

۲۰۰ دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۳۸۹ تا Vol. 48, No. 4, Winter 2017, pp. 389-400



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک AmirKabir Jounrnal of Science & Research Mechanical Engineering ASJR-ME

اصلاح مسیربارگذاری فشار داخلی و تغذیه محوری در فرایند هیدروفرمینگ لولههای پلهای استوانهای بهمنظور بهبود توزیع ضخامت

فروزان محمدعلىزاده (، عبدالحميد گرجى **، محمد بخشى ، مجيد الياسى *

۱– کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۲– دانشیار، مرکز پژوهشی شکل دهی فلزات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۳– استاد، مرکز پژوهشی شکل دهی فلزات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۴– استادیار، مرکز پژوهشی شکل دهی فلزات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۷ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۳)

فشار داخلی و تغذیه محوری، از مهمترین پارامترهای شکلدهی لوله به روش هیدروفرمینگ است. فشار سیال داخل لوله و تغذیه مواد حاصل از نیروی محوری سنبهها، سبب تغییر شکل لوله می شود. چگونگی اعمال همزمان این دو پارامتر، کیفیت، توزیع ضخامت و حد شکلدهی قطعه نهایی را تحت تأثیر قرار می دهد. در این مقاله، اثر مسیر فشار داخلی و تغذیه محوری به منظور بهبود توزیع ضخامت لولههای پلهای استوانهای بررسی شده است. به علاوه، با استفاده از روش جدیدی که به منظور رفع چروک ارائه شد، از چروکهای ایجاد شده در لوله استفاده شد. در ابتدا، مسیرهای بارگذاری فشار ثابت با سطوح فشار متفاوت به روش شبیه سازی و آزمایش تجربی بررسی شدند. سپس، سطوح فشاری که در آن قطعات پاره نشده و به طور سالم یا با چروک به دست آمدند، انتخاب شد و اثر تغذیه محوری در این مسیرها مطور جداگانه ابتدا با شبیه سازی و سپس با آزمایشهای تجربی بررسی شد. نتایج به دستآمده نشان داده است که تغذیه محوری در مرحله ابتدایی همراه با افزایش فشار، توزیع ضخامت قطعات را در مرحله نهایی بهبود می بخشد. همچنین، با استفاده از روش جدید و موثر ارائه شده در این مقاله به منظور رفع چروک به دست ایجاد شده در سطح لوله با تغییر جهت تغذیه محوری در مرحله ابتدایی همراه با افزایش فشار، توزیع ضخامت قطعات را در ایجاد شده در سطح لوله با تغییر جهت تغذیه محوری، رفع شدند و قطعه سالم با توزیع ضخامت بهتر به دست آمد. از طرفی با ایجاد شده در سطح لوله با تغییر جهت تغذیه محوری، رفع شدند و قطعه سالم با توزیع ضخامت بهتر به دست آمد. از طرفی با

كلماتكليدى:

هیدروفرمینگ لوله، فشار داخلی، تغذیه محوری، استفاده از چروک، شبیهسازی اجزای محدود



برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mohammadalizade, F., Gorji, A. H., Bakhshi, M., and Elyasi, M., 2017. "Modifying Internal Pressure and Axial Feeding Loading Paths in Hydroforming Process of Cylindrical Stepped Tube to Improve Thickness Distribution". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(4), pp. 389–400.

Please cite this article using:

ویسنده مسئول و عهدهدار مکاتبات: Email: hamidgorji@nit.ac.ir

۱ – مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله فرایندی است که برای تولید قطعات یکپارچه و بدون درز در سالهای اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. این روش، مناسبترین روش تولید لولههای پلهای استوانهای است. تولید لوله با این فرایند، دارای مزایای متعددی است که بهعنوان نمونه میتوان به بهبود خواص مکانیکی، کاهش مراحل تولید، افزایش مقاومت به خوردگی به سبب عدم استفاده از عملیات جوشکاری، کاهش وزن، کاهش هزینه ابزار، افزایش دقت و افزایش بهرهوری استفاده از مواد اشاره نمود [۱–۳].

تاکنون بررسیهای بسیاری بر روی پارامترهای تأثیرگذار در فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام شده و تأثیر پارامترهایی مانند خواص مواد، فاکتورهای هندسی، فاکتورهای فرایندی، اصطکاک و روانکاری مطالعه شده است [۴]. موفقیت یک فرایند هیدروفرمینگ بهطور قابلملاحظهای به پارامترهای انتخابی بستگی دارد. مسیر بارگذاری، یعنی منحنی تغییرات فشار داخلی بر حسب تغذیه محوری، یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در فرایند هیدروفرمینگ لوله است [۵].

عيوب متداول در فرايند هيدروفرمينگ شامل يارگي، كمانش، چروکیدگی، تابیدگی و پرنشدگی گوشه قالب میباشد. هر یک از این عيوب مي تواند به علت انتخاب نامناسب يارامترهاي فرآيند مانند فشار داخلی و تغذیه محوری بهوجود آید [۶]. در این فرایند اگر از فشار داخلی بهتنهایی برای شکل دهی استفاده شود، در ناحیه تغییر شکل به علت کاهش ضخامت شدید، ممکن است پارگی ایجاد شود. برای اجتناب از كاهش موضعى ضخامت جداره لوله، همزمان با اعمال فشار داخلى، لوله از یک سمت یا هر دو سمت تحت بار محوری فشاری نیز قرار می گیرد تا ماده بیشتری در راستای محوری به ناحیه تغییر شکل وارد شود. با این حال، تغذیه محوری نامناسب سبب بهوجود آمدن عیوب دیگری از قبیل چروکیدگی و کمانش لوله و یا پر نشدن گوشههای قالب می شود. اگر شکل دهی به صورت ترکیبی مناسب از تغذیه محوری و فشار داخلی باشد که بتواند مقدار کافی مواد را به منطقه تغییر شکل برساند، این امر منجر به نازکشدگی کمتر می شود و در نتیجه می توان از عیوب چروکیدگی، خمشدگی و ترکیدگی جلوگیری کرد. گاهی در مرحله نهایی میتوان با افزایش فشار، چروکهای ایجاد شده را برطرف نمود [۷–۹].

کچ [۱۰] به کمک شبیه سازی اجزای محدود اثر مسیر بار گذاری را بر نازک شدگی دیواره لوله T شکل مورد مطالعه قرار داد. وی بیان نمود که چنانچه در مراحل اولیه یک مسیر فشار، تغذیه محوری زیاد و فشار سیال کم باشد، این امر میتواند در جبران نازک شدگی دیواره لوله در نواحی انبساط موثرتر باشد.

یوان و همکاران [۱۱, ۱۲] رفتار چروکیدگی و نحوه کنترل و استفاده از چروکها را در هیدروفرمینگ لولههای پلهای استوانهای با استفاده از شبیهسازی و آزمایشهای تجربی بررسی کردند. آنها خاطر نشان کردند که همه چروکها عیب محسوب نمیشوند و در بعضی از موارد، قطعه

پس از چروکیدگی همچنان میتواند تغییر شکل دهد و به شکل موردنظر برسد. آنها این چروکها را چروک مفید نامیدند و شکل پذیری قطعه را با استفاده از این نوع چروک بهبود بخشیدند. آنها چروکها را به سه دسته چروک مفید، چروک مرده و چروک پارگی تقسیمبندی نمودند. چروکهای مفید درحالی که شرایط بارگذاری مناسب باشد ایجاد میشوند و در مرحله بعدی با افزایش فشار قابل رفع میباشند. درصورتی که شرایط تنش ارضا نشود چروک پارگی حاصل خواهد شد. چروک مرده نیز به علت ارضا نشدن شرایط هندسی ایجاد میشود. آنها با بهره گیری از این مفاهیم، پنجره شکل دهی را در فرایند هیدروفرمینگ لوله گسترش دادند.

در پژوهشی دیگر یوان و همکاران برای شکلدهی یک لوله آلومینیومی از چروکها بهعنوان پیش فرم استفاده نمودند. آنها به بررسی پارامترهای قالب پیش فرم به منظور ایجاد چروک پرداختند تا در مرحله بعد در قالب نهایی با هندسه متفاوت بتوانند آن را از بین ببرند [۱۳]. از محدودیتهای آن تحقیق این بود که قالبهای پیش فرم و نهایی استفاده شده از لحاظ مکانیزم حرکتی ثابت بوده است. به علاوه، آنها در زمینه رفع سایر چروکها تحقیقی انجام ندادند.

لوح موسوی و همکاران [۱۴] به هیدروفرمینگ نوسانی لوله، بهعنوان روشی برای بهبود فرایند شکلدهی لوله اشاره نمودند. آنها ساز و کار بهبود پرشدگی گوشههای قالب را در یک قالب جعبهای شکل سنتی هیدروفرمینگ بررسی نمودند. آنها نشان دادند با استفاده از مسیر بارگذاری نوسانی ارایهشده، پرشدگی گوشههای قالب را با کنترل و حذف چروک بهبود دادهاند اما نتوانستند به طور کامل به گوشههای تیز دست یابند.

در ادامه الیاسی و همکاران [۱۵] روش هیدروفرمینگ جدیدی را برای بهبود پرشدگی گوشههای قالب در تولید قطعات لولهای پلهای ارایه دادند. در قالب جدید بوشهای متحرکی قرار داده شد که برای شکل دهی از ایجاد خم بهجای حرکت مواد در قالب متداول هیدروفرمینگ استفاده شد و با استفاده از این روش، پرشدگی و توزیع ضخامت بهدست آمده نسبت به روش متداول هیدروفرمینگ و در شرایط یکسان بهبود یافت.

در پژوهشی دیگر الیاسی و همکاران [۱۶] در قالب جدیدی که ارایه داده بودند، تاثیر مسیر بارگذاری را بر روی توزیع ضخامت و هندسه بهدست آمده بررسی کردند و بیان داشتند که با اعمال مسیر بارگذاری مناسب میتوان به توزیع ضخامت یکنواختتر و گوشههای تیز دست یافت. آنها همچنین عنوان نمودند که بدون توجه به میزان پر شدن گوشهها، نمونه شکل داده شده با سطح فشار پایینتر، دارای توزیع ضخامت بهتری نسبت به نمونه بهدست آمده با فشار بالاتر است.

پژوهشهایی که تاکنون بهمنظور بهبود توزیع ضخامت با بهرهگیری از چروکها در مرحله پیشفرم انجام گرفته است، محدود به قالبهای متداول هیدروفرمینگ بوده است. در این مقاله روش جدیدی بهمنظور بهبود توزیع ضخامت قطعه در فرایند هیدروفرمینگ لولههای پلهای استوانهای، ارایه شده است که در آن ایجاد چروک بهعنوان یک حالت مطلوب در نظر گرفته میشود. با استفاده از روش ارایهشده و

اصلاح مسیر بارگذاری، حتی چروکهای مرده که با روشهای ارایهشده در پژوهشهای قبلی قابل رفع نبوده و به عنوان عیب از آن یاد می شد، برطرف شده است. همچنین مسیرهای بارگذاری متفاوت و تاثیر آنها در بهبود توزيع ضخامت مورد بررسي قرار گرفته است. به علاوه، تاثير تغذيه محوری نسبت به سطوح فشار در فرایند، بر روی توزیع ضخامت نشان داده شده است.

۲- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی

شکل ۱ شماتیک مجموعه قالب مورداستفاده را نشان میدهد. مکانیزم قالب به کار رفته در این یژوهش مشابه قالب معرفی شده در مرجع [۱۵] است که در مقایسه با قالبهای متداول تولید لولههای پلهای، دارای مزیت پرشدگی کامل قالب و توزیع ضخامت یکنواخت تر است. در این مجموعه قالب بر خلاف قالبهای متداول که از دو نیمه ثابت تشکیل شدهاند، از یک بدنه و بوشهای متحرک در داخل آن استفاده شده است. در ابتدای فرایند بوشها و سنبهها ثابت بوده و با افزایش فشار، لوله بالج آزاد می شود. سپس در مرحله کالیبراسیون، همراه با حرکت سنبههای تغذيه، بوشها نيز بهمنظور تغذيه مواد، حركت مي كنند و شكل دهي نهايي انجام می شود. شکل ۲ هندسه و ابعاد قالب استفاده شده را نشان می دهد.

تماس سنبهها با سطح داخلی لوله در دو طرف حدود ۲۵ میلیمتر است و همچنین از اورینگهای آب بندی روی هر سنبه استفاده شده است و با توجه به اینکه لوله بین سنبه و بوش با انطباق پرسی نرم قرار گرفته است، آب بندی در تمام حالات انجام می شود.

لوله استفادهشده از جنس فولاد زنگنزن آستنیتی SS316L است. مشخصات لوله با معادله هولومون برازش شده است که ضریب استحکام (K) و نمای کرنش سختی (n) آن بهترتیب برابر ۱۴۲۵ مگایاسکال و ۵۸/۰ میباشد.

بهمنظور اعمال تغذیه محوری، از یک دستگاه پرس اونیورسال هیدرولیکی DMG^۳ با ظرفیت نهایی ۶۰۰ کیلونیوتن استفاده شده است. همچنین بهمنظور تامین فشار داخلی از یک واحد هیدرولیکی که قابلیت اعمال فشار تا ۳۵ مگایاسکال را دارد، استفاده شد. شکل ۳ اجزای قالب استفادهشده را نشان میدهد.

۳- شبیهسازی اجزای محدود

اجزاى نرمافزار بەمنظور شبيەسازى از محدود ABAQUS/Explicit 6.10 استفاده شده است. با توجه به تقارن هندسی و بهمنظور سادهسازی، فقط نیمی از لوله و نیز سطوحی از قالب که با لوله در تماس هستند، مدلسازی شده اند. تمامی اجزا بهصورت المان پوستهای[†] و سه بعدی، در محیط نرم افزار با روش دورانی⁶ حول

- Calibration Denison & Mayes Group
- Shell
- 5 Revolution

محور تقارن، ایجاد شده است. قالب به صورت صلب و لوله به صورت شکل پذیر^۷ درنظر گرفته شده است. لوله همگن و همسانگرد فرض شده است. نوع و تعداد المان استفاده شده برای لوله بهترتیب S4R و ۸۰۰۰ و مش بندی سطوح قالب و سنبهها از نوع R3D4 می باشد. رفتار تماسی بين سطوح قالب و لوله با استفاده از قانون اصطكاك كولمب و با ضريب اصطکاک ۰/۰۶ در نظر گرفته شده است [۱۷]. مدل شبکهبندی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک قالب مورد استفاده



شکل ۲: هندسه و ابعاد قالب و بوش استفاده شده

- 6 Discrete rigid
- Deformable
- Coulomb's friction law

Free bulge



شکل ۳: اجزای مجموعه قالب هیدروفرمینگ استفاده شده



شکل ۴: مدل شبکهبندی شده در نرمافزار شبیهسازی

٤- نتايج و بحث

٤-١- بررسی تاثیر سطح فشار بر شکلدهی و توزیع ضخامت لوله

بهمنظور بررسی اثر مسیر فشار و به دست آوردن بازههای فشار ممکن شکل دهی، ابتدا مسیر بارگذاری فشار ثابت که یکی از سادهترین نوع مسیرهای بارگذاری در هیدروفرمینگ لوله است، مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۵، این مسیر بارگذاری از دو مرحله بالج آزاد (OA) و کالیبراسیون (AB) تشکیل شده است. همانگونه که از شکل پیداست، در مرحله بالج آزاد درحالی که سنبه ثابت است، افزایش فشار سیال باعث افزایش قطر لوله می شود و پس از ثابت ماندن در یک فشار بیشینه، مرحله بعدی که کالیبراسیون است، آغاز می شود. در مرحله کالیبراسیون تغذیه محوری اعمال می شود.

پس از انجام شبیهسازی، نتایج بهدست آمده از مسیر فشارهای ثابت نشان داد که در فشار کمتر از ۱۸/۵ مگاپاسکال، در قطعات چروک بسیار شدیدی ایجاد می شود. در فشار بیشتر از ۲۰/۵ مگاپاسکال قطعات پاره می شوند. بنابراین در ادامه پژوهش، فشارهای در محدوده ۱۸/۵ تا ۲۰/۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفتند. مسیرهای بارگذاری در سطوح فشار ۱۸/۵، ۱۸/۵ و ۲۰/۵ مگاپاسکال با جابجایی ۲۵ میلی متر در شکل ۶ نشان داده شده است.



در شکلهای ۲، ۸ و ۹ قطعات شکلداده شده به صورت تجربی و نتایج شبیه سازی متناظر فشارهای گفته شده، برای حالتهایی که قطعه چروک، سالم و پاره می شود، نشان داده شده است. شکل ۱۰ توزیع ضخامت متناظر با این قطعات را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در قطعه چروک شده، توزیع ضخامت متناسب با شکل سطح قطعه می باشد، به گونه ای که در نقاط بر آمدگی که ارتفاع چروک بیشتر است، نازک شدگی بیشتر و در نقاط فرورفتگی که ارتفاع چروک کم است، نازک شدگی کمتر مشاهده می شود. توزیع ضخامت قطعه سالم در طول نازک شدگی کمتر مشاهده می شود. توزیع ضخامت قطعه سالم در طول ناز با فشار بیشینه ۱۹/۵ مگاپاسکال یکنواخت می باشد. بیشترین کاهش ضخامت در این قطعه در ناحیه تغییر شکل لوله، بر ابر با ۲۱/۶% است.

با بررسی نمودار توزیع ضخامت قطعه در فشار ۲۰/۵ مگاپاسکال دیده میشود که با افزایش فشار به این سطح، در قسمت میانی لوله به علت بالج بیش از حد، نازکشدگی موضعی و سپس پارگی رخ داده است. ضخامت بحرانی در این حالت بارگذاری در آزمایش تجربی و شبیه سازی متناظر در شکلهای ۹ و ۱۰ برابر با ۲۸/۰ میلی متر است که به عنوان حداقل اندازه ضخامت مجاز برای قابل قبول بودن نتایج شبیه سازی در ادامه کار درنظر گرفته شد.



شکل ۶: مسیر بارگذاری با سطوح فشار متفاوت (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرایند



شکل ۷: قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیهسازی، حاصل از مسیر بارگذاری با فشار ثابت ۱۸/۵ مگاپاسکال



شکل ۸: قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیهسازی، حاصل از مسیر بارگذاری با فشار ثابت ۱۹/۵ مگاپاسکال



شکل ۹: قطعه بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیهسازی، حاصل از مسیر بارگذاری با فشار ثابت ۲۰/۵ مگاپاسکال



٤-٢- تاثیر اعمال تغذیه محوری در مرحله ابتدایی همراه با افزایش فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه نهایی

عدم اعمال تغذیه محوری در مرحله بالج باعث کاهش ضخامت قطعه در مرحله نهایی شکل دهی می شود. به عبارت دیگر، در مسیر بارگذاری فشار ثابت به این دلیل که در زمان بالج هیچ تغذیه ای وجود ندارد، کاهش ضخامت زیادی در قطعه نهایی به وجود می آید. برای کم کردن مقدار کاهش ضخامت در مرحله بالج، مسیر بارگذاری نشان داده

شده در شکل ۱۱، با ایجاد تغییراتی در مسیر بارگذاری شکل ۶ با سطح فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال که در آن قطعه بهطور سالم شکل داده شد، به گونهای انتخاب شد تا تغذیه محوری در مرحله افزایش فشار ابتدایی نیز اعمال شود و در زمان بالج جریان مواد بیشتری را به منطقه تغییر شکل برساند و از کرنش بیش از حد درلوله جلوگیری شود. با استفاده از شبیهسازی، فشارهای بالج مناسب بهمنظور آغاز تغذیه محوری همراه با افزایش فشار بررسی شد. در شبیهسازیها مشاهده شد که تا فشار ۱۵ مگاپاسکال، تغییر قطر لوله بر اثر فشار سیال بسیار کم است. بهمنظور جلوگیری از کمانش لوله، تغذیه محوری بعد از فشار ۱۵ مگاپاسکال آغاز شد و تا فشار بیشینه ۱۹/۵ مگایاسکال بصورت خطی افزایش یافت، سیس فشار در مقدار بیشینه ثابت نگهداشته شد و تغذیه محوری ادامه داده شد تا حفره قالب پر شود. قطعه سالم شکل گرفته با این مسیر بارگذاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. توزیع ضخامت بهدستآمده از این مسیر بارگذاری با فشار بیشینه ۱۹/۵ مگاپاسکال در مقایسه با قطعه سالم حاصل از مسیر بارگذاری فشار ثابت، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود با انتخاب مسیر بارگذاری جدید، میزان کاهش ضخامت به مقدار ۴/۶% نسبت به حالت قبل کمتر شده و توزیع ضخامت بهبود یافته است.

با توجه به نتایج بهدستآمده از شکل ۱۰ و مقایسه حداقل ضخامتهای نمونههای سالم و معیوب، مشاهده میشود هر چه فشار شکل دهی بالاتر باشد میزان کاهش ضخامت بیشتر می شود. به منظور دستیابی به ضخامت بیشتر در ناحیه تغییر شکل، کافی است تا سطح فشار پایین تر نگه داشته شود و همچنین تغذیه مواد بیشتری به ناحیه تغییر شکل اعمال شود. هرچه میزان این تغذیه و مواد هدایت شده به منطقه شکل دهی نسبت به سطح فشار اعمالی در آن بیشتر باشد، کاهش ضخامت کمتری ایجاد می کند. از طرفی تغذیه بیشتر و فشار پایین تر نقذیه بیشتر از حد متناسب با فشار داخلی، ایجاد می شود. اما عدهای از پژوهشگران از چروک های ریز و با ارتفاع کم به عنوان پیش فرم استفاده نمودهاند تا قابلیت شکل دهی را بالا ببرند. پس، ایجاد عمدی چروک را به شرط از بین بردن آن در مراحل بعدی شکل دهی، می توان به عنوان یک

£-۳- معرفی روش جدید بهمنظور رفع چروک و بهرهگیری از ضخامت در سطح فشار پایین

در شکل ۷ مشاهده شد در مسیر فشار ثابت با فشار ۱۸/۵ مگاپاسگال قطعه چروک می شود و همچنین در شکل ۱۰ نشان داده شد، در فشار ۱۸/۵ مگاپاسکال، قطعهای که در طول آن چروک ایجاد شده دارای کاهش ضخامت کمتری نسبت به قطعه سالم در فشار ۱۹/۵ مگاپاسکال است.

شکل ۱۴ مسیر بارگذاری فشار ثابت با فشار کالیبره ۱۸/۵ مگاپاسکال را با افزایش فشاری، در انتهای مسیر بارگذاری نشان میدهد. با توجه



شکل ۱۱: مسیر بارگذاری اعمال تغذیه محوری در مرحله بالج (الف) مسیر فشار (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرایند



شکل ۱۲: قطعه سالم شکل گرفته با مسیر بارگذاری شکل ۱۱



شکل ۱۳: مقایسه توزیع ضخامت قطعات حاصل از مسیرهای بارگذاری شکل ۶ و شکل ۱۱ در شبیهسازی

به اینکه در مراحل اولیه این مسیر بارگذاری چروک ایجاد می شود و پژوهشگران پیشین از جمله دومان و هارتل [۹]، افزایش فشار در انتهای فرایند را راهی برای رفع چروکهای ایجادشده در مراحل اولیه بیان نمودند، در این مسیر بارگذاری، افزایش فشار در مرحله انتهایی مسیر بارگذاری شکل ۶ بررسی شد.

در این مسیر بارگذاری به منظور کم کردن کاهش ضخامت در قطعه نهایی، در ابتدا سعی شد میزان فشار در هنگام شروع تغذیه، در سطح پایین تری نگه داشته شود (۱۸/۵مگاپاسگال) تا در قطعه چروک ایجاد شود و سپس با افزایش فشار در انتهای فرایند، چروکهای ایجادشده در مرحله اولیه رفع شود. برای رفع چروک در انتهای مسیربارگذاری، فشارهای نهایی متفاوت با استفاده از شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد در فشارهای نهایی کمتر از ۳۰ مگاپاسکال چروکها رفع نشدند و فشارهای بیشتر از آن موجب پارگی لوله شد. بنابرین مسیر بارگذاری جدید با فشار کالیبره ۳۰ مگاپاسگال آزمایش شد.

در شکل ۱۵، قطعه بهدستآمده از نتایج شبیهسازی و آزمایش تجربی با مسیر بارگذاری متناظر با شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میشود، چروکهای موجود در ناحیه میانی لوله با افزایش فشار رفع شده است. اما چروکهایی که در گوشههای لوله وجود داشت با این مسیر بارگذاری از بین نرفته است. همانطور که مشاهده میشود چروکهای کنارهها از نوع چروکهای مرده است.

به منظور رفع این نوع چروک، روش جدیدی در این مقاله ارایه شد. در این روش در انتهای فرایند با افزایش سطح فشار، برای باز شدن چروکهای ایجاد شده، سنبه های شکل دهی مقداری در جهت معکوس حرکت میکنند (سنبه ها به سمت عقب برگردانده می شوند) تا با افزایش فشار، لوله در جهت طولی منبسط شده و بوش ها را که قابلیت حرکت دارند، به سمت عقب هدایت کند و فضا برای باز شدن چروک ایجاد شود. سپس به منظور پرشدن کامل قالب، سنبه ها دوباره به سمت جلو حرکت میکنند. شکل ۱۶ مسیر بارگذاری بیان شده را نشان می دهد.





شکل ۱۴: مسیر بارگذاری افزایش فشار در مرحله نهایی (الف) مسیر فشار و (ب)تغذیه محوری برحسب زمان فرایند



شکل ۱۵: نتایج بدست آمده از (الف) آزمایش تجربی و (ب) شبیهسازی حاصل از مسیر بارگذاری شکل ۱۴

در مسیر بارگذاری شکل ۱۶، مسیر AB آغاز فرایند است که فشار داخل لوله افزایش می یابد. در این حالت سنبه ساکن بوده و فقط فشار افزایش می یابد. در نقطه B با افزایش فشار داخلی، بالج آزاد لوله در فشار ۱۸/۵ مگاپاسکال انجام شده و تغذیه محوری با این فشار تا نقطه C اعمال می شود. در این مرحله در قطعه چروکهایی ایجاد می شود که قطعه در نقاط برآمدگی چروک، به دیواره داخلی قالب تماس می یابد. در انتهای این مرحله همراه با افزایش فشار داخلی تا ۲۵ مگاپاسکال، تغذیه محوری در جهت معکوس به اندازه ۵ میلیمتر (تا نقطه D) انجام می شود تا سنبه ها از هم فاصله بگیرند. بدین ترتیب هم فضای خالی و هم نیروی کافی بهمنظور جریان مواد از نقاط فرورفتگی چروک بهسمت ديواره داخلي قالب ايجاد مي شود تا چرو کها باز شوند. اين ميزان حرکت معکوس با توجه به اینکه هم فضای لازم برای رفع چروک ایجاد شود و هم مشکلی در آببندی به وجود نیاید انتخاب شد که با شبیهسازی و آزمایش تجربی به دست آمد. همچنین کمترین مقدار فشار مناسب در این مرحله با توجه به این که فشارهای کمتر از ۲۵ مگاپاسکال نیروی کافی برای حرکت مواد را فراهم نمی کرد، انتخاب شد. در انتهای فرایند بهمنظور پرشدن گوشههای قالب همزمان با افزایش فشار، تغذیه محوری

در جهت نزدیک شدن سنبهها و بوشها به یکدیگر انجام میشود (تا نقطه E). در این مرحله سنبهها و بوشها، لوله را بهطور کامل فشرده و فضای قالب کاملا پر شده و قطعه سالم شکل می گیرد.

در این مسیربارگذاری در هنگام حرکت معکوس که با حرکت رو به عقب سنبهها انجام می شود افزایش فشار سیال سبب ایجاد نیروی محوری شده که باعث افزایش طول لوله (به علت باز شدن چروک) می شود و در واقع حرکت سنبه و لبه لوله در یک راستا صورت می گیرد که برای آببندی نیز مشکلی ایجاد نمی کند.

ایده جدید در ابتدا با شبیه سازی بررسی و سپس به منظور تایید نتایج، آزمایش تجربی انجام شد. شکل ۱۷ به طور متناظر با شکل ۱۶ مراحل شکل گیری قطعه را در مسیر بارگذاری جدید در مرحله بالج، تغذیه محوری اولیه، ایجاد چروک و نحوه رفع چروک نشان می دهد.

شکل ۱۸ قطعه سالم شکل گرفته با روش بیان شده را نشان میدهد. توزیع ضخامت متناظر با مسیر بارگذاری این روش در شکل ۱۹ نشان داده شده است. بیشترین کاهش ضخامت ۱۰/۴% است که نسبت به قطعه سالم حاصل از مسیر بارگذاری فشار ثابت بهبود یافته است. همان گونه كه مشاهده مى شود توزيع ضخامت منطقه تغيير شكل يافته، يكنواخت نیست و اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار کاهش ضخامت لوله در شبیه سازی حدود ۲/۶% است. دلیل عدم یکنواختی توزیع ضخامت، ایجاد چروک و رفع آن است. همانگونه که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، در ناحیه میانی و ارتفاع برآمدگی چروک (ناحیه A) با افزایش فشار، تنشهای محیطی ($\sigma_{
ho}$) و طولی ($\sigma_{
ho}$) در این نقاط هردو از نوع کششی هستند. اما در بخشی از لوله که مواد در قسمت فرورفتگی چروک و نقاط کم ارتفاعتر قرار گرفتهاند (ناحیه B)، تنش طولی از نوع فشاری و تنش محیطی از نوع کششی ایجاد شده است و میزان کرنش و کاهش ضخامت در این نقاط کمتر است. همچنین در هنگام رفع چروک، به علت وجود فضا برای باز شدن، این قسمت از لوله که در مرحله ایجاد چروک خم شده، فقط واخم می شود و جریان موادی صورت نمی گیرد تا کاهش ضخامت ايجاد كند.





شکل ۱۶: مسیر بارگذاری تغذیه معکوس به همراه افزایش فشار در مرحله نهایی (الف) مسیر فشار و (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرایند



شکل ۱۷: نتایج حاصل از شبیهسازی متناظر با نقاط مشخص شده در شکل ۱۶



شکل ۱۸: قطعه بهدست آمده با روش جدید بهمنظور رفع چروک

٤-٤- بررسی تاثیر مسیر بارگذاری پلهای بهمنظور یکنواختتر کردن توزیع ضخامت قطعات سالم تولید شده با روش رفع چروک

همان گونه که در شکل ۱۹ مشاهده می شود، توزیع ضخامت بهدست آمده از مسیر بارگذاری متناظر با شکل ۱۶ دارای یکنواختی در طول لوله نیست و در گوشهها اختلاف کاهش ضخامت به دلیل ایجاد و



شکل ۱۹: توزیع ضخامت متناظر با مسیر بارگذاری شکل ۱۶



شکل ۲۰: مقایسه تنشهای نقاط فرورفتگی و برآمدگی چروک [۱۱]

رفع چروک با ناحیه میانی زیاد است. ازاینرو، بهمنظور یکنواخت تر کردن توزیع ضخامت، مسیر بارگذاری باید به گونهای باشد که اختلاف ارتفاع بین نقاط برآمدگی و فرورفتگی چروک کم باشد و نیز چروکها نسبت بههم متعادل تر باشند. شکل ۲۱ مسیر بارگذاری موردنظر که یک مسیر پلهای است را نشان می دهد.

مسیر بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲۱ به گونهای اعمال شد که در فشار پایین تر (۱۷/۵ مگاپاسکال)، تغذیه آغاز شده و سپس فشار، ۱ مگاپاسکال افزوده شد تا تغذیه در فشار ثابت سبب ایجاد چروک با ارتفاع زیاد نشود. در ادامه، فشار به میزان ۱مگاپاسکال کاهش یافت تا از مزیت شکل دهی در فشار پایین که سبب کم شدن میزان کاهش ضخامت است، استفاده شود. در مراحل بعدی فشار به صورت پلهای افزاینده در دو مرحله استفاده شود. در مراحل بعدی فشار به صورت پلهای افزاینده در دو مرحله نسبت به هم متعادل تر شوند و یکنواختی توزیع ضخامت از بین نرود. به منظور رفع چروک نیز در انتهای فرایند از حرکت معکوس سنبه ها همراه با افزایش فشار مطابق مکانیزمی که در قسمت قبل بیان شد، استفاده شد. قطعه سالم تولید شده با استفاده از این مسیر بارگذاری، در شکل ۲۲ نشان داده شده است. شکل ۲۳، توزیع ضخامت قطعه به دست آمده از شبیه سازی و آزمایش تجربی این مسیر بارگذاری را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۲۴ مشخص است، توزیع ضخامت این قطعه نسبت به قطعه شکل داده شده با مسیر بارگذاری شکل ۱۶ یکنواخت ر شده است. در این حالت اختلاف بین کمترین کاهش ضخامت با بیشترین





شکل ۲۱: مسیر بارگذاری پلهای (الف)مسیر فشار، (ب) تغذیه محوری برحسب زمان فرایند



شکل ۲۲: قطعه سالم شکل گرفته با مسیر بارگذاری شکل ۲۱



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر – مهندسی مکانیک، دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵ | ۳۹۸



مسیرهای بارگذاری شکل ۱۶ و شکل ۲۱

شکل ۲۵ مقایسهای از توزیع ضخامتهای مسیرهای بارگذاری منجر به تولید قطعات سالم را نشان میدهد. همان طور که دیده می شود کمترین میزان کاهش ضخامت قطعه سالم مربوط به مسیر بارگذاری شکل ۲۱ است. همچنین مسیرهای بارگذاری شکلهای ۶ و ۱۱ نشان میدهند که توزیع ضخامت قطعه هموارتر است اما کاهش ضخامت قطعه با این مسیرهای بارگذاری بیشتر است. با مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت مسیرهای بارگذاری شکلهای ۱۶ و ۲۱ دیده می شود که توزیع ضخامت قطعه در مسیر بارگذاری شکل ۲۱ نسبت به مسیر بارگذاری ضخامت کاهش ضخامت کمتری است.



شکل ۲۵: مقایسه توزیع ضخامت بدست آمده از مسیرهای بارگذاری بررسی شده در شبیهسازی

٥- نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی نتایج مشاهده شد که با اصلاح مسیرهای بارگذاری منجر به تولید قطعات سالم و چروک، میتوان به قطعات مطلوبتری با توزیع ضخامت بهبود یافته دست یافت.

با اعمال تغذیه محوری، همزمان با افزایش فشار ابتدایی در مسیر بارگذاری فشار ثابتی که منجر به ایجاد قطعه سالم شد، توزیع ضخامت به مقدار ۴/۶% بهبود یافت.

همچنین برای استفاده از قطعات چروک روش جدیدی ارایه شده است که با ایجاد چروک بهعنوان یک حالت خودخواسته در شکل دهی و رفع آن میتوان از مزیت شکل دهی در فشارهای پایین تر که جلوگیری از کاهش ضخامت است، بهره گرفت. در این روش، چروکهای با عمق زیاد نیز قابل رفع هستند و توزیع ضخامت به دست آمده با این روش بهبود قابل ملاحظه ای نسبت به روشهای معمول شکل دهی لوله با مسیرهای بارگذاری فشار ثابت داشته است که در این بررسی میزان بهبود ضخامت مقایسه شده ۱۰/۴% بوده است.

توزیع ضخامت بهدستآمده در قطعات تولیدشده به روش رفع چروک، یکنواخت نیست اما میتوان با افزایش پلهای سطح فشار، به توزیع ضخامت یکنواخت تری رسید که در این مورد در بررسیها و مقایسههای انجام شده مقدار این عدم یکنواختی برای مسیر جدید رفع چروک ۲/۶% بوده که با استفاده از مسیر پلهای به ۱/۹% رسیده است.

٦- مراجع

- Eftekhari Shahri S.E., Ahmadi Brooghani S.Y., Khalili K. and Kang B.S., 2013. "Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study", *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 13, No. 4, pp. 46-59.
- [2] Ahmetoglu M. and Altan T., 2000. "Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends", *Journal of Materials Processing Technology*, 98, No. 1, pp. 25-33.
- [3] Seyedkashi S., Moslemi Naeini H., Liaqhat G., Mosavi Mashhadi M. and Moon Y., 2013. "Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes", *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 16, No. 5, pp. 122-131, 2012.
- [4] Alaswad A., Benyounis K. and Olabi A., 2012. "Tube hydroforming process: A reference guide", *Materials* & Design, 33, pp. 328-339.
- [5] Jansson M., Nilsson L. and Simonsson K., 2007. "On process parameter estimation for the tube hydroforming process", *Journal of materials processing technology*, 190, No. 1, pp. 1-11.
- [6] Boudeau N., Lejeune A. and Gelin J.C., 2002. "Influence of material and process parameters on the development of necking and bursting in flange and tube hydroforming", *Journal of materials processing technology*, 125, pp. 849-855.
- [7] Lei L.P., Kim J. and Kang B.S., 2002. "Bursting failure prediction in tube hydroforming processes by using rigid–plastic FEM combined with ductile fracture criterion", *International journal of mechanical*

of aluminum alloy tube by using useful wrinkles", *Journal of materials processing technology*, 209, No. 5, pp. 2553-2563.

- [14] Loh-Mousavi M., Mori K., Hayashi K. and Bakhshi M., "Improvement of filling of die corners in boxshaped tube hydroforming by control of wrinkling", *in Proceeding of Key Engineering Materials, Trans Tech Publ*, 344, pp. 461-467.
- [15] Elyasi M., Bakhshi Jouybari M. and Gorgi A. H., 2010. "A new hydroforming die design for improvement of die corner filling of stepped tubes", *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 10, No. 3, pp. 87-98.
- [16] Elyasi M., Zoghipour P., Bakhshi M. and Gorgi A.H., 2011. "Analysis of geometry and thickness distribution in a new hydroforming die for cylindrical stepped tubes" *"Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics (Journal of School of Engineering)*, 21, No. 2.
- [17] Ngaile G., Jaeger S. and Altan T., 2004. "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*, 146, No. 1, pp. 108-115.

sciences, 44, No. 7, pp. 1411-1428.

- [8] Mac Donald B. and Hashmi M., 2000. "Finite element simulation of bulge forming of a cross-joint from a tubular blank", *Journal of Materials Processing Technology*, 103, No. 3, pp. 333-342.
- [9] Dohmann F. and Hartl C., 1997. "Tube hydroformingresearch and practical application", *Journal of Materials Processing Technology*, 71, No. 1, pp. 174-186.
- [10] Koç M., 2003. "Investigation of the effect of loading path and variation in material properties on robustness of the tube hydroforming process", *Journal of materials processing technology*, 133, No. 3, pp. 276-281.
- [11] Yuan S., Wang X., Liu G. and Wang Z., 2007.
 "Control and use of wrinkles in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, 182, No. 1, pp. 6-11.
- [12] Yuan S., Yuan W. and Wang X., 2006. "Effect of wrinkling behavior on formability and thickness distribution in tube hydroforming", *Journal of materials processing technology*, 177, No. 1, pp. 668-671.
- [13] Lang L., Li H., Yuan S., Danckert J. and Nielsen K. B., 2009. "Investigation into the pre-forming's effect during multi-stages of tube hydroforming