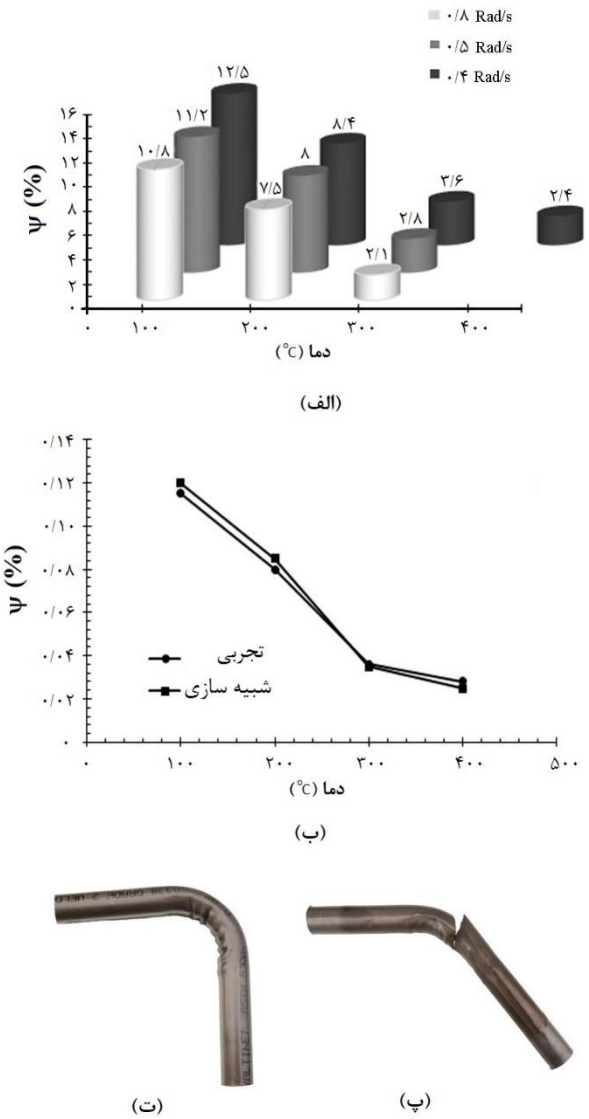
شکل ۹) تغییر شکل سطح مقطع لوله به صورت آزمون تجربی و شبیه‌سازی با سرعت خم‌کاری ۰/۸ Rad/s و در دماهای، الف- ۱۰۰°C، ب- ۲۰۰°C، پ- ۳۰۰°C، ت- درصد بیضوی شدن مقاطع بر حسب موقعیت زاویه‌ای آن‌ها

که از شکل (۹-ت) برداشت می‌شود این است که بیشترین مقدار بیضوی‌شدن، صرف نظر از میزان دمای لوله‌ها، در زاویه حدودی θ=30 رخ می‌دهد.

در زاویه بحرانی (θ=30)، بیضوی‌شدن بیشینه رخ می‌دهد، سطح مقطع لوله در این زاویه معیار ارزیابی کیفیت نهایی قطعه در نظر گرفته شده و طراحی‌های فرآیند و مطالعات بیضوی‌شدن بر اساس مقدار عیب در این مقطع انجام شد. برای بررسی دقیق‌تر، درصد بیضوی‌شدن به ازای هر دما با ۳ سرعت خم‌کاری محاسبه شده و در شکل (۱۰-الف) آورده شده است. از روند نزولی ستون‌های شکل (۱۰-الف) می‌توان به تاثیر مثبت افزایش دما بر کاهش عیب بیضوی‌شدن سطح مقطع پی‌برد.

این روند نزولی با کاهش شیب پیک آن‌ها نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر، افزایش دما اثر مثبتی بر بهبود بیضوی‌شدن دارد. این مقایسه برای آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به صورت نزولی بدست آمده است در شکل (۱۰-ب) قابل مشاهده است.

با توجه به داده‌های تجربی میزان اعوجاج سطح مقطع لوله برای دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C از بیشترین مقدار ۱۲/۵ درصد به کمترین مقدار ½ درصد کاهش پیدا می‌کند. با افزایش دما، میزان ضخامت به تدریج کم می‌شود. در دمای ۱۰۰°C، کمترین و بیشترین قطر به ترتیب ۲۳/۴۸ میلی‌متر و ۲۶/۸۵ میلی‌متر



شکل ۱۰) الف- اثر دما و سرعت خم‌کاری بر درصد بیضوی‌شدن، ب- درصد تغییر شکل سطح مقطع در سرعت خم‌کاری Rad/s ۰/۴، پ- لوله در دمای ۴۰۰°C و سرعت Rad/s ۰/۸ ، ت-لوله در دمای ۴۰۰°C و سرعت Rad/s ۰/۴

اندازه‌گیری شده است. در دمای ۲۰۰°C، کمترین و بیشترین قطر به ترتیب ۲۳/۵۶ میلی‌متر و ۲۵/۶۵ میلی‌متر و در دمای ۳۰۰°C، کمترین و بیشترین قطر به ترتیب ۲۵/۴۳ میلی‌متر و ۲۵/۹۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که در دمای ۴۰۰°C نازک‌شدگی در قوس خارجی خم افزایش یافته و پارگی پس از حدود ۳۰° چرخش رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما تا محدوده‌ی دمایی ۳۰۰°C باعث کاهش ضخیم‌شدگی قسمت داخلی خم و افزایش نازک‌شدگی قسمت خارجی خم برای لوله تیتانیوم خالص خواهد بود.

با توجه به شکل با افزایش دما، منحنی‌ها به سمت پایین انتقال یافته‌اند و به عبارتی مقدار بیضوی‌شدن سطح مقطع به میزان تقریبا ۱۰ درصد کاهش یافته است. با افزایش دما تا حدود ۸۸۳°C تغییر فاز آلفا به فاز بتا رخ خواهد داد. با توجه به شکل‌های (۱۰-پ) و (۱۰-ت) در سرعت خم‌کاری ۰/۸ رادیان بر ثانیه، پارگی در ناحیه خارجی خم در دمای ۴۰۰°C رخ داده است. با کاهش سرعت قالب خم‌کن به ۰/۴ رادیان بر ثانیه، لوله بدون پارگی ولی با تعداد زیادی چروک در ناحیه داخلی، خم شده است. علت پارگی نمونه‌ها در این دما نمی‌تواند تغییر فازی عنوان گردد. بلکه با تغییر سرعت خم‌کاری در روش کششی دورانی، درصد بیضوی شدن سطح مقطع برای نمونه‌های سالم و بدون پارگی در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با کاهش سرعت خم‌کاری از ۰/۸ رادیان بر ثانیه به ۰/۵ رادیان بر ثانیه و ۰/۴ رادیان بر ثانیه، درصد بیضوی‌شدن سطح مقطع افزایش یافته اما با افزایش دما روند نزولی خود را حفظ نموده است.

۵-جمع‌بندی

در این پژوهش تاثیر دما و ساچمه‌های فولادی بر روی برخی عیوب موجود در خم‌کاری کششی دورانی لوله‌های تیتانیومی جدار نازک به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. نتایج کلی این مقاله به شرح زیر است:

۱-ضخیم‌شدگی بیشینه در انحنای داخلی با افزایش دما، روندی کاهشی و نازک‌شدگی بیشینه در انحنای خارجی روند افزایشی داشته است و این روند افزایشی به دلیل عدم تماس انحنای خارجی با قالب، دارای شیب بیشتری نسبت به روند کاهشی ضخیم‌شدگی بوده است؛ بنابراین فشار اعمالی از سمت ساچمه‌های فلزی درون لوله به همراه افزایش دما تاثیر بیشتری بر نازک‌شدگی نسبت به ضخیم‌شدگی داشته است. بیشینه ضخیم‌شدگی و بیشینه نازک‌شدگی در دمای ۳۰۰°C، به ترتیب ۰/۶۵ میلی‌متر و ۰/۳۵ میلی‌متر بدست آمد.

۲- با بررسی شیوه انجام فرآیند خم‌کاری مقاومتی با ساچمه‌های فولادی، به دلیل ایجاد فشار داخلی در منطقه خم با پر نمودن حجم لوله از ساچمه‌ها، چروک ناحیه داخلی لوله کاهش می‌یابد. بنابراین چروکیدگی که در دمای محیط منجر به چروک با عمق ۱/۲ میلی‌متر در منطقه خم اندازه گیری شده بود با استفاده از ساچمه‌های فولادی و افزایش دما، به فرورفتگی با عمق ۰/۱ میلی‌متر بهبود پیدا می‌کند.

۳- با مطالعه فرآیند خم‌کاری مقاومتی، به کمک شبیه‌سازی المان محدود و آزمون‌های تجربی مشخص گردید که بر اثر افزایش دما و پر نمودن لوله از ساچمه‌های فلزی، تغییر شکل سطح مقطع ناحیه خم در دماهای پایین، بیشتر از ۱۰ درصد بوده در حالی که با افزایش دما، میزان اعوجاج سطح مقطع به ۰/۵ درصد می‌رسد.

۴- بیضوی‌شدن بیشینه صرف نظر از میزان دمای لوله‌ها، در سطح مقطع با زاویه $\theta=30$ رخ می‌دهد. کمترین مقدار بیضوی‌شدن قابل دستیابی در دماهای ۱۰۰°C، ۲۰۰°C و ۳۰۰°C به ترتیب ۱۰/۸ درصد، ۷/۵ درصد و ۲/۱ درصد است. این روند نزولی نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر، بر میزان اثر مثبت دما و ماندرل روی بهبود

بیضوی‌شدن افزوده می‌شود، همچنین مقدار بیضوی شدن با کاهش سرعت خم‌کاری، افزایش یافته است.

۵- با بررسی پارامترهای چروکیدگی و اعوجاج سطح مقطع نتیجه گرفته شد که افزایش دما موجب بهبود پارامترهای خم‌کاری خواهد شد. بنابراین با بررسی اثر دما، ساچمه‌های فولادی و سرعت قالب خم‌کن بر فرآیند خم‌کاری کششی دورانی مقاومتی، بهترین حالت برای شکل‌دهی لوله تیتانیومی جدار نازک گرید ۲ به همراه ساچمه‌های فولادی به عنوان ماندرل دمای ۳۰۰°C و سرعت خم‌کاری ۰/۸ رادیان بر ثانیه محاسبه شده است.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است

منابع

1- E. Simonetto, G. Venturato, A. Ghiotti and S. Bruschi, "Modelling of hot rotary draw bending for thin-walled titanium alloy tubes.," International Journal of Mechanical Sciences, 2018;148:698–706.

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

3- H. Masoumi, Y. Mirbagheri, R. Jafari Nedoushan, M. Salem and M. Kalantari, "Effect of mandrel, its clearance and pressure die on tube bending process via rotary draw bending method," Int J of Advanced Design and Manufacturing Technology, vol. 5, no. 5, pp. 47-52, 2012.

4- L. LĂZĂRESCU, "Effect of internal fluid pressure on quality of aluminum alloy tube in rotary draw bending," Int J Advanced Manufacturing of Technology, pp. 64:85-91, 2013.

۵- رجبی، محمدرضا؛ رضایی‌زاده، مسعود؛ احمدی بروغنی، سید یوسف؛ "ارائه روش خم‌کاری لوله‌ها به کمک ماندرل سیمی به عنوان روشی جدید" ، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، جلد ۲۹، شماره۲، صفحه۱۱۹-۱۲۸، ۱۳۹۷.

6- Shi SC, Yang LF, Guo C. Deformation behaviors of tube rotary-draw bending filled with steel balls. InAdvanced Materials Research 2011 (Vol. 328, pp. 1403-1407). Trans Tech Publications Ltd.

7- Zong C, Pan Z, Hu D, Zheng H, Xu Y, Dong Y. Information fusion algorithm for vehicle state estimation based on extended Kalman filtering. Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering. 2009;45(10):272-7.

8- Shi SC, Yang LF, Guo C. Deformation behaviors of tube rotary-draw bending filled with steel balls. InAdvanced Materials Research 2011 (Vol. 328, pp. 1403-1407). Trans Tech Publications Ltd.

9- Yang JB, Jeon BH, Oh SI. The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part. Journal of Materials Processing Technology. 2001; 111(1-3):175-81.

10- Collie GJ, Higgins RJ, Black I. Modelling and predicting the deformed geometry of thick-walled pipes subjected to induction bending. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2010; 224(4):177-89.

11- Bach M, Degenkolb L, Reuther F, Psyk V, Demuth R, Werner M. Conductive Heating during Press Hardening by Hot Metal Gas Forming for Curved Complex Part Geometries. Metals. 2020; 10(8):1104.

12- Ding Y, Yetisir M. Residual stress modeling of warm-bent tight-radius CANDU feeder bends. InASME Pressure Vessels and Piping Conference 2008 (Vol. 48302, pp. 449-455).

13- Ma Y, Xu Y, Zhang S, Chen D, El-Aty AA, Li J, Zhao Z, Chen G. The effect of tube bending, heat treatment and loading paths on process responses of hydroforming for automobile intercooler pipe: numerical and experimental investigations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017; 91(5):2369-81.

14- Simonetto E, Ghiotti A, Bruschi S. High accuracy direct hot bending of hollow profiles. Manufacturing Letters. 2021; 27:63-6.

15- Roein M, Elyasi M, Mirnia MJ. Introduction of a new method for bending of AISI 304L stainless steel micro-tubes with micro-wire mandrel. Journal of Manufacturing Processes. 2021; 66:27-38.

16- Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Association State, Highway and Transportation Officials Standard, AASHTO No.: T68, An American National Standard. Last previous edition approved 2016 as E8/E8M – 16.

17- Song F, Yang H, Li H, Zhan M, Li G. Springback prediction of thick-walled high-strength titanium tube bending. Chinese Journal of Aeronautics. 2013 ;26(5):1336-45.

18- Zhang Z, Yang H, Li H, Tao Z, Wang D. Thermo-mechanical coupled 3D-FE modeling of heat rotary draw bending for large-diameter thin-walled CP-Ti tube. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014; 72(9):1187-203.