



بررسی فرایند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ و شکلدهی چرخشی

مهدی قیصری^۱، فرامرز جوانرودی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵، javanroodi@iust.ac.ir

چکیده - دبل بالج هیدروفرمینگ یکی از شاخه‌های فرایند هیدروفرمینگ لوله است که در آن به جای استفاده از لوله به عنوان قطعه خام، از قطعه کشش عمیق استفاده شده و پس از پر شدن محفظه از سیال تحت فشار، به شکل قالب شکل داده می‌شود. در این مقاله نتایج حاصل از شکلدهی مقطعی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با فشارهای مختلف به روش دبل بالج هیدروفرمینگ ارائه شده است. پس از اندازه‌گیری بیشینه تغییر ارتفاع (بیشینه قطر خارجی) در منحنی‌های شکل داده شده توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات، ضخامت در طول پروفیل توسط آزمایش ضخامت‌سنجی اولتراسونیک اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فشار بر بیشینه تغییر ارتفاع و تغییرات ضخامت است همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات ضخامت در این روش نسبت به سایر روشهای شکلدهی قطعات (مانند اسپینینگ سستی) بسیار اندک است. در بخش دیگر، فرایند به کمک نرم‌افزار جامع ABAQUS 6/4 شبیه‌سازی شده و اثر پارامترهای مؤثر بر شکلدهی مانند ضریب اصطکاک و پارامترهای مرتبط با خواص ماده مانند مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و ضریب کرنش سختی مورد بحث قرار گرفته است. نتایج بیانگر آن است که مانند سایر شاخه‌های فرایند هیدروفرمینگ لوله، با افزایش ضریب اصطکاک، بیشینه تغییر ارتفاع کاهش یافته و تغییرات ضخامت افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: هیدروفرمینگ لوله، شکلدهی چرخشی، کرنش سختی، ضریب کرنش سختی، ضریب اصطکاک.

Experimental and numerical investigation of double bulge tube hydroforming

M. Gheisary¹, F. Djavaanroodi^{2*}

1- Dept of Mechanical Eng. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 16765- 163, Tehran, Iran, javanroodi@iust.ac.ir

Abstract- This paper aims to establish a basic understanding of double bulge tube hydroforming process of stainless steel deep drawn cups. The method is briefly reviewed by carrying out experimental tests and Finite element analysis. After measuring bulge height in both formed curves by CMM and thickness variation of formed tube by ultrasonic thickness measurement unit, it's found out that thickness variation in this process is less than other traditional methods such as traditional spinning and rubber pad forming. A finite element model is constructed to simulate the double bulge tube hydroforming process and assess the influence of friction coefficient and tube material properties. It is found that material hardening coefficient had the most significant influence on formability characteristics during double bulge tube hydroforming. As similar as other tube hydroforming processes, increasing friction decrease bulge height and thickness.

Keywords: Double bulge tube hydroforming, spinning, Strength coefficient, Strain hardening exponent, Friction coefficient

۱- مقدمه

شکلدهی به کمک فشار سیال (هیدروفرمینگ) یکی از روشهای نسبتاً نوین شکلدهی است که از اواخر دهه ۱۹۴۰ مورد توجه صاحبان صنعت قرار گرفته است [۱]. در این روش امکان تغییر شکلهای بزرگتر، کیفیت بهتر سطح و تغییر یکنواخت تر ضخامت نسبت به انواع دیگر روشهای شکلدهی وجود داشت. با توجه به افزایش بازدهی، کاهش مصرف سوخت و کاهش وزن، این فرایند در کانون توجه خودروسازان و صنایع هوایی قرار گرفت [۱].

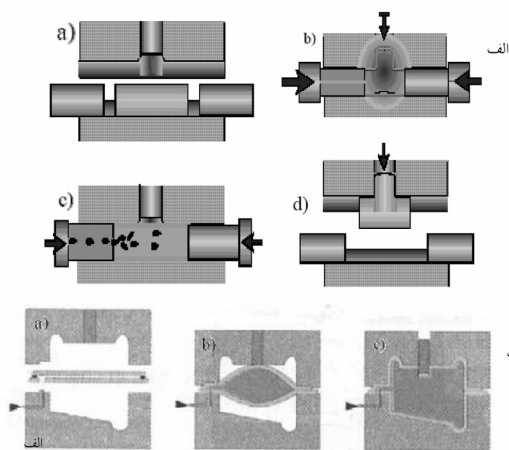
هیدروفرمینگ لوله^۱ یکی از روشهای شکلدهی به کمک فشار سیال است. از این فرایند به طور گسترده ای در صنایع خودروسازی استفاده شده و روز به روز بر دامنه استفاده از آن افزوده می شود. از میان مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- قابلیت تکرار بالا در تولید ۲- هزینه اندک ابزار اندک نسبت به روشهای مشابه ۳- دستیابی به نسبت بالای استحکام در برابر وزن ۴- کاهش عملیات تکمیلی مونتاژ مانند لحیم کاری، جوشکاری و ... ۵- افزایش چشمگیر دقت و دستیابی به خطای مطلوب [۲].

با وجود این فرایند مزبور معایبی مانند چرخه طولانی تولید نسبت به روشهای مشابه، سرمایه گذاری اولیه بالا، کمبود دانش فنی لازم برای مدیریت و طراحی ابزار دارد [۲].

فرایند دبل بالانک تیوب هیدروفرمینگ برای شکلدهی بدنه های توخالی به کار رفته (محفظه میان ورقهایی که از دوانتها به یکدیگر متصل شده اند). در این روش سیال به محفظه پمپ شده و این فشار باعث شکلدهی قطعه خام در داخل محفظه قالب می شود [۳] فرایند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ بسیاری مشابه فرایند فوق است، با این تفاوت که به جای دو ورق متصل شده به یکدیگر، از قطعه کشش عمیق به عنوان قطعه خام استفاده می شود [۴]

لندکوئیست [۱] چرخه بهینه اعمال فشار داخلی و نیروی محوری و مسیر بهینه اعمال نیروها (مرزها در فرایند هیدروفرمینگ لوله) را با استفاده از حل عددی صریح پیشنهاد کرد. نیلسن [۲]، هارل [۳] و سیگرت [۴] انواع روشهای فرایند هیدروفرمینگ لوله، مزایا معایب و تجهیزات مورد استفاده در این روش ها را مورد بحث قرار داده اند. نتایج این بررسیها بیان کننده افزایش روزافزون استفاده از این فرایند در صنایع مختلف و تحقیقات گسترده انجام شده برای گسترش دانش فرایند هیدروفرمینگ است.



شکل ۱ الف) توالی عملیات در فرایند هیدروفرمینگ لوله ب) فرایند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ [۳]

برونی [۵] به بررسی بازگشت فنری و تنشهای پسماند در فرایند شکلدهی ورق فلزی در فرایند هیدروفرمینگ پرداخته است. آنچه در مقاله مزبور آمده نشان دهنده این است که با افزایش فشار داخلی، کاهش شعاع قالب و افزایش ضریب اصطکاک، کرنش پلاستیک افزایش یافته و بازگشت فنری در نمونه کاهش خواهد یافت.

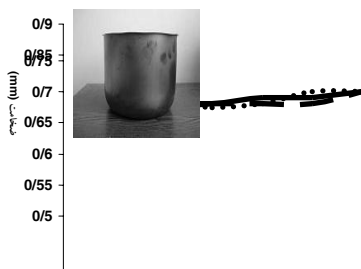
نادر اصنافی [۶] با استفاده از روش تحلیلی و مقایسه نتایج با داده های شبیه سازی و یافته های تجربی، مسیر بهینه اعمال نیرو را در روش هیدروفرمینگ لوله (شکلدهی آزاد) با

۲- تجهیزات و مواد مورد استفاده

آزمایشهای برای ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۷ میلی متر و مشخصات مکانیکی جدول (۱) انجام شده است (خواص مکانیکی از آزمایش کشش ساده حلقه بریده شده از قطعه پیش شکل داده شده به دست آمده است).

تغییرات ضخامت اولیه ناشی از فرایند کشش عمیق به منظور تولید قطعات پیش شکل داده شده در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به پراکندگی اندک ضخامت، می توان پس از فرایند کشش عمیق ضخامت قطعات پیش شکل داده شده را یکسان و برابر ۰/۶۸ میلی متر در نظر گرفت. به منظور حذف اثر کار انجام شده بر خواص مواد، عملیات حرارتی تنش زدایی^۵ (حرارت ۴۰۰ درجه به مدت دو ساعت و خنک کردن در هوا) بر روی قطعات انجام شده است [۸].

به منظور انجام آزمایشها از قطعات کشش عمیق با قطر خارجی ۱۷۶/۸ میلی متر، ضخامت ۰/۶۸ میلی متر و طول ۱۶۰ میلی متر از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴^{۵/۸} استفاده شده است. ابعاد نهایی پس از انجام فرایند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ تغییرات ضخامت در طول فنجان کشش عمیق اولیه

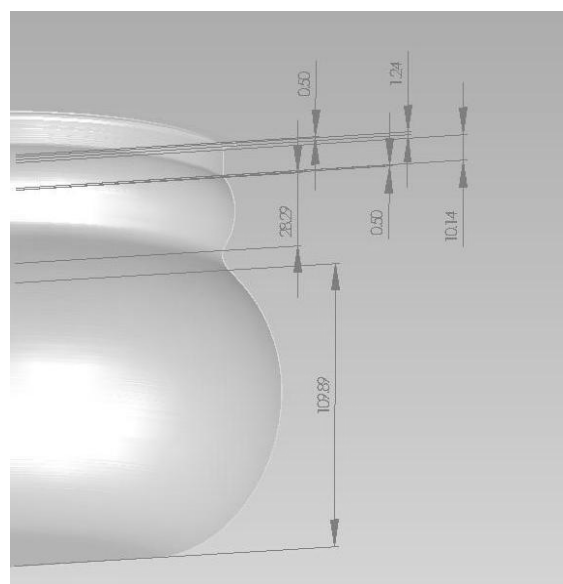
استفاده از روش کنترل جابجایی پیشنهاد کرده است. نتایج بررسی او نشان دهنده آن است که فشار ناپایداری و شعاع شکل در لحظه شروع ناپایداری را - که از روش حل عددی فرایند شکلدهی لوله محاسبه می شود، می توان به عنوان معیار مناسبی برای شکست به کار برد.

اصنافی [۷] همچنین به بررسی پدیده بازگشت فنری در فرایند شکلدهی ورق فلزی دبل خم پرداخته است. در نتایج تحقیقات او آورد عنوان شده که با افزایش نیروی اتصال، افزایش شعاع قوس و ضخامت ورق و همچنین کاهش تنش تسلیم بازگشت فنری کاهش خواهد یافت.

در این مقاله پس از استخراج خواص مواد با استفاده از آزمایش کشش ساده^۱، آزمایشهای مربوط به شکلدهی قطعه نمونه برای فولاد زنگ نزن گرید ۳۰۴^۲ انجام شده و پس از اندازه گیری بیشینه قطر خارجی (با استفاده از ماشین اندازه گیری مختصات^۳) و تغییرات ضخامت قطعات با استفاده از روش کنترل ضخامت اولتراسونیک، فرایند توسط نرم افزار ABAQUS 6/4 شبیه سازی شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج حل عددی صریح^۴، با استفاده از داده های حاصل از شبیه سازی، اثر پارامترهایی مانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و تنش تسلیم بررسی شده و تأثیر بازگشت فنری بر میزان خطای محاسبات عددی بررسی و ضریب اصلاحی مناسبی پیشنهاد شده است. در انتها با استفاده از محاسبات حاصل از تحلیل فرایند هیدروفرمینگ لوله و حل عددی، فشار شکست و موقعیت تقریبی شکست محاسبه شده است.

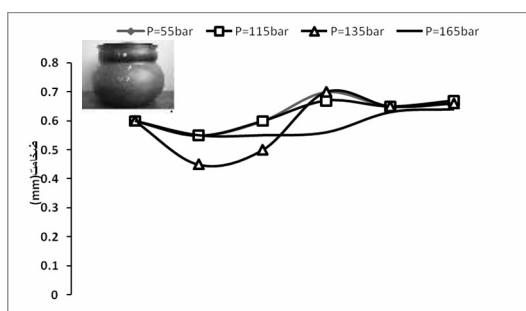
1. Standard: ASTM E8M-2001
2. Stainless Steel 304
3. CMM
4. Explicit FEM

به منظور مقایسه تغییرات ضخامت با فرایندهای دیگری مانند اسپینینگ سنتی^۱، قطعات دیگری نیز با روش اسپینینگ سنتی شکل داده شده و نتایج بررسی تغییرات ضخامت این قطعات در شکل (۶) آورده شده است [۹]. در این فرایند از قطعات خام با ابعاد گفته شده استفاده شد. در این فرایند پس از حرارت دادن قطعه خام، با فشار دست، قطعه بر روی قالب شکلدهی می شود. همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می شود پراکندگی ضخامت بسیار زیاد است. ناپیکنواختی حرارت، فشار نایکسان دست و همچنین لنگی قطعه کار در چرخش حول محور (هرچند ناچیز)، عوامل بروز این تغییر زیاد در ضخامت، کاهش دقت و تکرارپذیری اندک در تولید با این فرایند به شمار می رود.

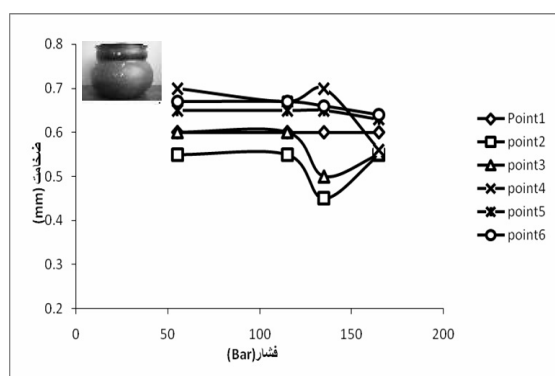


شکل ۳ ابعاد نهایی قطعه پس از انجام آزمایشها

به منظور بررسی تأثیر فشار خارجی بر شکلدهی قطعات پیش شکل داده شده، چند قطعه با فشارهای مختلف شکل داده شده (شکل ۴) و سپس بیشینه قطر خارجی و ضخامت قطعات اندازه گیری شده. نتایج اندازه گیری در جدول (۲) و شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۴ قطعات تولید شده در آزمایشهای با فشارهای (الف) ۵۵ بار (ب) ۱۱۵ بار (ج) ۱۳۵ بار (د) ۱۵۵ بار

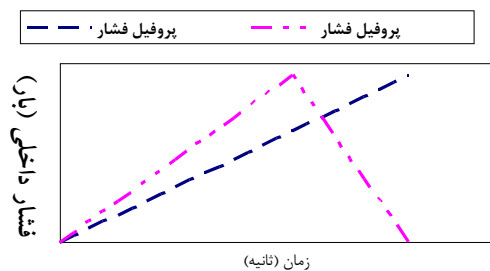


شکل ۵ روند تغییرات ضخامت در قطعات هیدروفرمینگ

جدول ۲ بیشینه تغییرات قطر خارجی در قطعات

محدوده فشار	منحنی اول (میلیمتر)	منحنی دوم (میلیمتر)
۵۵ بار (۱)	۱/۲۸	۷/۶۵
۱۱۵ بار (۲)	۲/۱۵	۱۶/۴
۱۳۵ بار (۳)	۴/۶۵	۲۳/۹۸

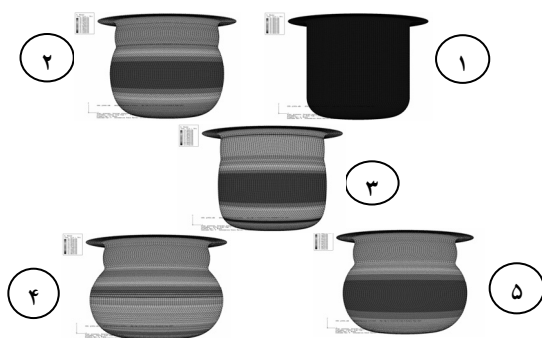
شده که مانند آزمایشهای انجام شده، دو انتهای لوله ثابت باشد. برای شبیه سازی در مرحله اول از پروفیل افزایش فشار به صورت خطی و در مرحله دوم (برای بررسی اثر بازگشت فنری) پروفیل فشار با شیب منفی (پروفیل واقعی فشار) به کار برده شده است. منحنی پروفیل های فشار در شکل (۷) نشان داده شده است.



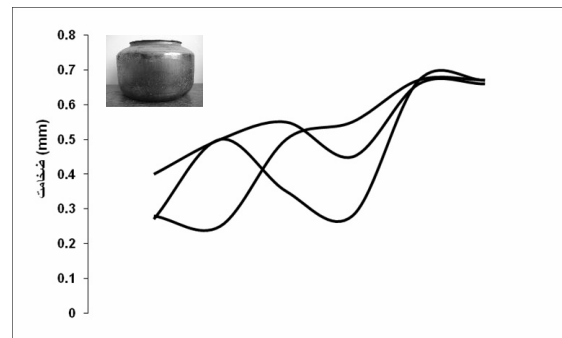
شکل ۷ پروفیل های اعمال فشار

در مقایسه قطر خارجی در مرکز قوس اول و دوم با یافته های تجربی، مشاهده می شود که درصد خطا وقتی از پروفیل واقعی فشار در شبیه سازی استفاده می شود، به میزان قابل توجهی کاهش می یابد (شکل ۹).

همچنین در مقایسه منحنیهای حاصل از بررسی تغییرات ضخامت با حل عددی و داده های حاصل از آزمایشها، تطابق قابل قبولی مشاهده می شود (شکل ۱۰).



شکل ۸ مراحل شکلدهی در نرم افزار



شکل ۶ روند تغییرات ضخامت در قطعات تولید شده به روش اسپینینگ سستی (خمکاری)

جدول ۱ خواص مکانیکی ورقهای فلزی [۹]

خواص مکانیکی	فولاد ضد زنگ	فولاد ضد زنگ	فولاد کم کربن
سختی (راکول B)	۸۲	۸۵	۷۱
استحکام نهایی (مگا پاسکال)	۶۹۱/۷	۹۶۳/۷	۳۳۸/۸
استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	۲۹۹/۱	۳۹۱/۹	۲۰۰/۸
ازدیاد طول در شکست	۷۰٪	۵۸/۶٪	۳۹٪
مدول الاستیسته	۲۰۷	۲۰۷	۲۰۰
K(MPa)	۸۱۸/۴۸	۱۰۰۵/۳	۴۸۴/۷۲
n	۰/۲۶۵۶	۰/۱۴۱۴	۰/۲۶۲

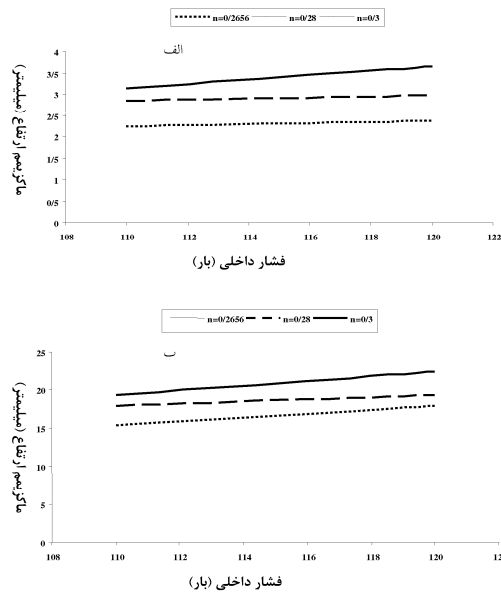
۳- شبیه سازی

روش عددی که در این مقاله برای شبیه سازی فرایند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ استفاده شده روش صریح است. در حل عددی صریح از المان C3D8R استفاده شد.

برای بررسی و مقایسه اثر پارامترهای دیگری مانند ضریب سختی و تنش تسلیم، خواص مکانیکی ورقهایی از جنس فولاد زنگ نزن ۲۰۱ و آهن ۱۰۱۵ نیز با استفاده از آزمایش کشش استخراج شده و در حل عددی استفاده شده است (جدول ۱). ضریب اصطکاک در تمامی مراحل برابر ۰/۵۰ [۱۰، ۱۲] و شرایط مرزی به گونه ای تعریف

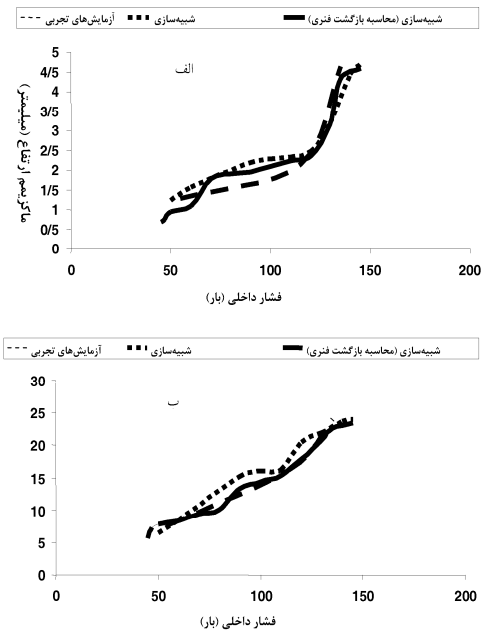
1. Stainless Steel 201
2. Low Carbon Steel 1015

کرنش سختی برای مقادیر مختلف n نشان می‌دهد. توجه به رابطه $\sigma = K(\varepsilon)^n$ مشاهده می‌شود با افزایش ضریب کرنش سختی (تغییر شکل در ماده نرمتر، n بیشتر)، فشار داخلی مورد نیاز برای شکلدهی قطر خارجی معین، کاهش می‌یابد.

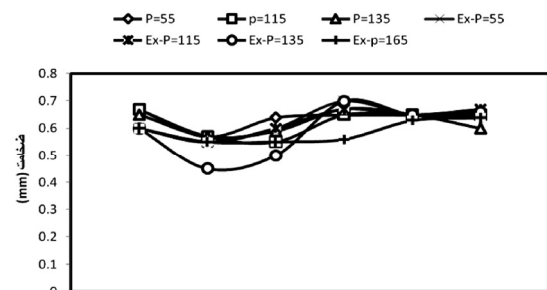


شکل ۱۱ تغییرات قطر خارجی با تغییر ضریب کرنش سختی (الف) منحنی اول (ب) منحنی دوم

به‌منظور مشاهده بهتر اثر خواص مکانیکی مواد بر قابلیت شکلدهی، پس از استخراج خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن ۲۰۱ و آهن کم‌کربن ۱۰۱۵ با استفاده از آزمایش کشش ساده، شبیه‌سازی برای قطعات پیش شکل داده شده با خواص بالا نیز انجام شده است. شکل (۱۱) نشان‌دهنده شکلدهی فنجان تولید شده از ورق آهن ۱۰۱۵ با فشار پایین‌تر از فشار لازم برای شکلدهی فنجان از جنس ۳۰۴ نشان دهنده و لزوم استفاده از فشار داخلی بالاتر در شکلدهی فنجان از جنس ۲۰۱ نسبت به



شکل ۹ یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی (الف) بیشینه تغییر قطر خارجی (منحنی اول) (ب) بیشینه تغییر قطر خارجی (منحنی دوم)

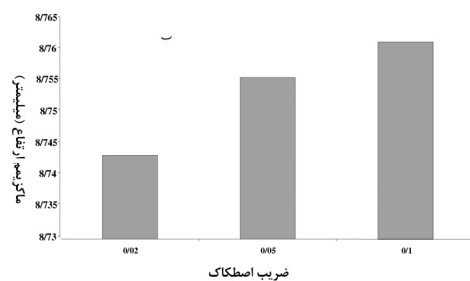
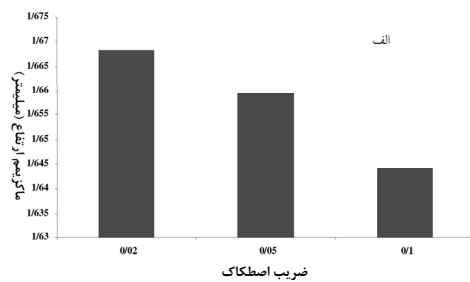


شکل ۱۰ تغییرات ضخامت ناشی از تغییر شکل در آزمایشها و شبیه‌سازی

۱-۳- ضریب کرنش سختی

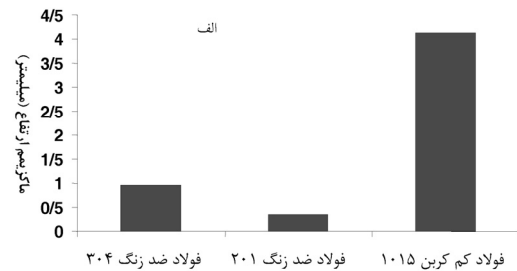
قابلیت شکلدهی در مواد مختلف با تغییر پارامترهایی مانند ضریب کرنش سختی، استحکام تسلیم، مدول الاستیسیته، و بیشینه استحکام کششی تغییر می‌کند. شکل (۱۱) تغییرات بیشینه قطر خارجی را نسبت به ضریب

منحنی اول می‌شود. با افزایش نیروهای مقاوم در برابر شکلهی در منحنی اول، تغییر شکل در منحنی دوم با سهولت بیشتری انجام می‌شود.



شکل ۱۳ تغییرات قطر خارجی با تغییر ضریب اصطکاک الف: منحنی اول ب: منحنی دوم

جنس‌های گفته شده است. ضریب اصطکاک و شرایط مرزی مانند مراحل قبل بوده و از پروفیل واقعی فشار با بیشینه ۵۵ بار در شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۱۲ تغییرات قطر خارجی در شکلهی قطعات پیش شکل داده شده با جنس‌های مختلف الف) منحنی اول ب) منحنی دوم

۴- نتیجه‌گیری

۱- در این مقاله، دقت ناچیز فرایندهای تولیدی سستی مانند شکلهی چرخشی در مقایسه با روش نوین دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ نشان داده شده. در مقایسه با روش دبل بالچ تیوب هیدروفرم، روشهای سستی، دقت پایین، خطای ابعادی بالا و تکرارپذیری پایینی دارند.

۲- مانند سایر فرایندهای هیدروفرمینگ لوله، در این فرایند نیز با افزایش ضریب اصطکاک، فشار داخلی لازم برای شکلهی افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه سطح قالب صیقلی‌تر بوده و از ورقهایی با سطح صیقلی یا روکش‌دار استفاده شود، کیفیت قطعه نهایی بهتر خواهد بود.

۳-۲- ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک در فرایند شکلهی دبل بالچ هیدروفرمینگ، نشان دهنده اثر پارامترهای تأثیرگذاری مانند صافی سطح دیواره قالب، کیفیت سطح قطعه پیش شکل داده شده و لزجت سیال واسطه شکلهی است.

با تغییر ضریب اصطکاک در شکل (۱۳) می‌بینیم که قطر خارجی منحنی اول با افزایش ضریب اصطکاک کاهش یافته اما در منحنی دوم روندی صعودی دیده می‌شود. بیشینه سطح تماس در نقطه بیشینه پروفیل فشار، در منحنی اول مشاهده می‌شود و همین افزایش سطح تماس سبب تأثیر مستقیم ضریب اصطکاک بر شکلهی

- [7] N. Asnafi, on spring back of double-curved autobody panels, International journal of mechanical science, Vol 43, (2001), pp 5-37
- [8] H. Chandler, Heat Treater's Guide, practices and procedures for Irons and Steels), Second Printing, 1998 , pp 733-735
- [۹] مهدی قیصری " شبیه سازی فرایند شکل دهی دبل بالانک تیوب هیدروفرمینگ " پایان نامه کارشناسی

ارشد ۱۳۸۵

- [10] M. Imaninejad, Subhash, "Experimental and Numerical investigation of free-bulge formation during hydroforming of aluminum extrusion", J.Mat.Proc.Tech, (2004)
- [11] M.Imaninejad, Subhash, "Influence of end-conditions during tube hydro forming of aluminum extrusion", Int.J.Mech.Sci, (2004)
- [12] M.Imaninejad, Subhash, "Loading path optimization of tube hydro forming process", J.Mat.Proc.Tech, (2005)
- [13] Mummer Koc, "Investigation of the effect of Loading path and variation in material properties on robustness of tube hydro forming process", J.Mat.Pro.Tec, (2003)

۳- با افزایش ضریب کرنش سختی فشار لازم برای شکل دهی به شدت کاهش می یابد.

۵- منابع

- [1] J. Lundkovist, Numerical Simulation of Tube hydro forming, MSC Thesis, (2004)
- [2] K.B. Nielsen, Hydro forming Highlights: sheet hydro forming and tube hydro forming, Journal of Material Processing Technology, Vol.151, (2004), pp165-177
- [3] Ch. Hartl, Research and advances in fundamentals and industrial application of hydro forming, Journal of Material Processing Technology, Vol.167, (2005), pp383-392
- [4] K. Sigeret, recent Development in HydroForming Technology, Journal of Material Processing Technology, Vol .48, (2000), pp 251-258
- [5] C. Bruni, a study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming, International journal of advanced manufacturing Technology, DOI 10.1007/s-006-05390017, (2006)
- [6] N. Asnafi, Theoretical and Experimental analysis of Stroke-controlled tube hydro forming, Journal of Material Science and engineering, Vol A279, (2000), pp 95-100