Archive of SID

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی لوله‌های کنگره‌ای در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب‌های بسته و باز

مجید الیاسی دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل
محمد بخشی استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل
عبدالحمید گرجی دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

چکیده

در این مقاله، امکان شکل‌دهی لوله‌های کنگره‌ای (Bellows) در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب‌های بسته و باز بصورت تجربی و نیز با شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داده است که شکل‌دهی این نوع لوله در قالب بسته، در صورت تغذیه ماده از یک انتهای لوله، تنها برای یک کنگره مناسب می‌باشد. برای لوله با دو کنگره، در صورتی که تغذیه ماده از دو انتهای لوله باشد، امکان شکل‌دهی آن نیز در قالب بسته وجود دارد. برای لوله‌های با بیش از دو کنگره، این نتیجه بدست آمده است که در قالب بسته، امکان شکل‌دهی آنها وجود ندارد. از این رو، یک مجموعه قالب باز مورد بررسی قرار گرفت. نتـایج حاصل نشان داده است که برای تولـید لوله‌های کنگره‌ای در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب باز، محدودیتی برای تعداد کنگره وجود ندارد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی فلزات، هیدروفرمینگ لوله، لوله‌های کنگره‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود.

Numerical and Experimental Investigation on Forming Metallic Bellows in Closed and Open-Die Hydroforming

M. Elyasi, M. Bakhshi and A. H. Gorji
Faculty of Mechanical Engineering, Babol University of Technology

Abstract

In this paper, the possibility of forming the metallic bellows in closed-die, and also in open-die, tube hydroforming process has been studied by numerical simulation and experiment. The results obtained illustrated that forming the tube in the closed-die process is only possible for a single-convolution bellows, when the tube is fed from one end; if the feeding is performed from both the ends, then the process is also possible for a double-convolution bellows. If the number of convolutions is more than two, then it is impossible to form the bellows in the closed-die process. But, in forming the bellows in the open-die tube hydroforming, there is no limitation on the number of convolutions.

Key words: Metal forming, Tube hydroforming, Bellows, FEM simulation.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ لوله یکی از فرآیندهای نسبتاً جدید شکل‌دهی فلزات است. امروزه قطعات تولید شده با این روش، کاربرد فراوانی در صنایع خودروسازی، نظامی، اتصالات و دیگر صنایع یافته‌اند. بدلیل مزایای قطعات تولید شده با این فرآیند، رشد این تکنولوژی در مقایسه با دیگر فرآیندهای شکل‌دهی فلزات نسبتاً سریع و چشمگیر بوده است [۱]. از پارامترهای مهم در این فرآیند می‌توان هندسه قطعه و قالب، ابعاد اولیه لوله، ناهمسانگردی جنس لوله، نیروی بستن قالب‌ها، فشار داخلی، کورس سنبه، نازک‌شدگی ضخامت لوله، شعاع گوشه قالب و روانکاری را نام برد [۲ و ۳].

در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، روش اجزای محدود به عنوان ابزاری توانا در پیش‌بینی چگونگی شکل یافتن قطعه در قالب و بررسی تاثیر پارامترهای مهم فرآیند مورد توجه بوده و توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در فرآیند هیدروفرمینگ، با این روش می‌توان موضوعاتی مانند یافتن بهترین مسیر بارگذاری، وقوع پارگی، ایجاد چروک خوردگی و بیشترین حد نازک شدگی لوله را بررسی و تعیین کرد [۴ و ۵].

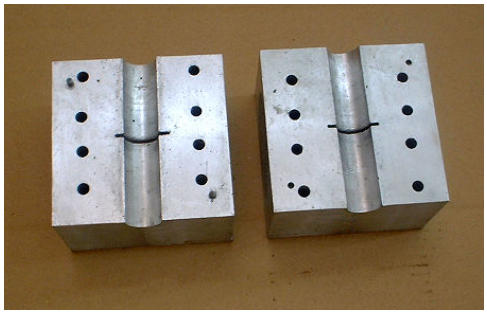
در زمینه تولید لوله‌های فلزی کنگره‌ای با استفاده از روش هیدروفرمینگ، مطالعات محدودی از سوی محققان انجام گردیده است. فرجی و همکارانش [۶] پارامترهای مهم در ساخت لوله‌های کنگره‌ای را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی بررسی نمودند. آنها تاثیر فشار داخلی، کورس قالب و پیشروی را بر توزیع ضخامت، قطر خارجی و برگشت فنری این لوله‌ها مطالعه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار پیشروی، نازک‌شدگی بیشتری در ناحیه خارجی این لوله‌ها رخ می‌دهد، اما تاثیری در ناحیه داخلی ندارد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش فشار، کاهش ضخامت و افزایش برگشت فنری در لوله‌های کنگره‌ای مشاهده می‌شود و حساسیت برگشت فنری نیز افزایش می‌یابد.

لی [۷] پارامترهای مؤثر در شکل‌دهی لوله‌های کنگره‌ای را مورد بررسی قرار داد. او مراحل تولید این لوله‌ها را به چهار مرحله کشش عمیق (Deep Drawing) ورق، اتوکاری (Ironing) آن، بشکه‌ای شدن لوله (Tube-Bulging) و تابیدگی (Folding) آن تقسیم‌بندی نمود. وی، همچنین اشاره کرد که مراحل بشکه‌ای شدن لوله و تابیدگی آن، مهمترین مراحل در تولید لوله‌های کنگره‌ای هستند، زیرا شرایط شکل‌دهی در این دو مرحله تاثیر بسزایی بر کیفیت محصول دارد. در آن پژوهش، دو مرحله مذکور در تولید لوله‌های کنگره‌ای با روش اجزای محدود بررسی گردید و اثر برگشت فنری در هر یک از این مراحل مورد مطالعه قرار گرفت.

در این مقاله، امکان شکل‌دهی لوله‌های کنگره‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن در فرآیند هیدروفرمینگ قالب‌های بسته و باز با استفاده از روش‌های تجربی و اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل (۱- الف)، دو نیمه قالب بسته هیدروفرمینگ لوله با یک کنگره و شکل (۱- ب) آن مجموعه قالب را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش، نشان می‌دهد. دو نیمه این قالب از جنس آلومینیوم می‌باشند.



(الف)

(ب)

شکل ۱- الف- دو نیمه قالب بسته هیدروفرمینگ لوله با یک کنگره، ب- مجموعه قالب بسته نصب شده بر روی دستگاه آزمایش

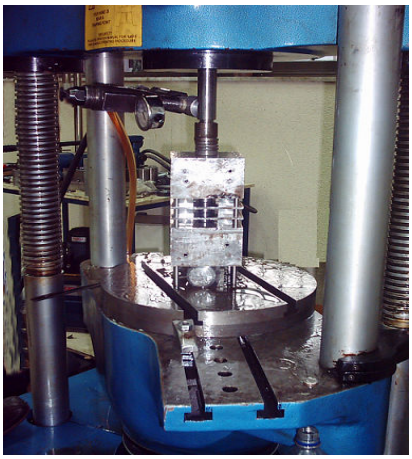
www.SID.ir

Archive of SID

لوله مورد آزمایش در قالب بسته از جنس مس و دارای ضخامت ۰/۲، قطر خارجی ۲۴/۲ و طول ۷۵ میلیمتر بوده است. به منظور افزایش شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفرمینگ، قبل از انجام فرآیند بر روی آن عملیات آنیل انجام شده است.

شکل (۲- الف)، مجموعه قالب باز هیدروفرمینگ را نشان می‌دهد که برای ایجاد هشت کنگره در لوله، طراحی و ساخته شده است. شکل (۲- ب)، آن مجموعه قالب را در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش نشان می‌دهد. لوله شکل داده شده در قالب باز از جنس فولاد زنگ نزن SS316L و دارای ضخامت ۰/۵ میلیمتر، قطر خارجی ۲۶ میلیمتر و طول‌های مختلف، برای تعداد کنگره‌های متفاوت بوده است.

(الف)

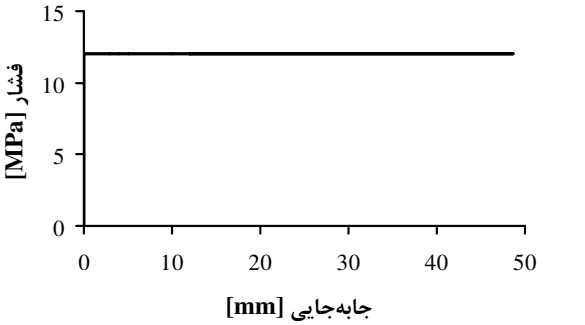


(ب)

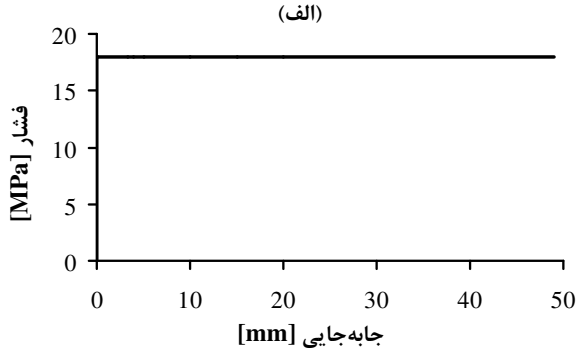
شکل۲- الف- مجموعه قالب باز هیدروفرمینگ برای یک لوله با هشت کنگره، ب- مجموعه قالب باز نصب شده بر روی دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG (Denison Mayes Group) با ظرفیت ۶۰۰kN استفاده شد که دارای امکانات کامل برای ثبت داده‌های خروجی بوده است. سیستم تولید فشار توسط یک مجموعه هیدرولیکی تامین شد که قابلیت اعمال فشار را تا ۳۰۰ بار داشته است. مقدار فشار ماکزیمم، با یک شیر محدود کننده فشار قابل کنترل بود. سیال استفاده شده در آزمایش‌ها روغن شرکت پارس با نام تجاری بابک هیدرولیک ۶۸ بوده است. منحنی های فشار- جابه‌جایی اعمال شده در طی فرآیندها در شکل (۳) نشان داده شده است.

به منظور تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ با روش اجزای محدود، منحنی تنش- کرنش حقیقی لوله مورد نیاز بوده است. از این رو، بر اساس استاندارد ASTM، نمونه‌های آزمون کشش تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفت [۸]. شکل (۴)، منحنی تنش- کرنش حقیقی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



(الف)

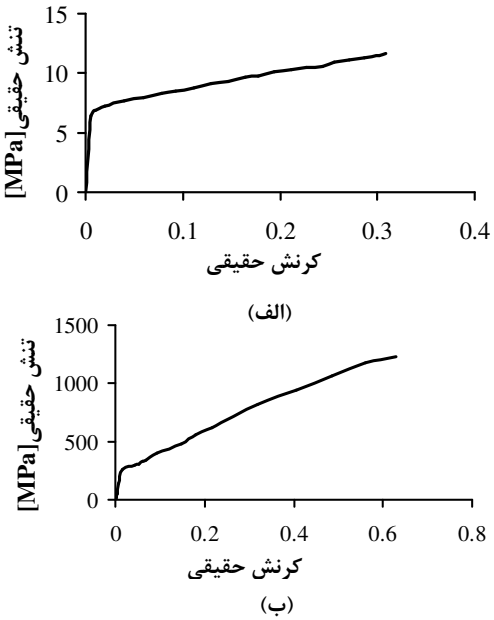


(ب)

شکل۳- منحنی فشار- جابجایی: الف- برای قالب بسته با یک کنگره، ب - برای قالب باز با تعداد کنگره های دلخواه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- منحنی تنش- کرنش حقیقی: الف- نمونه مسی، ب- نمونه فولاد زنگ‌نزن

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

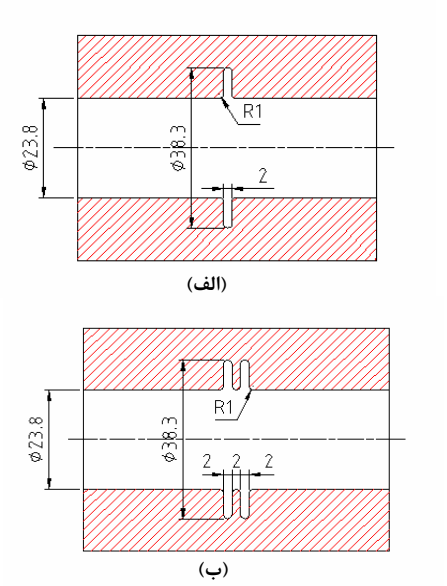
برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدروفرمینگ از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است [۹]. شکل (۵)، طرحواره قالب‌های بسته یک و دو کنگره‌ای بکار برده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

بدلیل تقارن محوری هندسه قالب و قطعه کار، از مدل‌های دو بعدی برای شبیه‌سازی استفاده شده است. لوله‌ها بصورت متقارن محوری شکل‌پذیر (Axisymmetric Deformable) و با المان CAX4R مدل شد. قالب‌ها به صورت متقارن محوری صلب تحلیلی (Axisymmetric Analytical Rigid) مدل گردید که به دلیل انتخاب نوع المان، مش‌بندی نشده و تحلیل نیز نگردیدند.

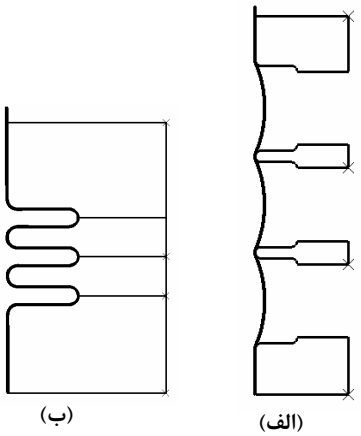
برای معرفی مشخصات مواد، از نتایج بدست آمده از آزمایش کشش ورق استفاده شده است. بر اساس مراحل ذکر شده در مرجع [۱۰]، مقدار ضریب اصطکاک میان سطوح قالب و قطعه کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۰۶ در نظر گرفته شد.

بارگذاری محوری در شبیه‌سازی قالب بسته، برای حالت یک کنگره‌ای بصورت یک طرفه و برای حالت‌های با بیش از یک کنگره، بصورت دو طرفه بوده است.

شبیه‌سازی لوله‌های کنگره‌ای در قالب باز شامل دو مرحله بوده است. در مرحله اول، ابتدا لوله در قالب باز (با هر تعداد کنگره دلخواه) بشکه‌ای شده و سپس ناحیه‌های بشکه‌ای شده با بستن صفحات قالب جمع می‌شدند. شکل (۶)، این دو مرحله را برای یک قالب با سه کنگره نشان می‌دهد. در جمع شدن صفحات قالب، نیروها بصورت یکطرفه اعمال گردیدند. در انجام شبیه‌سازی، از منحنی‌های فشار- جابجایی شکل (۳) استفاده شده است.



شکل ۵- طرحواره قالب بسته استفاده شده در شبیه سازی: الف- یک کنگره ای- ب- دو کنگره ای



شکل ۶- مراحل شبیه‌سازی در قالب باز: الف- مرحله بشکه‌ای شدن لوله، ب- مرحله بسته شدن صفحات قالب و شکل‌گیری کنگره‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

۴- نتایج و بحث

با توجه به منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی نمونه مسی و فولاد زنگ‌نزن در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که لوله مسی بمیزان قابل توجهی از لوله فولادی نرم‌تر است. از این رو، آزمایشات قالب بسته با لوله‌های مسی انجام گردید.

شکل (۷)، لوله مسی اولیه و لوله شکل یافته را در قالب بسته یک کنگره‌ای نشان می‌دهد که در آن کنگره بطور کامل پر شده است. در شکل (۸)، پروفیل اندازه‌گیری شده لوله و پروفیل بدست آمده از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان گونه که از شکل پیدا است، همخوانی خوبی بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی وجود دارد.

در شکل‌های (۹) و (۱۰)، به ترتیب لوله مسی شکل یافته در قالب بسته با دو و سه کنگره با استفاده از شبیه‌سازی نشان شده است. همان طور که از این شکل‌ها پیدا است، در قالب بسته دو کنگره‌ای، در صورت تغذیه ماده از دو انتها، لوله بطور کامل حفره قالب را پر می‌کند اما در قالب بسته سه کنگره‌ای، تنها کنگره‌های اول و آخر بطور کامل پر شده‌اند و کنگره میانی بطور ناقص شکل داده شده و ماده به درون آن جریان نیافته است.

چنانچه در شکل (۱۰) فشار داخلی افزایش یابد، نازک‌شدگی بیش از حد یا پارگی در لوله بوجود خواهد آمد. در صورتی که بارگذاری محوری زیاد شود چروکیدگی در لوله بوجود خواهد آمد. این حالت در شکل‌های (۱۱) نشان داده شده است.

به دلیل اینکه اولین نقص در پر شدن قالب‌های بسته در قالب سه کنگره‌ای ایجاد شده بود، یک مجموعه قالب باز با سه کنگره بر اساس مطالب بیان شده در بخش ۲ شبیه‌سازی گردید که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان گونه که در بخش (۳) اشاره گردید، تولید لوله‌های کنگره‌ای در قالب‌های باز شامل دو مرحله بود که شکل (۱۲- الف) مرحله بشکه‌ای شدن و شکل (۱۲- ب) قطعه شکل داده شده پس از جمع شدن صفحات قالب را نشان می‌دهد.

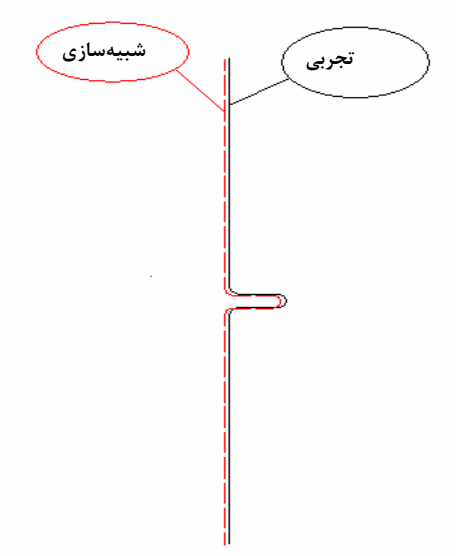
شکل (۱۳)، لوله‌های شبیه‌سازی شده با سه، پنج و هشت کنگره (تعداد کنگره‌ها دلخواه بوده) را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده، در مجموعه قالب باز، می‌توان لوله با چندین کنگره را شکل داد.

شکل (۱۴)، قطعات شکل داده شده در مجموعه قالب باز را برای لوله‌های سه، پنج و هشت کنگره نشان می‌دهد. شکل دادن این قطعات، ضمن تایید نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در قالب‌های باز محدودیت‌هایی که برای قالب بسته بیان شده بود، چندان اهمیت ندارد.

شکل (۱۵) نیز منحنی نیرو- جابه‌جایی آزمایشگاهی برای یک لوله سه کنگره‌ای در قالب باز را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود شیب تند منحنی در انتهای فرآیند مربوط به هم رسیدن و بسته شدن صفحه‌های قالب است.

(ب) (الف)

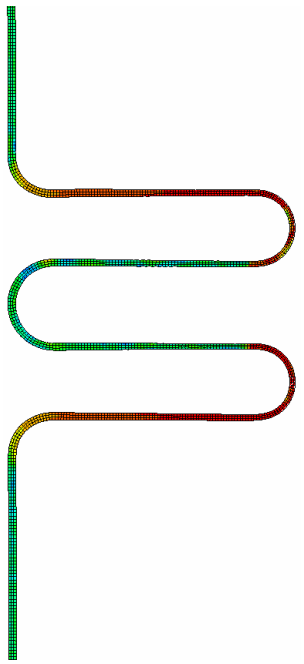
شکل۷- الف-لوله مسی اولیه، ب- لوله شکل یافته در قالب بسته یک کنگره‌ای



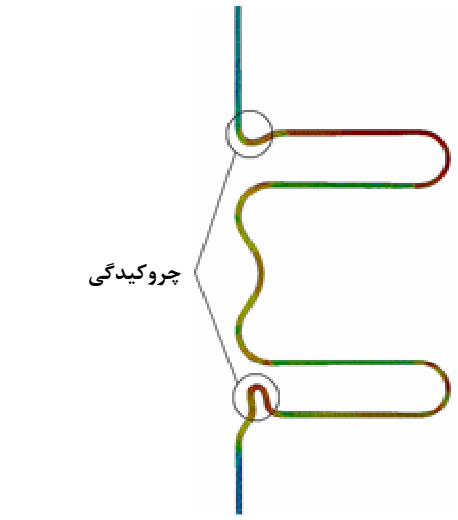
شکل۸- مقایسه پروفیل لوله مسی شکل یافته با پروفیل بدست آمده از شبیه‌سازی در قالب بسته یک کنگره‌ای

www.SID.ir

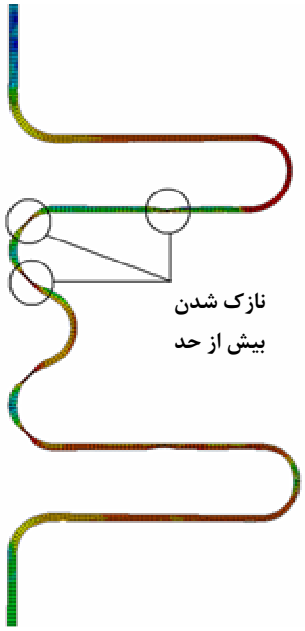
Archive of SID



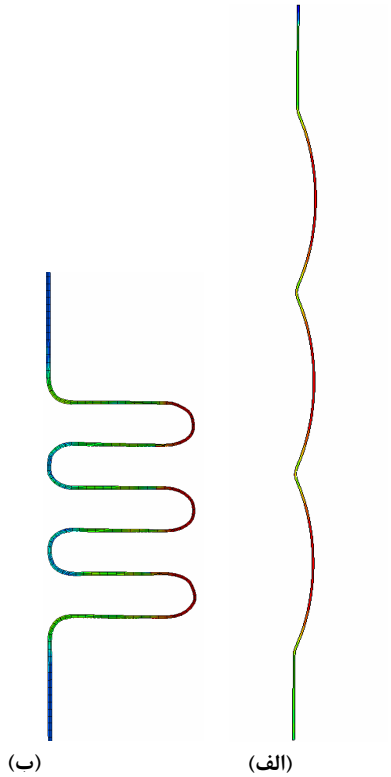
شکل۹- لوله مسی شکل یافته با شبیه‌سازی در قالب بسته دو کنگره‌ای



شکل۱۱- بارگذاری محوری بیش از حد و چروکیدگی ناشی از آن، بدست آمده از شبیه‌سازی برای لوله مسی شکل یافته در قالب بسته سه کنگره‌ای



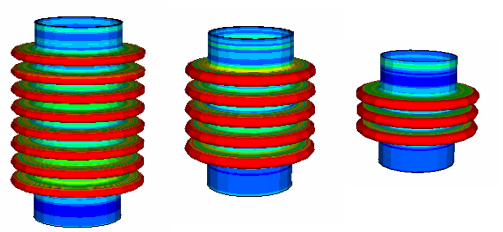
شکل۱۰- لوله مسی شکل‌یافته در قالب بسته سه کنگره‌ای، اعمال فشار بیش از حد و نازک‌شدگی ناشی از آن، با شبیه‌سازی



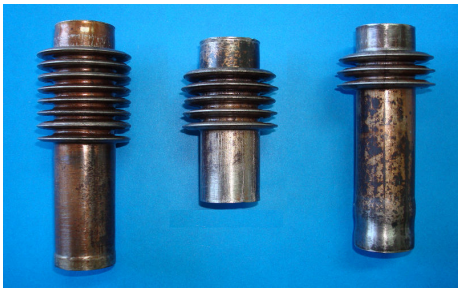
شکل ۱۲- الف- مرحله بشکه‌ای شدن لوله با سه کنگره، ب- قطعه شکل داده شده پس از جمع شدن قالب باز

www.SID.ir

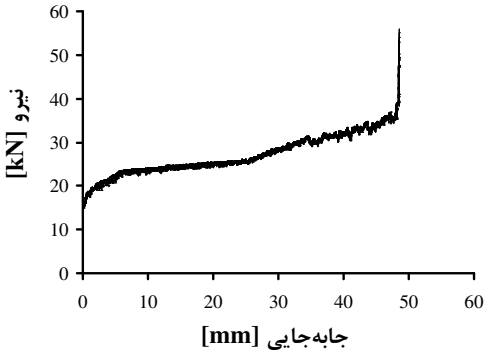
Archive of SID



شکل ۱۳- به ترتیب از سمت راست، لوله‌های کنگره‌ای با سه، پنج و هشت کنگره شبیه‌سازی شده در قالب باز



شکل ۱۴- به ترتیب از سمت راست، لوله‌های کنگره‌ای با سه، پنج و هشت کنگره شکل داده شده با روش آزمایشگاهی در قالب باز



شکل ۱۵- منحنی نیرو- جابه‌جایی آزمایشگاهی برای لوله سه کنگره‌ای در قالب باز

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، امکان شکل‌دهی لوله‌های چند کنگره‌ای در فرآیند هیدروفرمینگ لوله در قالب‌های بسته و باز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتیجه بدست آمده از این مقاله را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر ای لوله با یک کنگره و شبیه‌سازی آن، نشان داده است که شکل‌گیری لوله در قالب بسته تنها برای حالت یک کنگره‌ای مناسب می‌باشد. در لوله با دو کنگره در صورت تغذیه ماده از دو انتهای لوله، همین نتیجه با استفاده از شبیه‌سازی بدست آمده است. در عین حال، برای تولید لوله‌های با بیش از دو کنگره، قالب بسته مناسب نمی‌باشد. از این رو، یک مجموعه خاص قالب هیدروفرمینگ باز طراحی و ساخته شد که در آن محدودیت شکل دادن لوله‌های کنگره‌ای در قالب بسته رفع گردید. همچنین، نشان داده شده است که برای تولید لوله‌های کنگره‌ای در قالب، محدودیت موجود در قالب بسته چندان اهمیتی ندارد و می‌توان لوله‌های با چندین کنگره را شکل داد.

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] Kima, J., Kanga, B.S., Hwang S.M., and Park, H.J., “Numerical prediction of bursting failure in tube hydroforming by the FEM considering plastic anisotropy”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153–154, pp. 544–549, 2004.

[4] Kashani Zadeh, H., and Mosavi Mashhadi, M. “Finite element simulation and experiment in tube hydroforming of unequal T shapes”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 684–687, 2006.

[5] Elyasi, M., Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, A.H., Nourouzi, S. and Alinejad, G.M., “Numerical and experimental investigation on forming metallic bellows in closed and open die hydroforming”, Steel Research International, Vol. 79, pp. 148-154, 2008.

[6] Faraji, Gh., Mosavi Mashhadi, M., and Norouzifard, V. “Evaluation of effective

www.SID.ir

Archive of SID

parameters in metal bellows forming process", Journal of Materials Processing Technology, in press, 2008.

[7] Lee, S. W. "Study on the forming parameters of the metal bellows", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, pp. 47-53, 2002.

[8] ASTM, "Annual Book of ASTM", Vol. 01.02. Designation: A 370-88a.

[9] ABAQUS.CAE 6.4. 2003. "Theory Manual", Hibbit, Karlsson, Sorensen, Inc.

[10] Ngaile, G., Jaeger, S., and Altan, T., "Lubrication in tube hydroforming (THF) Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, pp. 108–115, 2004.

www.SID.ir