

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

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.

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

۱- مقدمه :

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 حفره‌ی قالب، با استفاده همزمان فشار داخلی و نیروی فشاری محوری از دو یا یک طرف است. مزایای این فرآیند 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].

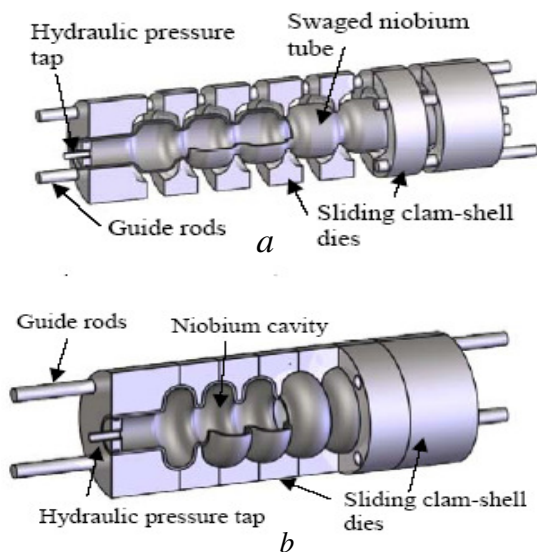
بیلوزهای فلزی کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوافضا، میکرو-الکترومکانیکال، پتروشیمی، صنعت هسته‌ای و سیستمهای صنعتی دارند. از جمله روشهای کنونی تولید بیلوز می‌توان به رول فرمینگ و جوشکاری دیسک اشاره نمود که هرکدام محدودیتهای خاص خود را دارد. در این پژوهش روش جدید تولید بیلوزهای فلزی با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ و به طور خاص تیوب هیدروفرمینگ که نیازمند کنترل همزمان فشار داخلی و سرعت بارگذاری محوری است [۱]، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

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

۲- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

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

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف



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 است [۵]. سرعت حرکت سمبه 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:

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 [۱].

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 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.

۳- محاسبه فشار شکل‌دهی به روش تحلیلی :

موفقیت در فرآیند تیوب هیدروفرمینگ به عوامل زیر وابسته است [۷]:

- ۱) شرایط بارگذاری (فشار داخلی و بارگذاری محوری در واحد زمان)
- ۲) شرایط روانکاری
- ۳) قابلیت شکل‌دهی

ترکیب مناسبی از متغیرهای ذکر شده باعث جلوگیری از مواردی شامل چروکیدگی، تحت فشار بودن، بادکردگی (پپچش یا کمانش) و یا ترکیدگی قطعه تولیدی است. از نتایج تجربی مشاهده می‌شود که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای فرآیند تولید بیلوز به روش هیدروفرمینگ، 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 هیدروفرمینگ از روابط زیر استفاده می‌شود [۷]:

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

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

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

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)

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 به دست می‌آید.

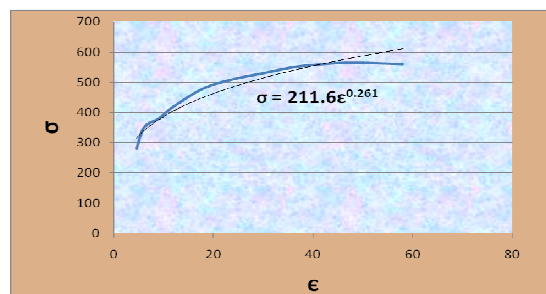
جدول (۱) درصد عناصر آلیاژی لوله 316L

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

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

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

شکل (۲) نمودار تنش، کرنش فولاد ضد زنگ 316L را نشان می‌دهد.:



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



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

پارگی نتیجه گلویی شدن می باشد. در شرایطی که ماده بصورت موضعی تحت نفوذ نیروی کششی زیادی باشد، پدیده گلویی شدن یکمرتبه شروع می شود 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 گلویی شدن به سمت پارگی می شود [۸].

۵- شبیه سازی المان محدود:

شبیه سازی مساله توسط نرم افزار ABAQUS در فشار شکل دهی نهایی 105~110 bar جواب مناسب می دهد (شکل (۵)).

۴- آزمایشات تجربی:

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



شکل (۳): (a) نمونه بیلولهای تولید شده سالم در فشار 100 bar

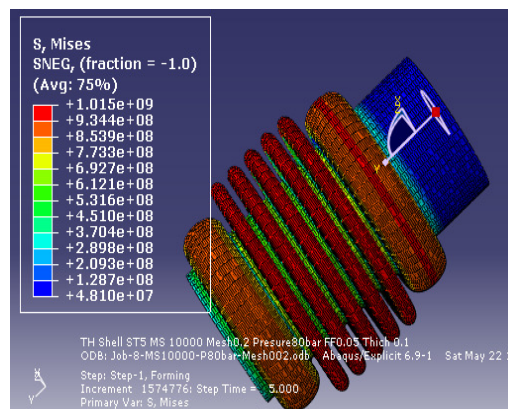
(b) نمونه بیلولهای چروک شده در فشار 75 bar

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

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

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

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



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

۶- بحث و نتیجه‌گیری:

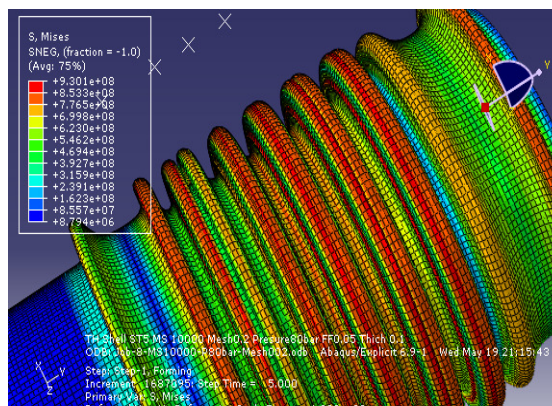
۱. یکی از مهمترین پارامترهای تولید بیلوز به روش هیدروفرمینگ، فشار سیال می‌باشد. در این مورد آزمایشات نشان می‌دهد افزایش فشار منجر به پارگی بیلوز و کاهش فشار یا افزایش سرعت جمع‌شدن قالب منجر به چروکیدگی می‌گردد. شبیه سازی با نرم افزار ABAQUS نیز تطابق خوبی با آزمایشات تجربی نشان می‌دهد.

۲. حساسیت فرآیند به فشار بیشتر از حساسیت آن به سایر پارامترهای فرآیند می‌باشد.

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 چروکیدگی حین مراحل میانی به واسطه نیروی محوری فشاری زیاد جلوگیری کند.

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



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 به عمل 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.

مراجع

- 1-Boo Hyun Kang, Moon Yong Lee, Sung Man Shon, Yoyng 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- S. W. Lee, "Study on the forming parameters of the metal bellows", Journal of Materials Processing Technology, 130-131, pp 47-53, 2002.
- 4- Gh. Faraji, M. Mosavi Mashhadi, V. Nourouzifard, "Evaluation of effective parameters in metal bellows forming process", Journal of Materials Processing Technology, 2008.

Archive of SID

- 5-K.Mori, T. Maeno, S. Maki, "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- A.Aydemir, J. H. P. deVree, W. A. M. Brekelmans, M. G.DGeers, n W. H. Sillekens, and R. J. Werkhoven, "An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes", Journal of Materials Processing Technology, 159, pp 303-310, 2005.