

بررسی تحلیلی، تجربی و شبیه‌سازی تاثیر فشار داخلی فرآیند هیدروفرمینگ، بر بیلوزهای فلزی تولید

شده از لوله‌های جدار نازک فولاد ضد زنگ 316L

مهدی عرب بیگی^{۱*}، مهران مرادی^۲، بوذرجمهر قاسمی^۳، مجید ستار^۴

تاریخ دریافت: ۱۵ اسفند ۹۱ تاریخ پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۹۲

چکیده

یکی از روشهای تولید بیلوز، هیدروفرمینگ است. از آنجا که برخی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ نظیر فشار داخلی روی خواص نهایی بیلوزهای تولیدی مانند پارگی، چروک‌شدگی و تغییر ضخامت دیواره تاثیر می‌گذارد، در این پژوهش به بررسی اثر این پارامتر در کیفیت نهایی بیلوزهای تولیدی پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی فرآیند از نرم افزار ABAQUS/Explicit version 6.9 استفاده شده، همچنین آزمایشهای تجربی جهت بررسی اثر این پارامتر انجام گردیده است. نتایج بدست آمده از روشهای تحلیلی، اجزاء محدود و تجربی در این مقاله، مطابقت خوبی با هم دارند. همچنین نتایج این تحقیق می‌تواند جهت تخمین فشار شکل‌دهی مناسب، در طراحی یک بیلوز جدید مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: بیلوز، هیدرو فرمینگ، روش المان محدود، فولاد ضد زنگ 316L.

۱. مقدمه

شامل بهبود خواص مکانیکی، کاهش وزن، فرم‌دهی قطعات پیچیده، نرخ تولید بالا، هزینه کم محصول ودقت ابعادی بهتر در مقایسه با سایر فرآیندها می‌باشد [۲].

لی (۲۰۰۲) مطالعات پارامتریک روی عوامل فرآیند شکل‌دهی بیلوزها با استفاده از روش اجزاء محدود انجام داد. به بیان او بیلوزهای فلزی در چهار مرحله Ironing, Deep drawing, Tube bulging و Folding ساخته می‌شوند [۳].

کانگ (۲۰۰۷) تحقیقاتی در مورد فرآیند شکل‌دهی بیلوزهای لوله‌ای به اشکال مختلف و با استفاده از یک مرحله فرآیند تیوب هیدروفرمینگ انجام داده است. او اشاره کرد فشار داخلی مناسب همراه با بارگذاری محوری از پارگی ناگهانی حین عملیات هیدروفرمینگ به دلیل توزیع یکنواخت جریان مواد جلوگیری می‌کند موسوی مشهدی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به مطالعه بر روی ساخت بیلوزها پرداختند. آنها اشاره کردند که کیفیت تولید بیلوز به طور چشمگیری به فشار داخلی حین عملیات

بیلوزهای فلزی کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا، میکرو-الکترومکانیکال، پتروشیمی، صنعت هسته‌ای و سیستمهای صنعتی دارند. از جمله روشهای کنونی تولید بیلوز می‌توان به رول فرمینگ و جوشکاری دیسک اشاره نمود که هر کدام محدودیتهای خاص خود را دارد. در این پژوهش روش جدید تولید بیلوزهای فلزی با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ و به طور خاص تیوب هیدروفرمینگ که نیازمند کنترل همزمان فشار داخلی و سرعت بارگذاری محوری است [۱]، مورد بررسی قرار می‌گیرد. هیدروفرمینگ در تولید قطعات در سالهای اخیر کاربرد زیادی پیدا کرده که از جمله می‌توان به ساخت قطعات در صنایع خودروسازی، خانگی و صنایع هوافضا اشاره نمود. فرآیند تیوب هیدروفرمینگ، شکل‌دهی لوله (مستقیم یا پیش خمش) به اشکال پیچیده حفره قالب، با استفاده همزمان فشار داخلی و نیروی فشاری محوری از دو یا یک طرف است. مزایای این فرآیند

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد maarabbeigi@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

۳. دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

است [۵]. سرعت حرکت سنبه برای جمع شدن قالب حدود ۱۰ میلیمتر بر ثانیه بوده و عمل جمع شدن قالب در حدود ۵ ثانیه صورت می‌گیرد. در این حالت علاوه بر فشار داخلی، حرکت فیکسچر نگهدارنده لوله نیز کمک به شکل‌دهی و جمع شدن بیلوز در طی فرآیند شکل‌دهی می‌کند. فاصله هر پره قالب در ابتدا ۷/۵ میلیمتر می‌باشد و کل فضای خالی بین کفشکها ۴۵۰ میلیمتر است.

لوله بیلوز از جنس فولاد ضد زنگ 316L می‌باشد که ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ابعاد آن به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ذکر شده‌اند:

جدول (۱): درصد عناصر آلیاژی لوله 316L

کربن	<0.035%
منگنز	<2.00%
فسفر	<0.045%
گوگرد	<0.03%
سیلیس	<1.00%
کروم	16-18%
نیکل	10-14%
مولیبدن	2-3%

جدول (۲): خواص مکانیکی (بر اساس تست کشش)، ابعاد و ضریب اصطکاک لوله 316L

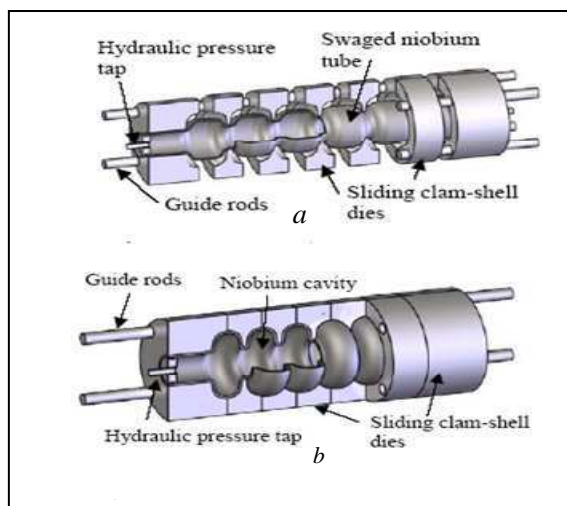
ضریب کرنش سختی	n	0.261
ضریب استحکام	K(Mpa)	211
استحکام کشش نهایی	UTS(Mpa)	562
استحکام تسلیم	Y.S(Mpa)	232
مدول الاستیسیته	E(Gpa)	200
ضریب پواسون	ν	0.33
جرم حجمی	$\rho(Kg/m^3)$	8000
شعاع لوله (mm)	r	6.1
ضخامت لوله (mm)	t	0.12
فاصله صفحات حلقوی قالب (mm)	D_c	7.5
ضخامت صفحات حلقوی قالب (mm)	t_d	1
طول لوله (mm)	L_o	100
ضریب اصطکاک	μ	0.05

هیدروفرمینگ وابسته است، بدین ترتیب که در فشار پایین‌تر از حد نرمال لوله چروک خورده و در فشار بالاتر از حد مجاز لوله پاره می‌گردد [۴].

۲- نحوه تولید بیلوزها

جهت هیدروفرمینگ بیلوز ابتدا لوله بر روی نازل و فیکسچر دستگاه قرار گرفته و سپس دو نیمه قالب بسته شده و بعد از قفل شدن مناسب نیمه‌های قالبها در یکدیگر، سیال به داخل لوله تزریق می‌شود. اثر همزمان دو عامل، یکی جمع شدن پره‌های پوسته‌ای حلزونی لغزنده قالب و دیگری فشار سیال داخل لوله سبب تولید بیلوز می‌شود (شکل (۱)).

در مرحله اول در حالی که قالبها بسته‌اند و لوله درون آن قرار دارد، فشار داخلی حدود ۴۰ بار در مدت زمان ۰/۴ ثانیه به طور خطی به داخل لوله اعمال می‌شود. در این حالت دو سر لوله ثابت است.



شکل (۱): نمای شماتیک قالب تولید بیلوز با استفاده از فرآیند تیوب

هیدروفرمینگ [۶]

(a) قبل از جمع شدن پره‌های پوسته‌ای حلزونی لغزنده قالب

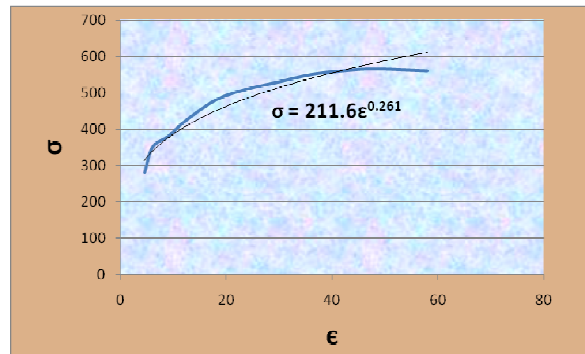
(b) بعد از جمع شدن پره‌های پوسته‌ای حلزونی لغزنده قالب

در مرحله دوم، فشار داخلی بین ۹۵~۱۰۰ بار به صورت خطی در ۵ ثانیه به طور ناپیوسته همزمان با جمع شدن پره‌های پوسته‌ای حلزونی لغزنده قالب به لوله اعمال می‌شود. تحقیقات ثابت کرده فشار نوسانی جهت توسعه قابلیت شکل‌دهی، به دلیل انبساط یکنواخت و جلوگیری از لاغری موضعی بسیار مناسب

$$P_{\text{calibration}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \left[\ln \frac{r_b}{r_b - t} \right] \quad (3)$$

شکل (۲) نمودار تنش، کرنش فولاد ضد زنگ 316L را

نشان می‌دهد:



شکل (۲) نمودار تنش کرنش (تنش سیلان) لوله 316L

در روابط بالا:

t_0 ضخامت اولیه دیوار لوله (mm)

D_0 قطر لوله (mm)

D_p قطر تشکیل شده (mm)

r_b کوچکترین شعاع گوشه قالب (mm)

σ_f تنش سیلان ماده (Mpa)

σ_y استحکام تسلیم ماده (Mpa)

σ_u استحکام کششی نهایی ماده (Mpa)

۳- محاسبه فشار شکل دهی به روش تحلیلی :

موفقیت در فرآیند تیوب هیدروفورمینگ به عوامل زیر وابسته

است [۷]:

(۱) شرایط بارگذاری (فشار داخلی و بارگذاری محوری در

واحد زمان)

(۲) شرایط روانکاری

(۳) قابلیت شکل دهی

ترکیب مناسبی از متغیرهای ذکر شده باعث جلوگیری از

مواردی شامل چروکیدگی، تحت فشار بودن، بادکردگی (پیچش

یا کمانش) و یا ترکیدگی قطعه تولیدی است. از نتایج تجربی

مشاهده می‌شود که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای فرآیند تولید

بیلوز به روش هیدروفورمینگ، فشار سیال می‌باشد. افزایش فشار

منجر به لاغری شدید در جداره‌های بیلوز تولیدی و حتی پارگی

می‌گردد. بدیهی است فشار مناسب، منجر به رسیدن به قطر

خارجی مطلوب و توزیع ضخامت مناسب می‌گردد.

برای محاسبه فشار تسلیم، فشار پارگی و فشار کالیبراسیون

در فرآیند تیوب هیدروفورمینگ از روابط زیر استفاده می‌شود [۷]:

$$p_{\text{yield}} = \sigma_y \frac{2t_0}{D_0 - t_0} \quad (1)$$

$$P_{\text{bursting}} = \sigma_y \frac{2t_0}{D_0 - t_0} \quad (2)$$

با توجه به روابط بالا فشار فرم‌دهی اولیه لوله بیلوز 46 bar، فشار پارگی لوله بیلوز 135 bar و فشار فرم‌دهی نهایی بیلوز 86.5 bar بدست می‌آید.

۴- آزمایشات تجربی:

با ساخت قالب و انجام آزمایشات تجربی مشاهده گردید که بیلوز در فشار 100~95 bar به فرم دهی مطلوب می‌رسد و در فشار 75 bar دچار چروک شدگی می‌گردد. (شکل (۳))



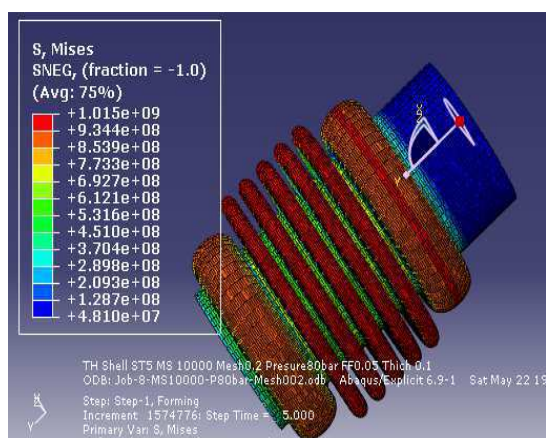
پارگی نتیجه گلوبی شدن می‌باشد. در شرایطی که ماده بصورت موضعی تحت نفوذ نیروی کششی زیادی باشد، پدیده گلوبی شدن یکمرتبه شروع می‌شود و تغییر شکل حاصل از آن ابتدا بصورت غیر یکنواخت در سرتاسر قطعه مشاهده گردیده، و سپس در یک منطقه متمرکز شده و باعث ایجاد حرکت سریع گلوبی شدن به سمت پارگی می‌شود [۸].



شکل (۳): (a) نمونه بیلوزهای تولید شده سالم در فشار 100 bar (b) نمونه بیلوزهای چروک شده در فشار 75 bar

۵- شبیه سازی المان محدود

شبیه‌سازی مساله توسط نرم‌افزار ABAQUS در فشار شکل‌دهی نهایی 105~110 bar جواب مناسب می‌دهد (شکل (۵)).



شکل (۵): بیلوز شبیه سازی شده مطلوب در فشار 110 bar

در فشار 130 bar، مدل طراحی شده دچار بهم‌ریختگی گردیده و در فشار 75 bar مدل دچار چروکیدگی می‌گردد (شکل (۶)).

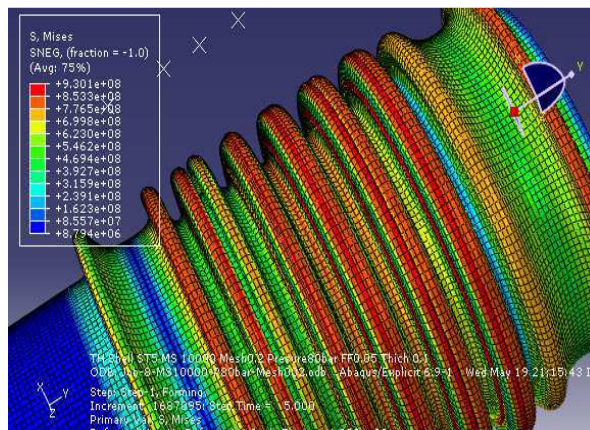
چروکیدگی حین مراحل اولیه و میانی شکل‌دهی به فرم شیارهای متقارن مشاهده می‌گردد. مفهوم چروکیدگی به صورت تغییر شکل امواج کوتاه خارج از یک صفحه بیان می‌گردد [۸]. زمانی که ماده در یک صفحه، تحت فشار باشد، پتانسیل ایجاد چروکیدگی موجود می‌باشد [۹].

در فشار 135 bar، بیلوز دچار پارگی (عدم فرم دهی کامل) گردید. (شکل (۴)).



شکل (۴): نمونه بیلوزهای پاره شده در فشار 135 bar

۳. افزایش فشار، منجر به لاغری سریع بخصوص در نقطه انحناء خارجی بید بیلوز و در نهایت پارگی می‌گردد.
 ۴. فشار سیال باید به اندازه کافی باشد تا از چروک‌شدگی حین مراحل میانی به واسطه نیروی محوری فشاری زیاد جلوگیری کند.



شکل (۶): بیلوز شبیه سازی شده و چروک شده در فشار 75 bar

تشکر و قدردانی
 در پایان از مدیریت محترم شرکت شاخص بهبود صنعت به سبب حمایت از انجام این پروژه تحقیقاتی و نیز در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی و همچنین پرسنل این شرکت به جهت همکاری در انجام کارهای آزمایشگاهی تشکر بعمل می‌آید.

در جدول (۳) فشار شکل‌دهی بیلوز که از روشهای تحلیلی، المان محدود و تجربی بدست آمده، با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد مابین نتایج المان محدود، تحلیل و آزمایشات تجربی توافق خوبی وجود دارد.

جدول (۳): مقایسه فشار شکل‌دهی بدست آمده از سه روش مختلف

فشار / روش	فشار	فشار	فشار
	فشار اولیه	سایزینگ	پارگی
تحلیلی	46 bar	86.5 bar	135 bar
المان محدود	50 bar	100-110 bar	up from 130 bar
آزمایشات تجربی	40 bar	95-100 bar	up from 120 bar

۶ - بحث و نتیجه‌گیری

۱. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تولید بیلوز به روش هیدروفورمینگ، فشار سیال می‌باشد. در این مورد آزمایشات نشان می‌دهد افزایش فشار منجر به پارگی بیلوز و کاهش فشار یا افزایش سرعت جمع‌شدن قالب منجر به چروکیدگی می‌گردد. شبیه‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS نیز تطابق خوبی با آزمایشات تجربی نشان می‌دهد.
 ۲. حساسیت فرآیند به فشار بیشتر از حساسیت آن به سایر پارامترهای فرآیند می‌باشد.

مراجع

- [1] Boo Hyun Kang, Moon Yong Lee, Sung Man Shon, Yoong Hoon Moon, "Forming various shapes of tubular bellows using a single-step hydroforming process", Journal of Materials Processing Technology, 194, pp 1-6, 2007.
- [2] Maummer Koc, Hydroforming for advanced manufacturing, The institute of Materials & Mining, Boca Raton, 2008.
- [3] Lee, S. W., "Study on the forming parameters of the metal bellows", Journal of Materials Processing Technology, 130-131, pp 47-53, 2002.
- [4] Faraji, Gh., Mosavi, M., Mashhadi, Nourouzifard, V., "Evaluation of effective parameters in metal bellows forming process", Journal of Materials Processing Technology, 2008.
- [5] Mori, K., Maeno, T., Maki, S., "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tubes", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, pp 978-984, 2007.
- [6] www.hep.uiuc.edu/LCRD/
- [7] Yingyot Aue-U-Lan, Gracious Ngaile, Taylan Altan, "Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification ", Journal of Materials Processing Technology, 146, pp 137-143, 2004.
- [8] Maummer Koc, Taylan Altan, "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydro forming process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, pp 123-138, 2002.
- [9] Aydemir, A., deVree, J. H. P., Brekelmans, W. A. M., Geers, M. G.D, Sillekens, W. H., and Werkhoven, R. J., "An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes", Journal of Materials Processing Technology, 159, pp 303-310, 2005