



بررسی عددی و تجربی حد شکل دهی در فرآیند هیدروفرمینگ برای قطعات سرکروی

علیرضا رحمانی - کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه

حسن صیدی - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

علی باروتی ها - دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

محمود صمدی - کارشناسی ارشد مهندسی طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: Alireza4390@yahoo.com

چکیده: یکی از فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی، روش کشش عمیق هیدرومکانیکی می باشد. در این مقاله بصورت تجربی و عددی تغییر کمترین ضخامت ورق در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی بررسی شده است. به همین منظور از قطعات نیم کروی در فرایند آزمایشگاهی استفاده شده است. از نرم افزار عددی آباکوس جهت حل عددی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی قطعات نیم کروی استفاده شده است. اثرات ضرایب های اصطکاک بین سنبه، ورق و ورق گیر و همچنین فشار سیال روی منحنی نسبت کشش و تغییرات ضخامت ورق بصورت کامل تحلیل شده است. همچنین چروکیدگی ورق در ناحیه فلنج نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تایید نتایج شبیه سازی اجزای محدود یک مطالعه با تجهیزات آزمایشگاهی نیز انجام شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. ملاحظه گردید که قطعات ساخته شده هیچگونه چروکیدگی و نازک شدگی در ناحیه فلنج ندارند.

واژه های کلیدی: شکل دهی هیدروفرمینگ، کشش عمیق، قطعات نیم کروی، حل عددی آباکوس.

Numerical and Experimental Evaluation of Forming Limit in Hydrodynamic Forming Process for Spherical End Samples

A. R. Rahmani, Dept. of Fab. and Prod. Eng., Kermanshah Branch of Science and Research, IAU

H. Seidi, Dept. of Applied Design, The Faculty of Mech. Eng., IAU, Branch of Takestan.

A. Barotih, PhD. Student, The Faculty of Mech. Eng., IAU, Branch of Takestan.

M. Samadi, Dept. of Applied Design, The Faculty of Mech. Eng., IAU, Branch of Takestan.

Abstract: Concentric tubular heat exchangers are the most important devices and more than any other heat exchangers are used in the industry. For concentric annuli, the "annular diameter ratio" parameter has an important role in the study of heat transfer in this kind of heat exchangers. In this article, numerical results of Nusselt number in annuli with a wide range of annular diameter ratios were compared with previous experimental results. In addition, range of Reynolds number changes, that are obtained based on the changes of hydraulic diameter, is intended between 4000 to 30000. In this study, Finite volume method is used for simulating the tube in tube heat exchanger model. The equations used were the mass and momentum conservation equations (Navier-Stokes equations) and the convective heat transfer equations. In numerical simulation model used in this paper, the turbulence flow of liquid water has been used. Finally, after comparing the numerical simulations with experimental results good agreement between these two results are observed.

Keywords: Convective heat transfer, Heat exchanger, Numerical simulation, Annular diameter ratio.

۱- مقدمه

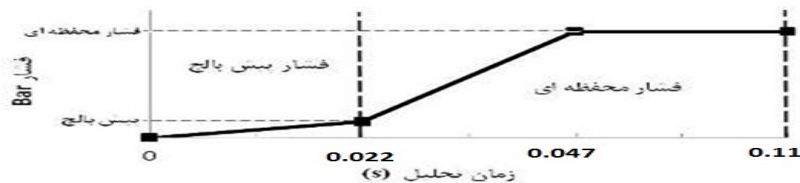
شکل‌دهی ورق‌های فلزی، ایجاد تغییر شکل مومسان در ورق جهت تولید قطعه‌ای با شکل هندسی مورد نظر می‌باشد. این فناوری در تولید قطعات بسیاری در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی و هوافضا کاربرد دارد. فرایندهای مختلفی از قبیل کشش عمیق، اتساع، خمکاری، چرخکاری جهت شکل‌دهی ورق‌ها وجود دارد که استفاده از آنها در تولید قطعه، بستگی به عواملی چون هندسه‌ی قطعه کار، جنس ورق، حجم تغییر شکل و غیره دارد. همواره محدودیتهایی در فرایندهای شکل‌دهی و تولید قطعات ورقی وجود دارد که تولید قطعه‌ی سالم و بدون عیب مستلزم رعایت این حدود می‌باشد. به علت اینکه این فرایندها دارای طبیعت کششی‌اند، بروز ناپایداری کششی و پارگی یک عامل محدود کننده‌ی مهم در فرایند شکل‌دهی می‌باشد. چین‌خوردگی ورق به سبب وجود تنش‌های فشاری در بخشهایی از قطعه، برگشت فنری و توزیع نایکنواخت ضخامت از دیگر عیوبی است که عمدتاً در این فرایندها ایجاد می‌شود. اصولاً کمتر شدن محدودیتهای موجود در فرایند ورق کاری، کاهش هزینه‌های و افزایش انعطاف‌پذیری از مسائلی است که همواره در طراحی و انجام این فرایندها مطلوب نظر بوده است. این مسئله با کاربرد روزافزون آلیاژهای سبک و پر استحکام که انجام فرایند شکل‌دهی را با مشکلات و محدودیتهای بیشتری مواجه می‌کنند و نیاز به تولید قطعات متنوع و با اشکال گاه بسیار پیچیده، تشدید می‌شود.

باراتامارکوس [۱] آنالیز تئوری و آزمایشی در مورد اشکال نامتقارن را با نرم افزار ABAQUS انجام داده و اثر ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار داده است. مریرا و فرون [۲] مساله پارگی در شکل‌دهی قطعات سرکروی را با استفاده تحلیل عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. عبدالله شعبان [۳] بصورت عددی تاثیر نرخ کرنش را در شکل‌دهی هیدروفرمینگ قطعات سرکروی بررسی نموده است. یوشیدا و کاتایاما [۴] شکل‌دهی قطعات سرکروی در ورق‌هایی با استحکام بالا را بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. کرومی و اتریچ [۵] به روش المان محدود قطعات مسی سرکروی را با تغییر شکل در چند مرحله با توزیع فشار بارگذاری را مورد بررسی قرار داده است. دیلمی و همکارانش [۶] با شبیه‌سازی عددی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی و انجام آزمایش‌های تجربی، اثر عواملی چون فشار پیش‌بالج، ارتفاع پیش‌بالج و فشار محفظه را بر روی توزیع ضخامت در قطعات استوانه‌ای مطالعه کردند. مهمترین پارامترهای موثر در نازک‌شدگی و افزایش ضخامت در فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی برای یک نسبت کشش ثابت شامل فشار محفظه‌ای، فشار پیش‌بالج، ارتفاع پیش‌بالج و فاصله بین لوح و ورق گیر می‌باشد. هدف این مقاله، بررسی عددی و تجربی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی می‌باشد که بطور خاص قطعات سرکروی بررسی شده‌اند. تاثیر تغییرات فشار محفظه‌ای، فشار پیش‌بالج و ارتفاع سنبه و لوح بر روی توزیع ضخامت مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل عددی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین با طراحی تجهیزات آزمایشگاهی مطالعه تجربی فرایند به منظور تایید شبیه‌سازی اجزا محدود نیز انجام شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی انطباق خوبی را نشان می‌دهد.

۲- مدل سازی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی

برای مدل سازی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی از نرم افزار عددی آباکوس استفاده شده است. نوع حل استفاده شده برای این مساله حل Explicit می‌باشد. در شبیه‌سازی جهت اعمال تاثیر فشار سیال شکل‌دهی از فشار با توزیع یکنواخت سطحی استفاده شده است. به دلیل زمان بر بودن فرایند حل مساله بدون کاستن از کلیت آن و به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبه، کل زمان شکل‌دهی

۰/۱۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد تغییرات فشار در مراحل پیش‌بالج و شکل‌دهی به صورت خطی می‌باشد. ماده مورد استفاده در شبیه‌سازی ST12 می‌باشد که خواص آن در جدول (۱) آمده است.

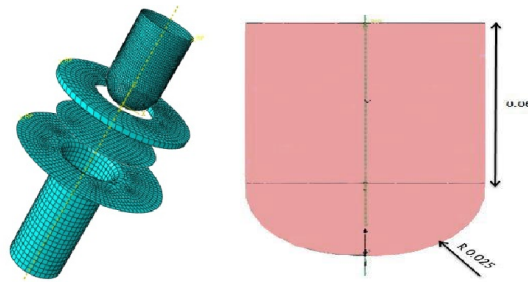


شکل (۱): تغییرات فشار محفظه‌ای در طول زمان فرایند

جدول (۱): خواص مواد و پارامترهای فرایند

ویژگی (یکا)	اندازه
جنس	فولاد کم کربن St-12
ضخامت (mm)	1
تنش تسلیم (MPa)	294
تنش نهایی (MPa)	401
چگالی (g/cm ³)	7.8
ضریب استحکام (MPa)	515
توان کرنش سختی	0.22
ضریب پواسون	0.3
مدول الاستیسته (GPa)	210
ارتفاع سنبه (mm)	60
شعاع سنبه (mm)	25
ابعاد حفره ماتریس (mm×mm)	30×30

قالب، سنبه و ورق‌گیر به صورت مدل شده اند. تعریف سطوح اصطکاکی در فرایند کشش عمیق یکی از بحرانی‌ترین مراحل در شبیه‌سازی این فرایند است. لذا تغییر ضخامت در این قطعات باید به خوبی مدل گردد. تغییر ضخامت تأثیر بسیار مهمی در تماس بین سطوح ورق با ورق‌گیر و ماتریس دارد که می‌تواند روی تنش‌های اصطکاکی سطوح ورق با ورق‌گیر و ماتریس اثر داشته باشد. طبق آزمایش‌های انجام شده ایده‌آل‌ترین ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده ضریب اصطکاک بین ورق و ورق‌گیر ۰/۰۵ و بین سنبه و ماتریس ۰/۱ با مدل اصطکاکی کلمب در نظر گرفته شده است. ابعاد سنبه و مدل شبیه‌سازی شده و شرایط اصطکاکی در شکل ۲ و در جدول ۲ نشان داده شده است. برای مقاطع سرکروی لوح‌های دایره‌ای ترجیح داده می‌شود. لوح با ضخامت اولیه ۱ میلی‌متر بوسیله المان‌های پوسته‌ای S4R مدل شده است.



شکل ۲: الف) ابعاد سنبله ب) مدل شبیه سازی شده

جدول ۲: ضرایب اصطکاک بین لوح و ابزار

۰/۰۵	ضریب اصطکاک در سطح تماس بین ورق و ورق گیر
۰/۱	ضریب اصطکاک در سطح تماس بین ورق و سنبله
۰/۰۵	ضریب اصطکاک در سطح تماس بین لوح و قالب

تسبیت کشش

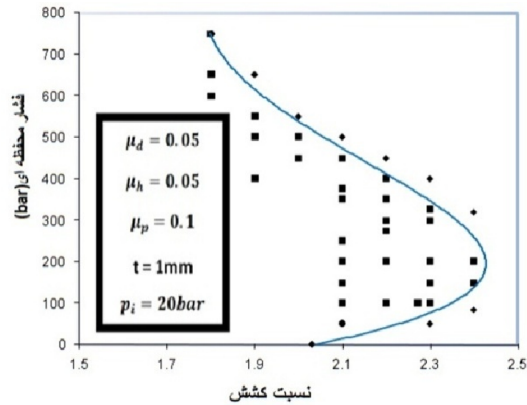
در قطعات دایره ای نسبت قطر ورق به قطر سنبله نسبت کشش به عنوان نسبت کشش تعریف می گردد.

۳- تاثیر فشار محفظه ای

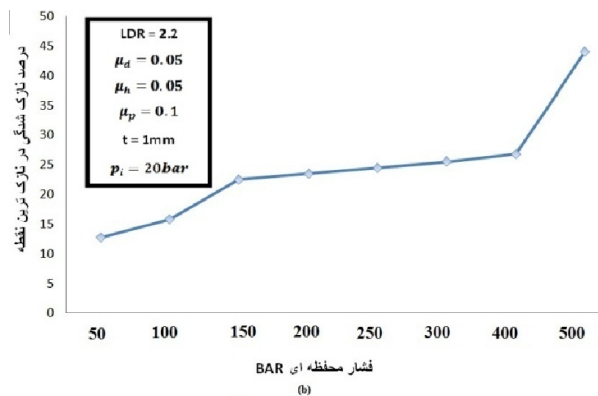
اعمال نیروی شکل دهی شامل فشار اولیه محفظه و فشار نهایی آن است. در مرحله اول که شامل بالچینگ ورق می باشد، تمامی درجات آزادی سنبله، ماتریس و ورق گیر گرفته می شود. در مرحله اول، فشار سیال به صورت تدریجی به ورق اعمال می گردد تا از اثرات دینامیکی جلوگیری شود. فشار سیال در مرحله بالچینگ به صورت خطی افزایش می یابد تا در انتها این مرحله فشار اولیه محفظه ای اعمال شده باشد. با اعمال این فشار در انتهای این مرحله بالاترین نقطه ورق به سنبله مماس خواهد شد.

در مرحله دوم درجه آزادی سنبله با اجازه حرکت آن به سمت حفره ماتریس تغییر داده می شود. سنبله با سرعت حداکثر ۵mm/s به سمت ماتریس حرکت می کند. در این مرحله با حرکت سنبله به داخل محفظه فشار به تدریج افزایش می یابد تا به میزان فشار تنظیم شیر اطمینان برسد. برای دامنه تغییرات فشار سیال حالات مختلفی در نظر گرفته شده به منظور تعیین تاثیر فشار محفظه ای بر روی حداکثر

نازک شدگی، شبیه‌سازی‌های متفاوتی برای فشارهای محفظه‌ای نهایی Bar ۵۰۰ و ۴۵۰ و ۴۰۰ و ۳۵۰ و ۳۰۰ انجام شد. فشار پیش‌بالج در همه حالت‌های مقدار ثابت Bar ۲۰ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، برای نسبت کشش ۲.۲، با افزایش فشار محفظه‌ای نازک شدگی در نازک‌ترین نقطه یعنی در کف بیشتر شده و همچنین نیز در ناحیه فلنج با افزایش فشار محفظه‌ای ضخامت افزایش یافته است. اما با توجه به افزایش فشار محفظه‌ای قطعه تولید شده با چروکیدگی کمتری در ناحیه فلانج به دست می‌آید. شکل ۵ چروکیدگی را در فلانج با فشار محفظه‌ای Bar ۳۵۰ نشان می‌دهد. در شکل ۳ برای نسبت کشش ۲/۲ در فشار Bar ۴۰۰ قطعه پاره شده است ولی در بقیه فشارهای قطعه تولیدی سالم می‌باشد.



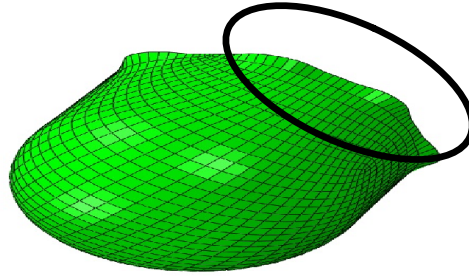
شکل ۳: ناحیه کاری کشش موفقیت آمیز برای فرایند



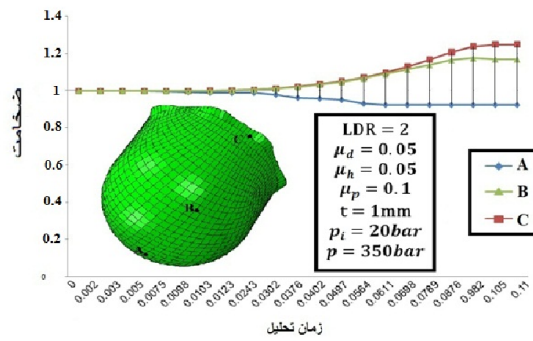
شکل ۴: نازک شدگی در فشارهای محفظه‌ای مختلف برای نسبت کشش ۲/۲

۴- توزیع ضخامت در سه منطقه لوح در فشارهای متفاوت

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییر ضخامت در سه منطقه از لوح بعد از تغییر شکل نشان داده شده است. در منطقه کف نازک‌شدگی را داریم در حالی که در منطقه فلنج افزایش ضخامت داریم. نازک‌ترین موقعیت مربوط به کف می‌باشد که این یکی از وجه تمایز بین کشش عمیق سنتی و کشش عمیق هیدرومکانیکی می‌باشد که نازک‌شدگی از دیواره بر روی شعاع سر سنبه منتقل می‌شود.

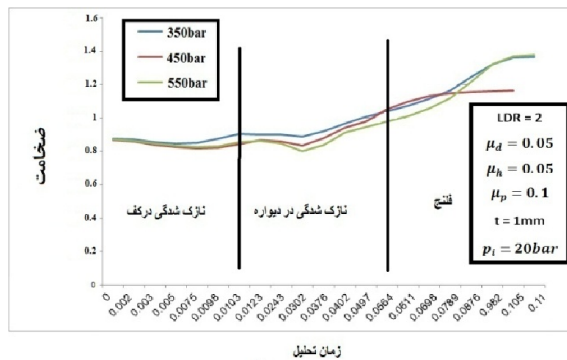


شکل ۵: چروکیدگی در فشار محفظه ای ۳۵۰ Bar



شکل ۶: تغییر ضخامت در سه منطقه فلنج در فشار ۳۵۰ Bar

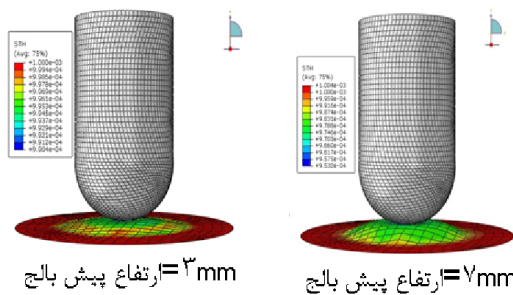
تأثیر فشار محفظه‌ای بر روی توزیع ضخامت در سه منطقه کف، دیواره و فلنج قطعه نهایی در سه فشار ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ Bar در شکل ۷ آمده است. محور افقی زمان تحلیل بین نقاط و مرکز لوح اولیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در فشارهای پایین تغییر ضخامت در شعاع سرسنبه کمتر از فشارهای بالا اتفاق افتاده و رفته رفته هر چقدر به سمت فلانج پیش می‌رویم ضخامت افزایش می‌یابد.



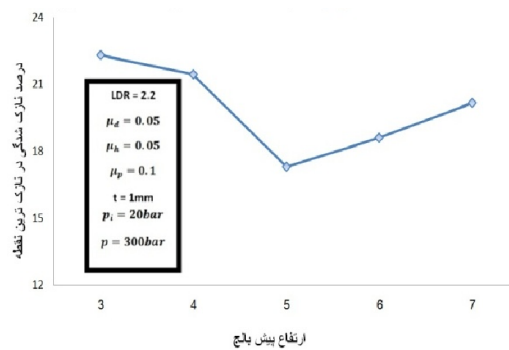
شکل ۷: نازک شدگی در فشارهای متفاوت در سه منطقه لوح برای نسبت کشش ۲

۵- تاثیر فشار پیش بالج

ارتفاع پیش‌بالج، فاصله بین لوح و سنبه در ابتدای شکل‌دهی می‌باشد. با زیاد شدن ارتفاع پیش‌بالج، کشش اولیه ورق افزایش می‌یابد. تاثیر ارتفاع‌های پیش‌بالج‌های متفاوت در شکل ۸ مشاهده می‌شود. برای هر فشار محفظه‌ای و فشار پیش‌بالج ثابت یک مقدار بهینه برای ارتفاع پیش‌بالج وجود دارد. با توجه به شکل ۹ برای فشار پیش‌بالج ۳۵ Bar، ارتفاع‌های کمتر از ۵ mm به دلیل کم‌بودن کشش اولیه در لوح، مناسب نمی‌باشند و نازک‌شدگی بیشتری دارند. ارتفاع‌های بیشتر از ۵ Bar نیز به دلیل فاصله زیاد و نچسبیدن لوح به سنبه و عدم شکل‌گیری اولیه نازک‌شدگی زیادتری دارند. بنابراین بهترین ارتفاع ۵ mm بوده و کمترین کاهش ضخامت را داشته است.



شکل ۸: تاثیر ارتفاع‌های پیش‌بالج‌های متفاوت

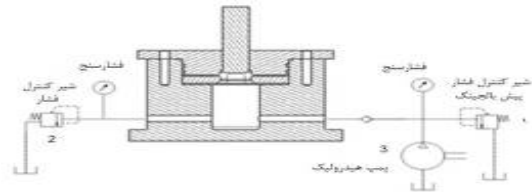


شکل ۹: تغییرات نازک‌شدگی در ارتفاع‌های پیش‌بالج متفاوت

۶- بررسی تجربی

به منظور تایید شبیه‌سازی عددی یک سیستم آزمایشگاهی فرایند هیدرومکانیک طراحی و ساخته شد. این سیستم در شکل ۱۰ نشان داده شده است دو شیر اطمینان ۱ و ۲ به ترتیب فشار پیش‌بالج و فشار حداکثر محفظه‌ای را کنترل می‌کنند. در مرحله پیش‌بالجینگ روغن به کمک پمپ ۳ به محفظه وارد شده، فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد. در مرحله شکل‌دهی با حرکت سنبه به داخل محفظه،

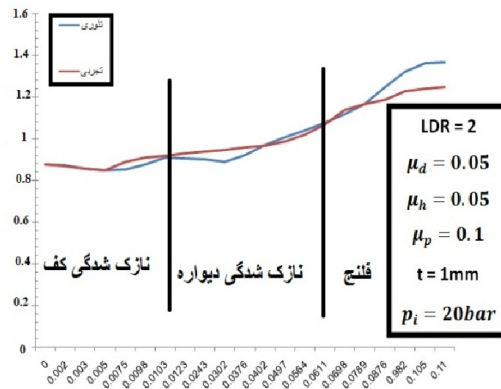
فشار روغن به شدت افزایش می‌یابد. شیر یکطرفه مانع از برگشت روغن و تخلیه‌ی آن از طریق مسیر پمپ روغن می‌شود. پس از رسیدن فشار به حد نهایی تعیین شده، عملیات در فشار ثابت ادامه می‌یابد. زمانی که ضخامت ورق ۱ میلی‌متر باشد فاصله بین ورق و قالب ۱ میلی‌متر است. شرایط اصطکاکی و خواص مواد مطابق شبیه سازی می‌باشد. با کنترل فشار محفظه‌ای به وسیله دو شیر اطمینان ۱ و ۲ فرایند کشش عمیق تحت نسبت‌های کشش متفاوت انجام گرفت و توزیع ضخامت و ناحیه کاری مربوط به این شرایط تعیین شد.



شکل ۱۰- سیستم آزمایش تجربی فرایند HDD

۷- مقایسه نتایج نازک شدگی شبیه سازی و تجربی

تاثیر توزیع ضخامت در سه منطقه کف، دیواره و فلنج با فشار پیش بالج ۲۰ bar در شکل ۱۱ آمده است برای بدست آمدن ضخامت قطعه به روش تجربی ابتدا قطعه مورد نظر ایجاد شده سپس این قطعه را با دستگاه وایرکات از وسط نصف نموده و یک لایه نازکی به اندازه ۳یا۲ میلی‌متر از وسط قطعه با وایرکات جدا نموده و با دستگاه ویدیو پروفایل ضخامت را در سه منطقه کف، دیواره و فلنج را اندازه گیری نموده و با فرایند شبیه سازی مقایسه می‌نماییم محور افقی زمان تحلیل و محور عمودی نازک شدگی را در سه منطقه نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱: نازک شدگی روش های تجربی و شبیه سازی برای نسبت کشش



شکل ۱۲: نمونه برش خورده با وایرکات

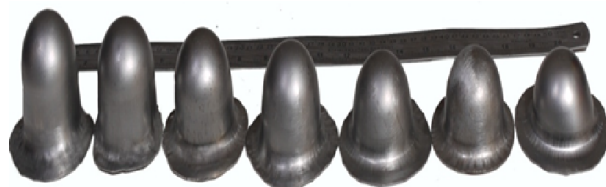


شکل ۱۳: اندازه‌گیری نمونه با استفاده از دستگاه ویدیو پروفایل

مطابق پیش‌بینی نتایج شبیه‌سازی پارگی در حالت کشش عمیق سستی در شعاع سرسنبه رخ می‌دهد در حالی که در کشش عمیق هیدرومکانیکی بدلیل وجود فشار سیال و ایجاد اصطکاک در ناحیه تماس لوح و دیواره سنبه احتمال ایجاد پارگی در ناحیه تماس با دیواره بیشتر است. شکل ۱۴ پارگی در قطعات بدست آمده از کار تجربی تحت دو فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی و سستی را نشان می‌دهد که تأییدکننده نتایج شبیه‌سازی می‌باشد.



شکل ۱۴: نمونه‌های از پارگی به وجود آمده (a) کشش عمیق سستی (b) کشش عمیق هیدرومکانیکی



شکل ۱۵: نمونه‌های سالم تولید شده به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی

۸- نتیجه‌گیری

- در این مقاله شبیه‌سازی عددی فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکال قطعات مربعی شکل انجام شد نتایج زیر بدست آمد:
- ۱- با افزایش فشار محفظه‌ای نازک شدگی بیشتر شده، اما با افزایش فشار چروکیدگی کمتری در ناحیه فلانچ قطعه تولید شده مشاهده می‌شود.
 - ۲- در فشارهای پیش‌بالج خیلی کم، لوح نمی‌تواند به سنبه بچسبد و شکل اولیه سنبه را به خود بگیرد در نتیجه میزان نازک شدگی افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش ضخامت ورق ناحیه کاری بزرگتر و نسبت کشش بهینه افزایش می‌یابد این نسبت کشش بهینه در فشارهای محفظه‌ای بالاتر بوجود می‌آید.

۴- برای هر فشار محفظه‌ای و فشار پیش‌بالج ثابت یک مقدار بهینه برای ارتفاع پیش‌بالج وجود دارد که با افزایش یا کاهش این ارتفاع درصد نازک شدگی زیادتیر می‌شود.

۹- مراجع

- [1] M.J.M. Barata marque and R.M.S.O. Baptista" theoretical and experimental analisys of axisymmetrical deep drawing" ,Instituto Superior T@cnico, Departamento de EngenhariaMec~nica, cemul (INIC), Lisboa, Portugal.
- [2] L.P. Moreira a,*, G. Ferron b "Influence of the plasticity model in sheet metal forming simulations Journal of Materials Processing Technology" ,155-156 (2004) 1596-1603
- [3] Abdallashaban"ANncremental complete solution of the steretch-forming and deep-drawing of a circular blank using a hemispherical punch " , Institute of Industrial Science, umverslty of Tokyo, Roppongi, Tokyo, Japan (Recewed10 July 1975}
- [4] T. Yoshida, T. Katayama, M." UsudaForming-limit analysis of hemispherical-punch stretching using the three-dimensional finite-element method Journal of Materials Processing Technology", 50 (1995) 226-237
- [5] K. Kormi, D.C. Webb, R.A. Etheridge " FEM simulation of the pressing of a strip into a cylindricaldie and of a circular plate into a hemispherical one and their",comparison with experiment centre for Advanced Research in engineering, faculty of information and engineering systems, leedsMetropolitan University, Leeds LS1 3HE, UK (Received 30 March 1993; accepted 12 October 1993)
- [6] H.D.Azodi, H.MoslemiNaeini, M.H.Parsa, G.H.Liaghat, study on wall thickness distribution in hydromechanical Deep drawing of cylindrical cups, proceedings of Tehran International congress on manufacturing engineering (TICME2007), December 10-13, 2007, Tehran, IR Iran.
- [7] A.Shaghaghimoghadam,A.Assempour." Fin design for drums in truck mixer industry considering springback compensation strategy- (Metal FormingConference2006)