Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۹۰، جلد ۵۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۷۳-۱۸۰

مطالعه تجربی و عددی توزیع ضخامت و ارتفاع کنگره در فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز فلزی

یونس قدیری دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مهدی صفری* دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

بیلوزهای فلزی کاربرد بسیار زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز دارند. در سال‌های اخیر، فرآیندهای مختلفی از جمله روش‌های مکانیکی و هیدروفرمینگ برای تولید بیلوزها ارائه گردیده‌اند. فرآیند هیدروفرمینگ یکی از بهترین روش‌های تولید بیلوزهای فلزی با ویژگی‌های مورد انتظار می باشد. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی فرآیند ساخت قطعه بیلوز از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴پرداخته شده است.بدین منظور اثر برخی پارامترهای فرآیند شامل فشار داخلی، کورس قالب، شعاع گوشه قالب، ضریب اصطکاک، ضخامت و طول لوله بر قابلیت شکل‌پذیری بیلوز فلزی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش فشار داخلی و همچنین طول کورس قالب، ارتفاع کنگره افزایش یافته و ضخامت قطر خارجی بیلوز کاهش پیدا می‌کند. به علاوه سایر بررسی‌های عددی نشان می‌دهند که با کاهش ضریب اصطکاک و همچنین ضخامت و طول اولیه لوله، ارتفاع کنگره افزایش یافته و ضخامت نقطه واقع بر تاج کنگره کاهش می‌یابد.لازم به ذکر است که تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی حاصل گردید که نشان از دقت خوب شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده دارد.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ، بیلوز فلزی، ارتفاع کنگره، توزیع ضخامت.

Experimental and Numerical Study of Thickness Distribution and Convolution Height in Hydroforming process of Metallic Bellows

Y. Ghadiri Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak , Iran

M. Safari Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak , Iran

Abstract

Metallic bellows have many applications in various industries such as oil and gas industries. In recent decades, various processes such as mechanical and hydroforming methods for production of bellows have been proposed. Hydroforming process is one of the best methods for manufacturing of metallic bellows with expected characteristics. In this paper, hydroforming process of metallic bellows for AISI 304 stainless steel has been investigated experimentally and numerically. For this purpose, effects of some process parameters such as internal pressure, die stroke, radius of die corner, friction coefficient, thickness and length of tube on metallic bellows formability has been studied. The results show that with an increase in the internal pressure and also die stroke length, the height of convolution is increased and the thickness of outer diameter of bellows is decreased. In addition, the other numerical investigations show that by reducing in the friction coefficient and also initial thickness and length of tube, convolution height is increased and the thickness of a point positioned on convolution crown is decreased. It should be noted that a good agreement between the results of experimental work and numerical simulations were obtained that show a good precision in the performed numerical simulations.

Keywords: Hydroforming, Metallic bellows, Height of convolution, Thickness distribution.

۱- مقدمه

هیدروفرمینگ یکی از فرآیندهای شکل‌دهی فلزات است که از سال ۱۹۸۰ میلادی توسعه صنعتی آن آغاز شد. امروزه قطعات تولید شده از این روش، کاربرد فراوانی در صنایع خودروسازی، نظامی، پتروشیمی و دیگر صنایع یافته‌اند. در این روش به کمک اعمال فشار سیال، قطعه ورودی به فرم حفره قالب در می‌آید [۱]. مزایای عمده این روش بر روش‌های سنتی شکل‌دهی فلزات عبارت است از کاهش هزینه، وزن، کاهش تلرانس ابعادی، افزایش مقاومت ساختاری، سختی و برگشت فنری کم. از پارامترهای مهم در این فرآیند می‌توان به هندسه قالب و قطعه، ابعاد اولیه لوله، فشار داخلی، کورس سنبه، نازک‌شدگی ضخامت لوله، شعاع گوشه قالب، ناهمسان‌گردی جنس لوله و روانکاری نام برد [۲].

هدف اصلی در روش هیدروفرمینگ لوله شکل‌دهی یک لوله به یک محفظه قالب با شکل پیچیده و با مقاطع متغیر بدون به‌وجود آمدن عیوبی نظیر چروکیدگی، ترکیدگی و کمانش است. یکی از پارامترهای مهم برای دستیابی به این هدف به‌کار بردن همزمان و صحیح فشار داخلی و تغذیه محوری می‌باشد. در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات روش اجزای محدود به عنوان ابزاری توانا در پیش‌بینی چگونگی تغییرشکل قطعه در قالب و بررسی تأثیر پارامترهای مهم فرآیند مورد توجه بوده و توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. بیلوزهای فلزی، لوله‌های استوانه‌ای جدار نازکی هستند که به عنوان یک عضو انعطاف‌پذیر در مسیر خط لوله جهت دفع لرزش و حرکت‌های ناشی از تغییرات دمایی در مسیر خط لوله و یا حرکت‌های مکانیکی مانند نشت مخزن و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. بیلوزها به اینگونه عمل می‌کنند که هنگامی که فشار در بالا و پایین لوله یا در هر دو طرف اعمال می‌شود، می‌توانند متراکم شوند. زمانی‌که فشار کاهش می‌یابد به حالت اولیه باز خواهند گشت. یک اتصال بیلوزی عضوی منحصر بفرد در خط پایپنگ است که باید علاوه بر دفع حرکت‌های اعمالی به اندازه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.safari@arakut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۷
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۹

www.SID.ir

Archive of SID

کافی در برابر فشار سیال مقاوم باشد. عدم طراحی صحیح و انتخاب نادرست پارامترهای طراحی نظیر ضخامت بیلوز، ارتفاع و گام و تعداد کنگره‌ها و... باعث تابیدگی بیلوز در هنگام اعمال فشار سیال می‌گردد.

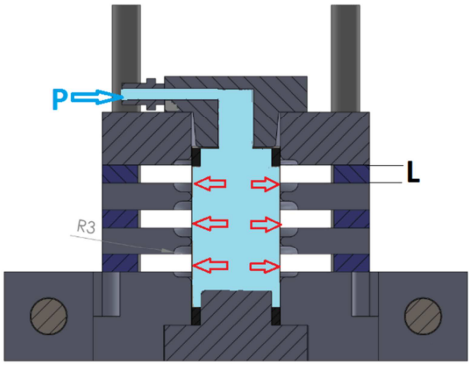
در زمینه تولید بیلوزهای فلزی با استفاده از روش هیدروفرمینگ، مطالعات محدودی از سوی محققان انجام گرفته است. لی[۳] پارامترهای موثر در تولید بیلوزهای فلزی را مورد آزمایش قرار داد. او ساخت بیلوزها را به چهار مرحله کشش عمیق[1]، اتوکاری[2]، بشکه‌ای شدن لوله[3] و تا شدن[4] تقسیم کرد. او متذکر شد، که مراحل بالجینگ و فولدینگ مهم هستند. زیرا این دو مرحله کیفیت ساخت بیلوز را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در آن تحقیق هر دو این مراحل با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفتند. کانگ و همکارانش [۴]، فرآیند تولید بیلوزها را به سه مرحله بالجینگ، بسته‌شدن و تنظیم کردن تقسیم کردند و فرآیند شکل‌گیری بیلوزهایی از آلیاژ تیتانیم را با روش‌های تحلیلی مدل کردند. آنها مدل‌های تحلیلی خود را براساس آزمایش‌های انجام شده اصلاح کردند.محرمی و همکارانش [۵]، شبیه سازی عددی فرآیند تیوب هیدروفرمینگ سه راهی T شکل نامساوی از جنس فولاد را به کمک نرم افزار المان محدود انجام داده و اثر پارامترهایی نظیر شعاع فیلت، فشار داخلی و ضریب اصطکاک را بر ضخامت نهایی و توزیع تنش پسماند بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که این پارامترها بر ضخامت و بزرگی تنشهای پسماند تاثیر گذار بوده و در حالت حدی تنشهای پسماند در حد ۹۰ درصد تنش تسلیم و کاهش ضخامتی در حد ۴۰ درصد در نمونه شاخته شده مشاهده شد. اکبرزاده و همکاران [۶] فرآیند خمکاری لوله جدارنازک با مقطع مربعی به کمک روش هیدروفرمینگ را مورد مطالعه قرار دادند. در روش ارائه شده توسط آنها، ابتدا لوله های انتها بسته و بدون درز با استفاده از فرآیند چند مرحله ای کشش عمیق و اتوکاری تولید شدند. سپس فرآیند هیدروفرمینگ بر روی آنها اعمال شده و لوله های با مقطع مربعی خمکاری شدند. نتایج آنها نشان دهنده خمکاری لوله های با مقطع مربعی و با نسبت های کوچک شعاع خم به قطر لوله با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ بود.

در پژوهش‌های پیشین، کمتر به مطالعه جامع و کامل اثر پارامترهای فرآیند و هندسی بر قابلیت شکل‌دهی بیلوزهای فلزی پرداخته شده است. برای رسیدن به تولید بیلوز مطلوب و با کیفیت، پارامترهای تیوب هیدروفرمینگ باید به صورت دقیق تعیین گردند تا بتوان از مشکلاتی که ممکن است در طول پروسه و نهایتاً برای قطعه نهایی به وجود آید جلوگیری کرد. از جمله پارامترهای مختلف که بر شکل‌پذیری بیلوز تأثیر گذار هستند شامل فشار سیال، طول کورس، شعاع گوشه قالب، قطر و ضخامت اولیه لوله، طول لوله و ضریب اصطکام می‌باشد. هر یک از این پارامترها روی بیشترین ارتفاع کنگره و حداقل نازک‌شدگی در قسمت قطر خارجی بیلوز تأثیرگذار هستند. در این پژوهش برای اولین بار شبیه‌سازی و تحلیل‌های مربوط به تغییرات ضخامت و ارتفاع کنگره برای هر یک از پارامترهای مختلف به صورت عددی و تجربی بررسی می‌گردد. با توجه به قالب طراحی شده در این پژوهش، می‌توان روی فرآیند کنترل داشت؛ بدین صورت که با انتخاب پارامترهای مناسب می‌توان به ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت مطلوب دست یافت. از آنجایی که تقریباً ثابت نگه‌داشتن ضخامت دیواره با وجود تنش‌های اصطکاکی بین لوله و قالب و نیز تغییرات جریان مواد در مناطق تحت تغییرشکل، غیرممکن است، رسیدن به کمترین ضخامت و حداکثر ارتفاع کنگره از اهداف کیفی در این پژوهش می‌باشد.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل ۱ طرحواره فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز با تعداد سه کنگره و شکل ۲ مجموعه قالب هیدروفرمینگ بیلوز را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش نشان می‌دهد.

لوله مورد آزمایش در قالب از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ضخامت ۰.۶ میلیمتر، قطر خارجی ۵۱ میلیمتر و طول‌های مختلف متناسب با تعداد کنگره دلخواه بوده است. به‌منظور تامین تغذیه محوری و فشردن لوله به درون قالب، تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیکیبا ظرفیت ۴۰ تن انجام شد. برای تامین فشار از یک واحد هیدرولیکی استفاده گردیده است که این واحد قابلیت اعمال فشار را تا حداکثر ۲۵۰bar دارد. برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است.



شکل۱- طرحواره فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز با سه کنگره

شکل۲- مجموعه قالب نصب شده بر روی پرس هیدرولیک

[1]Deep Drawing
[2]Ironing
[3]Tube-Bulging
[4]Folding

www.SID.ir

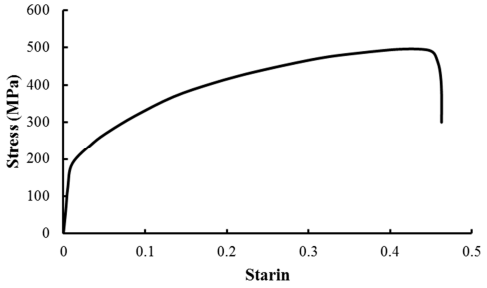
Archive of SID

این مدار هیدرولیکی از یک شیر کنترل فشار جهت تنظیم فشار، یک فشارسنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل مخزن، یک شیر یک‌طرفه، سه‌راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود.سیال به‌کار رفته در آزمایش‌ها، روغن SAE 20W50 ساخت کارخانه نفت پارس می‌باشد. گرانروی این روغن در$40^{\circ}C$ برابر 158cSt و چگالی آن برابر0.891 گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.

نحوه عملکرد مجموعه قالب هیدروفرمینگ لوله به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد. سپس صفحات قالب با توجه به تعداد کنگره در فواصل یکسان از هم دور لوله قرارگرفته و بین صفحات قالب گیج‌هایی با اندازه‌های مختلف قرار می‌گیرند. در این حالت سنبه‌ها در دو طرف لوله‌ها قرار می‌گیرند و قالب توسط حلقه‌های آب‌بندی نصب شده در انتهای سنبه‌ها، از دو طرف آب‌بندی می‌شود. سپس روغن پرفشار از واحد هیدرولیک و از طریق سوراخ مرکزی سنبه بالایی به داخل لوله وارد می‌شود. در حالت بارگذاری بدون تغذیه محوری (بالجینگ)، با ایجاد فشار داخلی، لوله در ناحیه بین صفحات قالب انبساط یافته و به حالت بشکه‌ای در می‌آید. این افزایش فشار تا حدی ادامه می‌یابد که لوله صفحات قالب را احاطه کند به صورتی‌که اگر گیج‌های بین صفحات قالب برداشته شوند این صفحات در جای خود ثابت باقی بمانند. در این حالت، سنبه‌هیچ‌گونه تغذیه محوری به لوله نمی‌دهند و تنها نقش آب‌بندی قالب را به عهده دارند. در حالت بارگذاری با تغذیه محوری (فولدینگ)، پس از افزایش فشار و بشکه‌ای شدن لوله، سنبه بالایی لوله را به درون قالب تغذیه می‌کند. سنبه بالایی توسط دستگاه پرس، با سرعت مشخص به سنبه پایینی نزدیک شده و تغذیه محوری بصورت یک‌طرفه انجام می‌شود. در این مرحله فشار داخلی ثابت می‌ماند و حرکت محوری صورت می‌پذیرد. پیشروی محوری فقط به انتهای لوله وارد می‌شود و حرکت صفحات فلزی به حرکت لوله وابسته می‌باشد. وقتی صفحات قالب بطور کامل بسته شدندبیلوز فلزی شگل می‌گیرد. لازم به ذکر است که به‌منظور ایجاد کنگره‌هایی با ارتفاع و توزیع ضخامت مختلف، مقدار تغذیه محوری لوله و نحوه بارگذاری، تغییر داده می‌شوند. در شکل ۳ مراحل مختلف تولید بیلوز فلزی (از چپ به راست) در مراحل مختلف شکل‌دهی نشان داده شده است.

به منظور تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز با روش اجزای محدود، منحنی تنش کرنش حقیقی لوله مورد نیاز بوده است. از اینرو براسا استاندارد ASTM-A370، نمونه‌های آزمایش کشش تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۴ منحنی تنش کرنش مهندسی نمونه-ها را نشان می‌دهد.

شکل۳- مراحل مختلف تولید بیلوز فلزی در کار تجربی (از چپ به راست)



شکل۴- منحنی تنش - کرنش مهندسی فولاد زنگ نزن ۳۰۴

لوله بیلوز از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ می‌باشد که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ذکر شده‌اند.

جدول۱- ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴

Fe	S	Si	Ni	Mn	Cr	C
66-74	0.03	1	8-10.5	2	18-20	0.08

جدول۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لوله فولادی مورد استفاده در آزمایش‌ها

ضریبپواسون (v)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m3)
0.29	188	200	8000

آزمایش‌های هیدروفرمینگ جهت تولید قطعه‌ی بیلوز با هدف بررسی ماکزیمم ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت در نواحی مختلف به-خصوص در ناحیه قطر خارجی که بیشترین درصد کاهش ضخامت را دارد تحت فشارهای نهایی و کورس‌های مختلف انجام شد.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

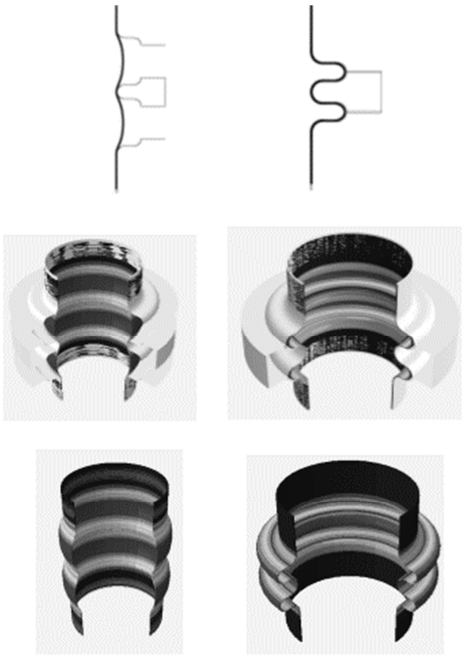
روش اجزای محدود، یک روش عددی بسیار مناسب برای رسیدن به حل تقریبی در بسیاری از مسائل مهندسی بوده که رفتار حاکم بر آنها توسط یک معادله دیفرانسیل بیان می شود. در دهه های اخیر محققین بسیاری از این روش عددی جهت بررسی عددی موضوعات مختلفی در حوزه مهندسی مکانیک استفاده نموده اند [۷ و ۸]. جهت برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUSاستفاده شده است. دراین پژوهش بدلیل تقارن محوری هندسه قالب وقطعه کار، ازمدل‌های دو بعدی برای شبیه سازی استفاده شده است. لوله‌ها به‌صورت متقارن محوری شکل‌پذیر[1] و با المانCAX4Rمدل شد. قالب‌ها به صورت متقارن محوری صلب تحلیلی[2]مدل گردیدکه به دلیل انتخاب نوع المان،مش‌بندی نشده وتحلیل نیز نگردید. درمدل‌سازی قطعات ، فقط سطوحی از قالب که درتماس با لوله قرارمی‌گیرند ، مدل‌سازی شدند. مجموعه قالب به

[1]Axisymmetric Deformable
[2]Axisymmetric Analytical Rigid

www.SID.ir

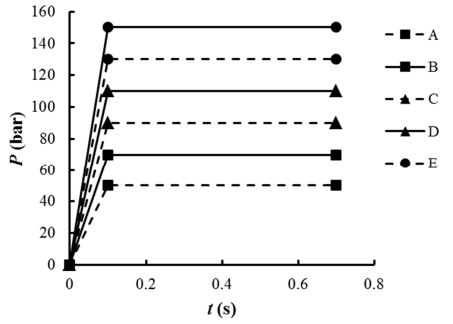
Archive of SID

صورت پوسته‌ای[1] مد شد. برای معرفی مشخصات ماده ، ازنتایج بدست امده از آزمایش کشش ورق استفاده شده است. مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح قالب ولوله درشبیه‌سازی ۰/۱ درنظرگرفته شد. شبیه‌سازی لوله شامل دومرحله بوده است. درمرحله اول ابتدا لوله درقالب (باهرتعدادکنگره دلخواه) بشکه‌ای شده وسپس ناحیه بشکه‌ای شده با بستن صفحات قالب جمع می‌شوند. شکل۵ این دومرحله را برای یک قالب با دوکنگره نشان می‌دهد. درجمع شدن صفحات قالب ،نیروها به صورت یک طرفه اعمال گردیدند. درانجام شبیه سازی‌ها از منحنی‌های فشار-جابجایی در زمان‌های شبیه‌سازی مختلف مطابق شکل‌های۶ و۷ استفاده شد.

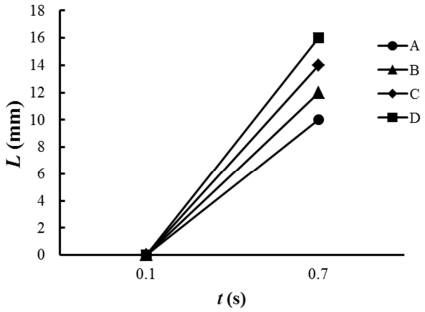


(الف) (ب)

شکل۵- مراحل شکل‌گیری بیلوز در شبیه‌سازی عددی: الف) بالجینگ، ب) شکل‌دهی کنگره‌ها



شکل۶- منحنی فشار زمان در مراحل مختلف شبیه‌سازی



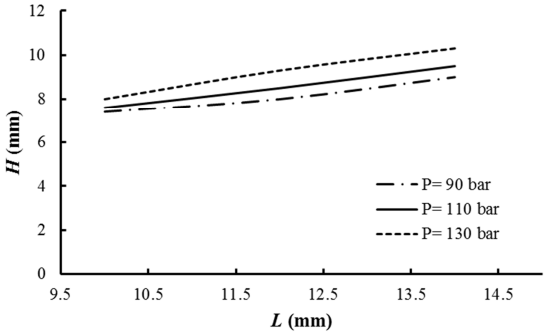
شکل۷- منحنی طول کورس زمان در مراحل مختلف شبیه‌سازی

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج تجربی و عددی

نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد که افزایش کورس قالب و نیز افزایش فشار سیال سبب ازدیاد میزان کاهش ضخامت بیلوز می‌گردد. افزایش فشار منجر به کاهش ضخامت سریع بیلوز بخصوص در نقطه واقع بر تاج بیلوز شده و حتی می‌تواند باعث پارگی بیلوز گردد. شکل۸ ارتفاع کنگره به‌دست آمده از نتایج تجربی به ازای فشارها و طول کورس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

یکی از اصلی‌ترین راه‌های بررسی کیفی بیلوزهای تولیدی، به‌دست آوردن توزیع ضخامت دیواره می‌باشد. برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت قطعه به خاطر هندسه پیچیده و کم بودن ضخامت، ابتدا بیلوز فلزی با استفاده از دستگاه وایرکات در جهت قطری بریده شده سپس برای از بین بردن پلیسه‌های حاصل از برش و افزایش دقت، صیقل کاری شد. در انتها ضخامت قطعه در نواحی مختلف مطابق شکل ۹ با استفاده از ضخامت‌سنج مکانیکی اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱۰ نمودار توزیع ضخامت بیلوز در مسیر قطر داخلی تا قطر خارجی را در شرایط آزمایشگاهی (P=110 bar, L=12 mm, R=3 mm) نشان می‌دهد. ضخامت بیلوز تولید شده از قطر داخلی به سمت قطر خارجی کاهش یافته و نقاط موجود در قطر خارجی بیلوز دارای کمترین ضخامت می‌باشند. معیار ما در این پژوهش کاهش مجاز ضخامت تا ۰/۷۵ضخامت اولیه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰ میزان کاهش ضخامت با معیار ما که کاهش ۰/۷۵ ضخامت لوله بود سازگاری دارد. همان‌گونه که از شکل پیدا است، همخوانی خوبی بین نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج تجربی وجود دارد.

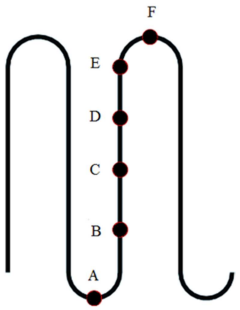


شکل۸- تاثیر کورس قالب و فشار بر ارتفاع کنگره

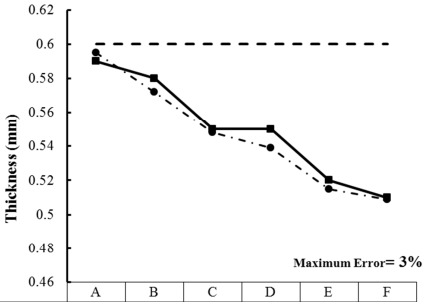
[1] Shell

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۹- مسیر اندازه‌گیری ضخامت بیلوز فلزی تولید شده



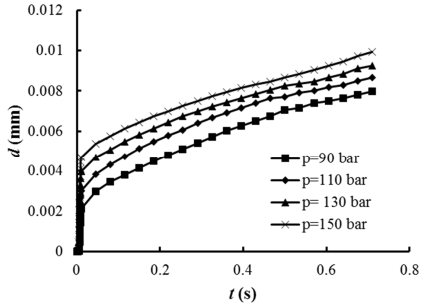
	A	B	C	D	E	F
EXP	0.59	0.58	0.55	0.55	0.52	0.51
FEM	0.595	0.572	0.548	0.539	0.515	0.509
Initial thickness	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

شکل۱۰- بین نتایج تجربی و عددیتوزیع ضخامت بیلوز فلزی

بدلیل هزینه‌بر بودن بررسی همه پارامترها از طریق آزمایش تجربی، از نتایج تحلیل اجزای محدود برای بررسی اثر پارامترهای موثر بر قابلیت شکل‌پذیری لوله استفاده شد. بدین صورت که با ثابت نگه داشتن پارامترها و تغییر در مقدار یک پارامتر، اثر تغییرات آن پارامتر بررسی می‌شود.

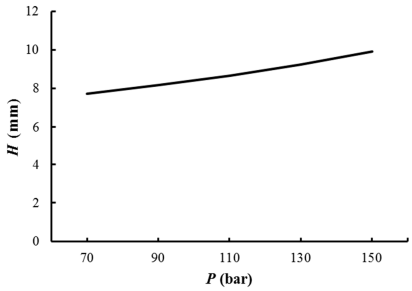
۴-۲- بررسی اثر فشار بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

برای به‌دست‌آوردن محصول سالم در عملیات هیدروفرمینگ، تعادل بین فشار داخلی و تغذیه محوری از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی با فشارهای مختلف در شرایط ثابت انجام شد. یعنی فقط پارامتر فشار متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت فرض می‌شوند. بررسی نتایج حاصل از این بخش نشان داد که با افزایش فشار در کورس ثابت، کنگره‌هایی با ارتفاع بلندتر و چروکیدگی کمتر و با نسبت‌های نازک شدگی بیشتر دیواره در ناحیه بیرونی ایجاد می‌شود. با این حال افزایش نازک‌شدگی در ناحیه بیرونی بیلوز منجر به ایجاد ترکیدگی می‌شود. در شکل ۱۱ نمودار جابجایی نقطه قطر خارجی بیلوز را در زمان‌های شبیه‌سازی به ازای فشارهای مختلف را نشان می‌دهد؛ که مشاهده می‌شود با افزایش فشار، ارتفاع کنگره افزایش می‌یابد.

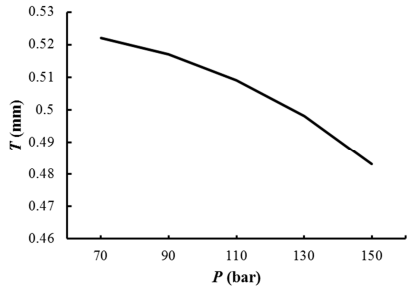


شکل۱۱- جابجایی نقطه واقع بر تاج کنگره در فشارهای مختلف

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب اثر فشار را بر روی ارتفاع کنگره و ضخامت تاج کنگره بیلوز فلزی تولید شده را نشان می‌دهد. افزایش فشار داخلی باعث کاهش ضخامت بیشتر خصوصاً در ناحیه بیرونی می‌شود. ضخامت در ناحیه بیرونی بیلوز به دلیل اثر اصطکاک کم می‌شود. در محل‌هایی که لوله با قالب در تماس می‌باشد، اصطکاک مانع جریان یافتن ماده می‌گردد؛ در حالی‌که در نواحی آزاد قطر خارجی بیلوز این مانع وجود ندارد. به بیان دیگر ناحیه قطر خارجی بیلوز تحت تنش کششی فشار سیال بوده، در حالی‌که قطر داخلی بیلوز تحت تنش فشاری می‌باشد. به همین سبب ناحیه قطر خارجی بیلوز نازک‌تر از قطر داخلی آن می‌شود.



شکل۱۲- تأثیر فشار داخلی بر ارتفاع کنگره در شبیه سازی عددی



شکل۱۳- تأثیر فشار داخلی بر ضخامت تاج کنگره در شبیه سازی عددی

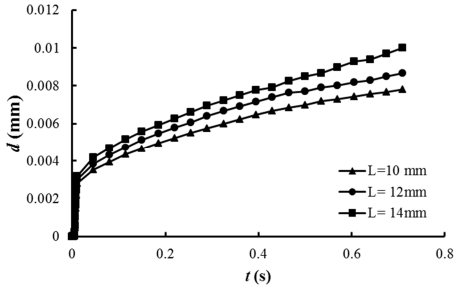
۴-۳- بررسی اثر طول کورس قالب بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

برای بررسی اثر کورس قالب، چهار کورس ۱۰، ۱۲، ۱۴و۱۶ میلیمتر در فشار ۱۱۰ barو شعاع گوشه قالب 3میلیمتر در نظر گرفته شد. در شکل ۱۴ جابجایی نقطه قطر خارجی بیلوز را در زمان‌های

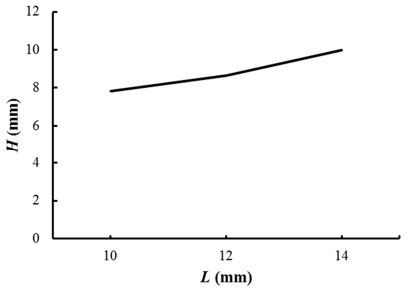
www.SID.ir

Archive of SID

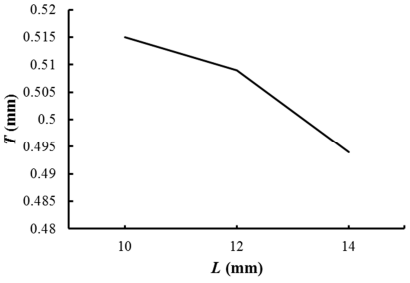
شبیه‌سازی به ازای طول کورس‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش کورس قالب، ارتفاع کنگره افزایش می‌یابد.شکل۱۵ تأثیر کورس قالب را بر ارتفاع کنگره نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزایش کورس باعث افزایش قطر خارجی بیلوز می‌شود. این افزایش به صورت خطی می‌باشد. همچنین با افزایش کورس قالب خطر چروکیدگی افزایش پیدامی‌کند. شکل ۱۶ اثر فاصله کورس قالب را بر توزیع ضخامت نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش کورس، ضخامت در قسمت قطر خارجی بیلوز کاهش می‌یابد. با تأثیر طول کورس مشاهده شد که با افزایش مقدار طول کورس، نازک‌شدگی بیشتری در ناحیه خارجی رخ می‌دهد، اما تأثیر قابل توجه در ناحیه داخلی بیلوز ندارد.



شکل۱۴- جابجایی نقطه واقع بر تاج کنگره در طول کورس‌های مختلف



شکل۱۵- تأثیر طول کورس بر ارتفاع کنگره در شبیه سازی عددی

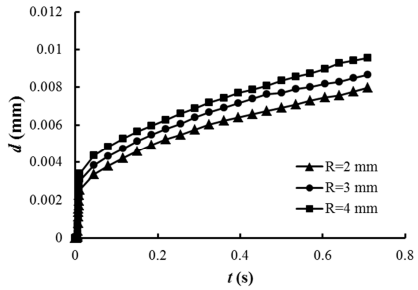


شکل۱۶- تأثیر طول کورس قالب بر ضخامت تاج کنگره در شبیه‌سازی عددی

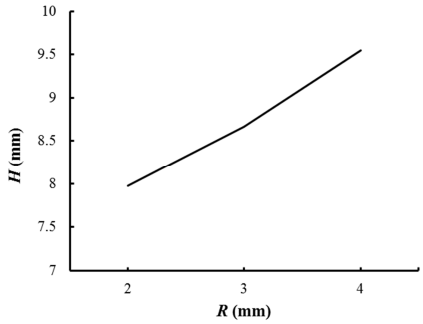
۴-۴- بررسی اثر شعاع گوشه قالب بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

هندسه قالب تأثیر مهمی بر نتایج فرآیند هیدروفرمینگ دارد و به همین دلیل در این پژوهش و برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه عددی سه شعاع ۲، ۳ و ۴ میلیمتر مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش شعاع گوشه قالب می‌توان به بیلوزهایی با پهنای کنگره بزرگتر و با ارتفاع بیشتری دست یافت. شکل ۱۷جابجایی نقطه قطر خارجی بیلوز را در زمان‌های شبیه‌سازی به ازای شعاع گوشه‌های قالب مختلف را نشان می‌دهد. و مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع، پهنا و ارتفاع کنگره افزایش می‌یابد.

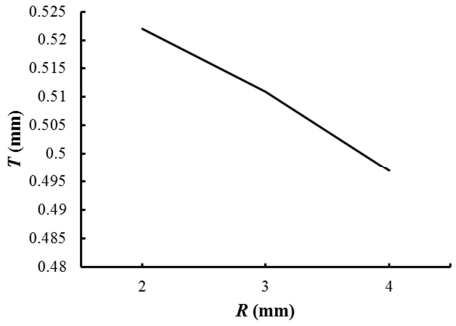
از شبیه‌سازی عددی نتیجه گرفته شد که با افزایش شعاع گوشه قالب ضخامت کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی لوله‌هایی با شعاع گوشه قالب مختلف برای بررسی گسترش ارتفاع کنگره و مشخصات نازک‌شدگی دیواره مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۱۸ و ۱۹جزئیات نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع گوشه قالب، ارتفاع کنگره دارای روند صعودی است و همزمان نازک‌شدگی دیواره لوله در ناحیه قطر خارجی بیلوز مشاهده می‌شود.



شکل۱۷- جابجایی نقطه واقع بر تاج کنگره در شعاع‌های گوشه قالب مختلف



شکل۱۸- تأثیر شعاع گوشه قالب بر ارتفاع کنگره در شبیه‌سازی عددی



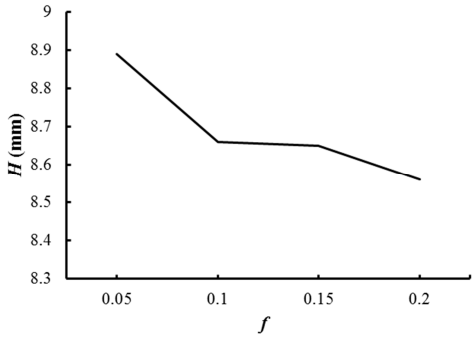
شکل۱۹- تأثیر شعاع گوشه قالب بر ضخامت تاج کنگره در شبیه‌سازی عددی

www.SID.ir

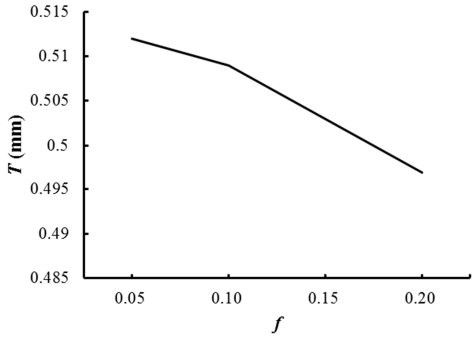
Archive of SID

۴-۵- بررسی اثر اصطکاک بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

به‌دلیل فشارهای تماسی بالا و سطوح تماسی بزرگ در فرآیند هیدروفرمینگ بیلوز فلزی، نیروهای اصطکاکی بالایی بین لوله و قالب بدست می‌آید. این نیروها نه تنها پارامترهای مورد نیاز فرآیند برای قطعه هیدروفرم شده را تحت تاثیر قرار می‌دهند، بلکه کیفیت قطعه از جمله توزیع ضخامت دیواره آن را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند. اطلاع داشتن از ضریب اصطکاک در تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله ضروری است. در شبیه‌سازی عددی ضرایب اصطکاک ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲در شرایط ثابت در نظر گرفته شد. در شکل ۲۰ تأثیر ضریب اصطکاک بر بیشینه ارتفاع کنگره و کمینه ضخامت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش ضریب اصطکاک ارتفاع کنگره افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب اصطکاک به دلیل تغذیه کم مواد به منطقه انبساط ضخامت کاهش می‌یابد. استفاده از روانکار در موفقیت هیدروفرمینگ مهم است. شرایط روانکاری خوب اجازه می‌دهد که لوله انبساط یابد و به شکل نهایی مطلوب در قالب برسد، در حالی‌که روانکاری ضعیف اغلب منجر به شکست زودرس به دلیل نازک‌شدگی موضعی بیش از حد می‌شود.



(الف)

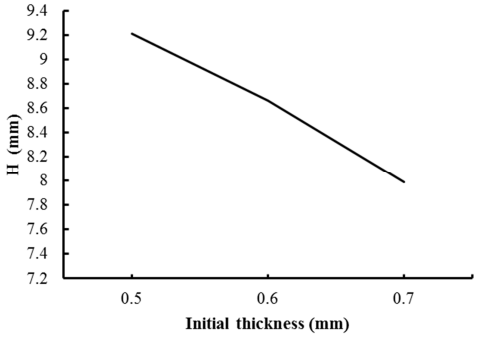


(ب)

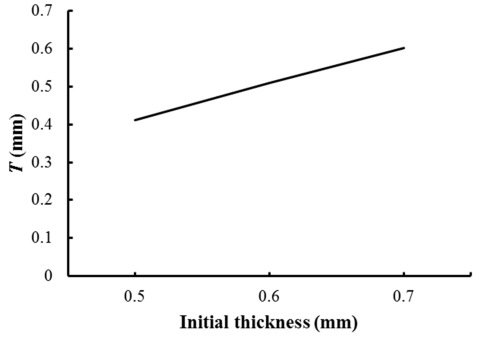
شکل۲۰- تأثیر ضریب اصطکاک بر روی الف) ارتفاع کنگره و ب) ضخامت تاج کنگره در شبیه‌سازی عددی

۴-۶- بررسی اثر ضخامت لوله بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

برای بررسی اثر ضخامت لوله، سه ضخامت ۰/۵، ۰/۶و ۰/۷ میلیمتر در شرایط ثابت در نظر گرفته شد. در شکل ۲۱ تأثیر ضخامت لوله بر بیشینه ارتفاع کنگره و کمینه ضخامت نشان داده شده است. با توجه به این شکل نتیجه گرفته می‌شود که حداکثر ارتفاع کنگره هنگامی‌که از کمترین ضخامت استفاده شد بدست آمد.



(الف)



(ب)

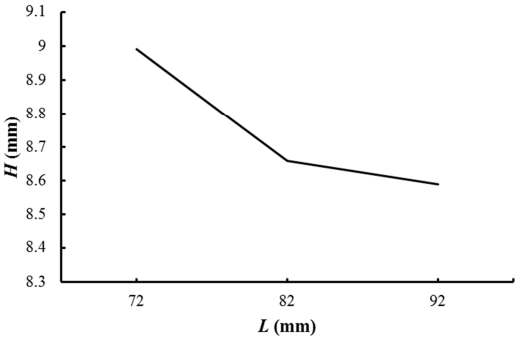
شکل۲۱- تأثیر ضخامت دیواره لوله بر روی الف) ارتفاع کنگره و ب) ضخامت تاج کنگره در شبیه‌سازی عددی

۴-۷- بررسی اثر طول اولیه لوله بر ارتفاع کنگره و توزیع ضخامت

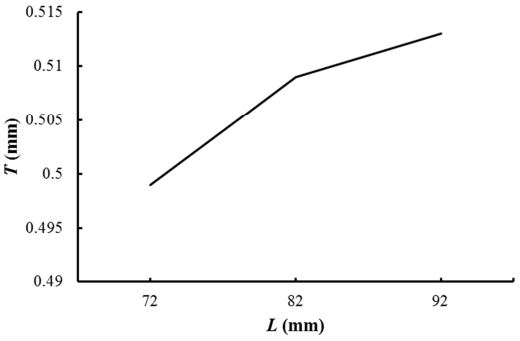
بررسی اثر طول اولیه لوله بر توسعه بیشینه ارتفاع کنگره انجام شد. بدین منظور با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و با در نظر گرفتن سه طول مختلف، شبیه‌سازی انجام گرفت. شکل ۲۲ جزئیات نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش طول اولیه لوله، ارتفاع کنگره به‌طور همزمان با افزایش نازک‌شدگی دیواره در بالای کنگره افزایش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID



(الف)



(ب)

شکل۲۲- تاثیر طول اولیه لوله بر روی الف) ارتفاع کنگره و ب) ضخامت تاج کنگره در شبیه‌سازی عددی

این نشان می‌دهد که برای هندسه‌های خاص قطعات، انتخاب طول بهینه لوله بسیار مهم است که می‌تواند توزیع ضخامت دیواره بهتری (یعنی نازک‌شدگی دیواره نسبتا کمتر) حاصل شود.

۵- نتایج

دراین مقاله پارامترهای اساسی فرآیند ساخت بیلوزهای فلزی به روش هیدروفرمینگ با استفاده ازشبیه ساز اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مطالعه شده و تاثیر فشار داخلی ،کورس قالب، شعاع گوشه قالب ، ضخامت و طول اولیه لوله و ضریب اصطکاک بر روی ارتفاع نهای کنگرو و توزیع ضخامت درقسمت قطرخارجی بیلوز تحلیل شده است. آزمایش‌های تجربی براساس نتایج اجزای محدود انجام شده ودرنهایت نتایج زیر بدست آمده است:

۱. نتایج عددی و تجربی نشان دادکه با افزایش فشار، ارتفاع کنگره نیز افزایش می‌یابد . همچنین کاهش ضخامت بیشتری در ناحیه قطرخارجی بیلوز مشاهده شد.

۲. افزایش کورس باعث کاهش ضخامت درتمام نواحی بیلوزمی-شود ولی کاهش ضخامت در ناحیه خارجی بیشتر ازداخلی است. با افزایش کورس قطرخارجی افزایش می‌یابد.

۳. نتایج عددی نشان دادکه با افزایش شعاع گوشه قالب به ارتفاع کنگره بزرگتری می‌توان دست یافت. همچنین مشاهده شدکه با افزایش شعاع گوشه قالب می‌توان در فشارکمتری به ارتفاع کنگره مورد نظر دست یافت. با افزایش شعاع گوشه قالب ضخامت ناحیه قطرخارجی کاهش می‌یابد.

۴. ازنتایج عددی مشاهده شدکه باکاهش ضریب اصطکاک،کاهش طول لوله وکاهش ضخامت لوله می‌توان به کنگره‌هایی با ارتفاع بلندتردست یافت. که در بین آنها تأثیرضخامت بیشتراست.

۶- نمادها

P	فشار (bar)
L	طول کورس
R	شعاع گوشه قالب
T	کمینه ضخامت کنگره (mm)
H	بیشینه ارتفاع کنگره (mm)
f	ضریب اصطکاک
l	طول لوله (mm)
t	زمان هر گام (s)
t_l	ضخامت لوله (mm)

۷- مراجع

[1] Aue-U-Lan Y., Ngaile G. and Altan T.. Optimization tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 680–683, 2006.

[2] Koc M. and Altan T., Application of two dimensional (2D) FEA for the tube hdroforming process, *International Journal of Mechine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1285-1295, 2002.

[3] Lee S. W., Study on the forming parameters of the metal bellows, Journal *of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 47-54, 2002.

[4] Kang B. H., Lee M. Y., Shon S. M. and Moon Y. H., Forming various shapes of tubular bellows using a single- step hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.194, pp. 1–6, 2007.

[۵] محرمی ر. نبوی م. و آقایی س.، بررسی پارامترهای موثر هیدروفرمینگ لوله بر توزیع ضخامت و تنش‌های پسماند لوله‌های T شکل نامساوی به کمک شبیه‌سازی المان محدود، مجلهٔمهندسی مکانی کدانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۱، ص ۲۳۹-۲۴۶، ۱۳۹۶.

[۶] اکبرزاده ب. گرجی ع. و بخشی جویباری م.، شبیه‌سازی و مطالعه تجربی فرآیند خم‌کاری لوله جدار نازک با مقطع مربعی به روش هیدروفرمینگ، ، مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۱-۱۰، ۱۳۹۶.

[7] Shamsborhan M., Moradi M. and Shokuhfar A., Numerical optimization of planar twist channel angular extrusion as a novel severe plastic deformation method by DOE method, *Modares Mechanical Engineering.* Vol. 16, No. 5, pp. 135-144, 2016 (in Persian).

[8] Moradi M. and Golchin E., Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*. Vol.14, No. 3, pp. 464-484, 2017.

www.SID.ir