مجلهٔ فنی و مهندسی مدرس- مهندسی مکانیک
دوره ۱۰، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۸۹ ص‌ص ۱-۹
(دریافت مقاله: مرداد ۱۳۸٦، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۸)

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 ۱٦۳- ۱٦۷٦٥، javanroodi@iust.ac.ir**

چکیده – دبل بالج هیدروفرمینگ یکی از شاخه‌های فرایند هیدروفرمینگ لوله است که درآن به‌جای استفاده از لوله به‌عنوان قطعهٔ خام، از قطعهٔ 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 قطعاتی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰٤ با فشارهای مختلف به روش دبل بالج هیدروفرمینگ ارائه شده است. پس از اندازه‌گیری بیشینهٔ 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 نشان‌دهندهٔ 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 سنتی) بسیار اندک است. در بخش دیگر، فرایند به‌کمک نرم‌افزار جامع ABAQUS 6/4 شبیه‌سازی شده و اثر پارامترهای مؤثر بر شکلدهی مانند ضریب اصطکاک و پارامترهای مرتبط با خواص ماده مانند مدول الاستسیته، 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. Gheisary[1], F. Djavanroodi[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 outexperimental 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 that 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 asses 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]

۱- مقدمه

شکلدهی به‌کمک فشار سیال (هیدروفرمینگ) یکی از روشهای نسبتاً نوین شکلدهی است که از اواخر دهه ۱۹٤۰ مورد توجه صاحبان صنعت قرار گرفته است [۱]. در این روش امکان تغییر شکلهای بزرگتر، کیفیت بهتر سطح و تغییر یکنواخت‌تر 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[1] یکی از روشهای شکلدهی به‌کمک فشار سیال است. از این فرایند به‌طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی استفاده شده و روز به روز بر دامنه استفاده از آن افزوده می شود. از میان مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

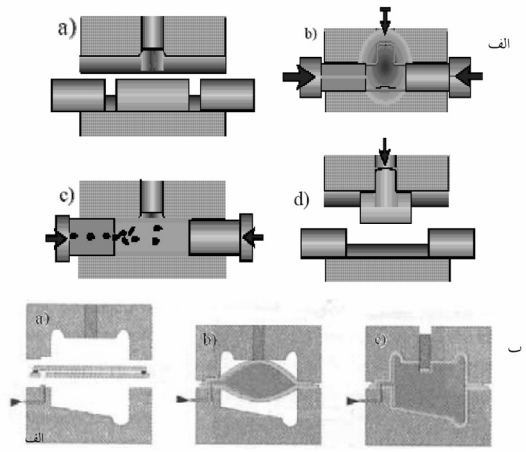
۱- قابلیت تکرار بالا در تولید ۲- هزینه اندک ابزار اندک نسبت به روشهای مشابه ۳- دستیابی به نسبت بالای استحکام در برابر وزن ٤- کاهش عملیات تکمیلی مونتاژ مانند لحیم‌کاری، جوشکاری و ... ۵- افزایش چشمگیر دقت و دستیابی به خطای مطلوب [۲].

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

فرایند دبل بلانک تیوب هیدروفرمینگ برای شکلدهی بدنه‌های توخالی به کار رفته (محفظه میان ورقهایی که از دوانتها به یکدیگر متصل شده‌اند). در این روش سیال به محفظه پمپ شده و این فشار باعث شکلدهی قطعه خام در داخل محفظه قالب می شود[۳] فرایند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ بسیاری مشابه فرایند فوق است، با این تفاوت که به‌جای دو ورق متصل شده به یکدیگر، از قطعه کشش عمیق به‌عنوان قطعه خام استفاده می‌شود [٤]

لندکوئیست [۱] چرخهٔ 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 [٤] انواع روشهای فرایند هیدروفرمینگ لوله، مزایا معایب و تجهیزات مورد استفاده در این روش‌ها را مورد بحث قرار داده‌اند. نتایج این بررسیها بیان کننده افزایش روزافرون 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 بالج 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 دهندهٔ 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[٦] با استفاده از روش تحلیلی و مقایسه نتایج با داده‌های شبیه‌سازی و یافته‌های تجربی، مسیر بهینه اعمال نیرو را در روش هیدروفرمینگ لوله (شکلدهی آزاد) با

1. Tube Hydroforming

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]

استفاده از روش کنترل جابجایی پیشنهاد کرده است. نتایج بررسی او نشان دهندهٔ آن است که فشار ناپایداری و شعاع شکل در لحظه شروع ناپایداری را - که از روش حل عددی فرایند شکلدهی لوله محاسبه می‌شود، می‌توان به‌عنوان معیار مناسبی برای شکست به‌کار برد.

اصنافی [۷] همچنین به بررسی پدیده بازگشت فنری در فرایند شکلدهی ورق فلزی دوبل 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[1]، آزمایشهای مربوط به شکلدهی قطعه نمونه برای فولاد زنگ نزن گرید ۳۰٤ [2] انجام شده و پس از اندازه‌گیری بیشینه قطر خارجی (با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات[3]) و تغییرات ضخامت قطعات با استفاده از روش کنترل ضخامت اولتراسونیک، فرایند توسط نرم‌افزار ABAQUS 6/4 شبیه‌سازی شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج حل عددی صریح[4]، با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، 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.

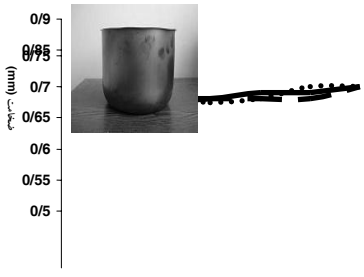
1. Standard: ASTM E8M-2001
2. Stainless Steel 304
3. CMM
4. Explicit FEM

۲- تجهیزات و مواد مورد استفاده

آزمایشهای برای ورق فولاد زنگ نزن ۳۰٤ با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر 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 به‌منظور تولید قطعات پیش شکل داده شده در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به پراکندگی اندک ضخامت، می‌توان پس از فرایند کشش عمیق ضخامت قطعات پیش شکل داده شده را یکسان و برابر ۰/٦۸ میلی‌متر در نظر گرفت. به‌منظور حذف اثر کار انجام شده بر خواص مواد، عملیات حرارتی تنش‌زدایی[5] (حرارت ٤۰۰ درجه به مدت دو ساعت و خنک کردن در هوا) بر روی قطعات انجام شده است[۸] .

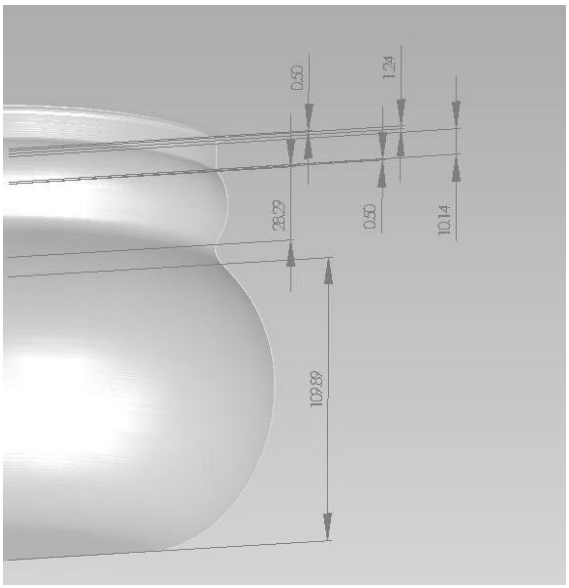
به منظور انجام آزمایشها از قطعات کشش عمیق با قطر خارجی ۱۷٦/۸ میلی‌متر، ضخامت ۰/٦۸ میلی‌متر و طول ۱٦۰ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰٤ استفاده شده است . ابعاد نهایی پس از انجام فرایند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲ تغییرات ضخامت در طول فنجان کشش عمیق اولیه

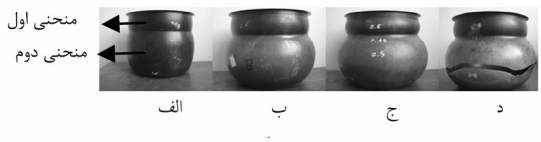
5. Stress Relieving

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]



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 (شکل٤) و سپس بیشینه قطر خارجی و ضخامت قطعات اندازهگیری شده. نتایج اندازهگیری در جدول (۲) و شکل (۵) آورده شده است.

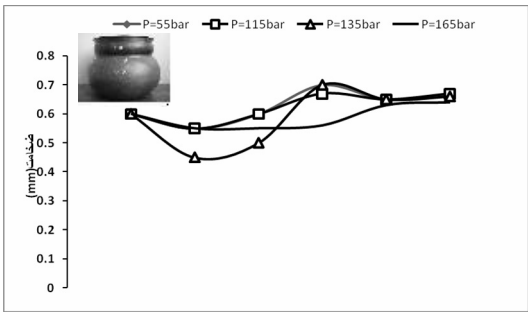


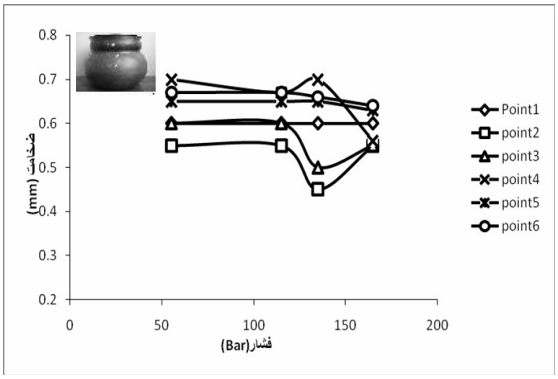
شکل ٤ قطعات تولید شده در آزمایشهای با فشارهای الف) ۵۵ بار ب) ۱۱۵ بار ج) ۱۳۵ بار د) ۱۵۵ بار

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

به‌منظور مقایسه تغییرات ضخامت با فرایندهای دیگری مانند اسپینینگ سنتی[1]، قطعات دیگری نیز با روش اسپینینگ سنتی شکل داده شده و نتایج بررسی تغییرات ضخامت این قطعات در شکل (٦) 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 می‌شود. همان‌گونه که در شکل (٦) مشاهده می‌شود پراکندگی ضخامت بسیار زیاد است. نایکنواختی 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 می‌رود.



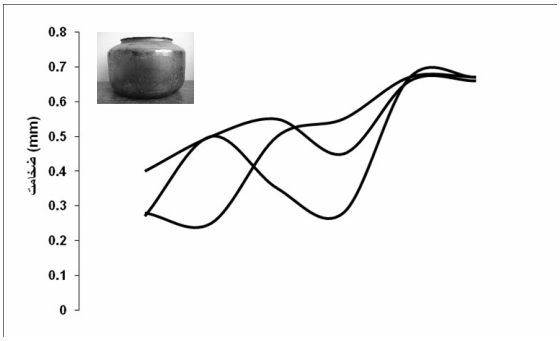


شکل ۵ روند تغییرات ضخامت در قطعات هیدروفرمینگ

1. Traditional Spinning

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]



شکل ٦ روند تغییرات ضخامت در قطعات تولید شده به روش اسپینینگ سنتی(خمکاری)

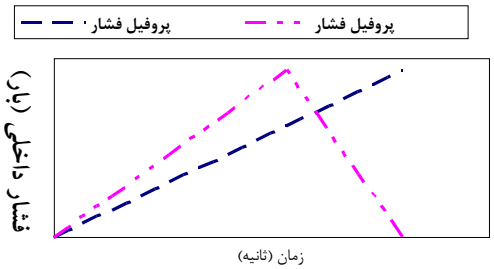
جدول ۱ خواص مکانیکی ورقهای فلزی [۹]

خواص مکانیکی	فولاد ضد زنگ ۳۰۴	فولاد ضد زنگ ۲۰۱	فولاد کم کربن ۱۰۱۵
سختی (راکول B)	۸۲	۸۵	۷۱
استحکام نهایی (مگا پاسکال)	۶۹۱/۷	۹۶۳/۷	۳۴۸/۸
استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	۲۹۹/۱	۴۹۱/۹	۲۰۰/۸
ازدیاد طول در شکست	۷۰٪	۵۸/۶٪	۳۹٪
مدول الاستیسیته	۲۰۷	۲۰۷	۲۰۰
K(MPa)	۸۱۸/۴۸	۱۰۰۵/۳	۴۸۴/۷۲
n	۰/۲۶۵۶	۰/۱۴۱۴	۰/۲۶۲

۳- شبیه‌سازی

روش عددیی که در این مقاله برای شبیه‌سازی فرایند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ استفاده شده روش صریح است. در حل عددی صریح از المان C3D8R استفاده شد.

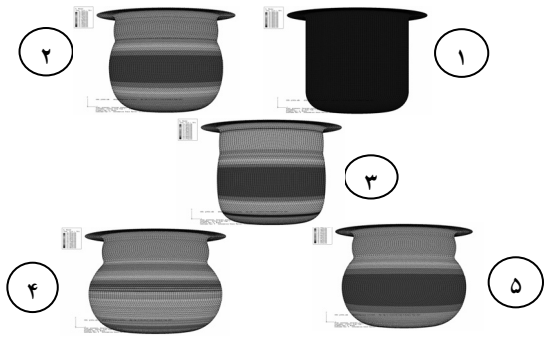
برای بررسی و مقایسه اثر پارامترهای دیگری مانند ضریب سختی و تنش تسلیم، خواص مکانیکی ورقهایی از جنس فولاد زنگ نزن ۲۰۱[1] و آهن ۱۰۱۵[2] نیز با استفاده از آزمایش کشش استخراج شده و در حل عددی استفاده شده است (جدول ۱). ضریب اصطکاک در تمامی مراحل برابر ۰/۵۰[۱۲-۱،۱۰] و شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شده که مانند آزمایشهای انجام شده، دو انتهای لوله ثابت باشد. برای شبیه‌سازی در مرحله اول از پروفیل افزایش فشار به‌صورت خطی و در مرحله دوم(برای بررسی اثر بازگشت فنری) پروفیل فشار با شیب منفی (پروفیل واقعی فشار) به‌کار برده شده است. منحنی پروفیل‌های فشار درشکل.(۷) نشان داده شده است.



شکل ۷ پروفیل‌های اعمال فشار

در مقایسه قطر خارجی در مرکز قوس اول و دوم با یافته‌های تجربی، مشاهده می‌شود که درصد خطا وقتی از پروفیل واقعی فشار در شبیه‌سازی استفاده می‌شود، به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد(شکل ۹).

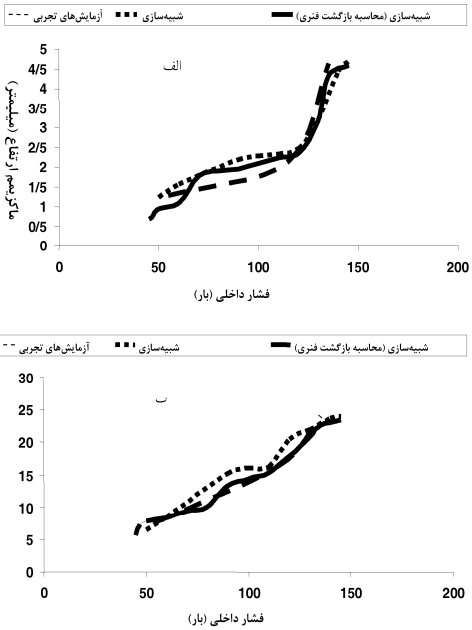
همچنین در مقایسه منحنیهای حاصل از بررسی تغییرات ضخامت با حل عددی و داده‌های حاصل از آزمایشها، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود(شکل ۱۰).



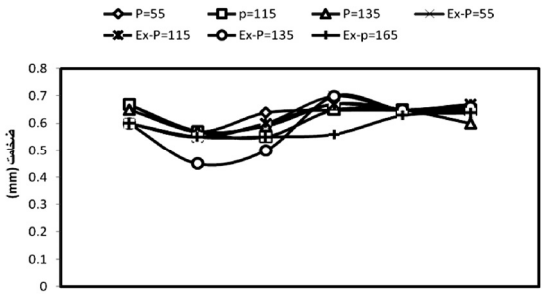
شکل ۸ مراحل شکلدهی در نرم‌افزار

1. Stainless Steel 201
2. Low Carbon Steel 1015

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]



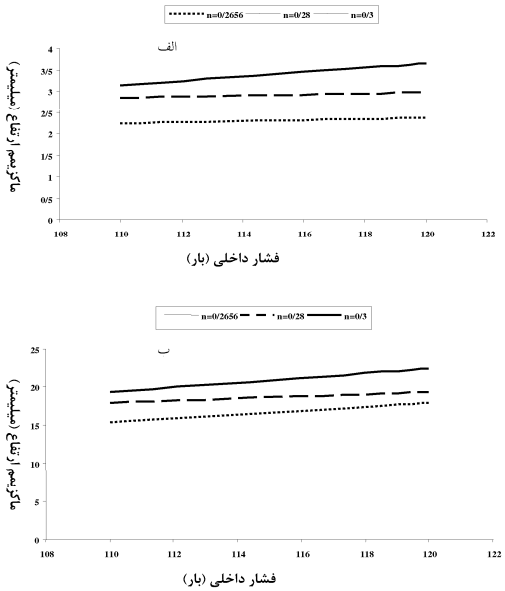
شکل ۹ یافته‌های تجربی و شبیه‌سازی الف) بیشینه تغییر قطر خارجی(منحنی اول) ب) بیشینه تغییر قطر خارجی (منحنی دوم)



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

۳-۱- 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 کرنش سختی برای مقادیر مختلف n نشان می‌دهد. توجه به رابطه $\sigma = K(\varepsilon)^n$ مشاهده می شود با افزایش ضریب کرنش سختی (تغییر شکل در ماده نرمتر، n بیشتر)، فشار داخلی مورد نیاز برای شکلدهی قطر خارجی معین، کاهش می یابد.



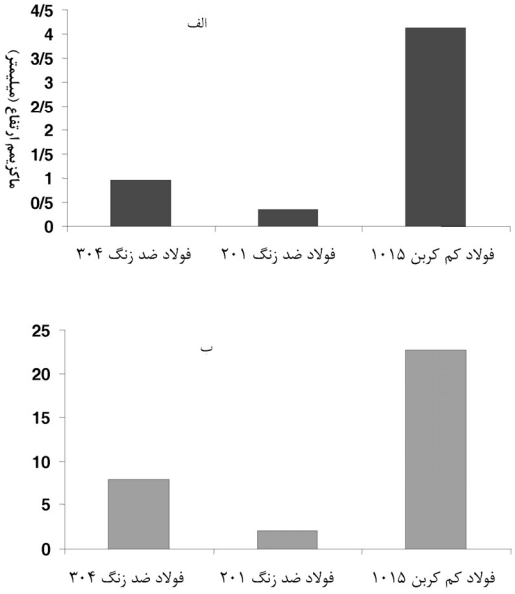
شکل ۱۱ تغییرات قطر خارجی با تغییر ضریب کرنش سختی الف) منحنی اول ب) منحنی دوم

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 اهن ۱۰۱۵ با فشار پایین‌تر از فشار لازم برای شکلدهی فنجان از جنس ۳۰٤ نشان دهندهٔ و لزوم استفاده از فشار داخلی بالاتر در شکلدهی فنجان از جنس ۲۰۱ نسبت به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]

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.

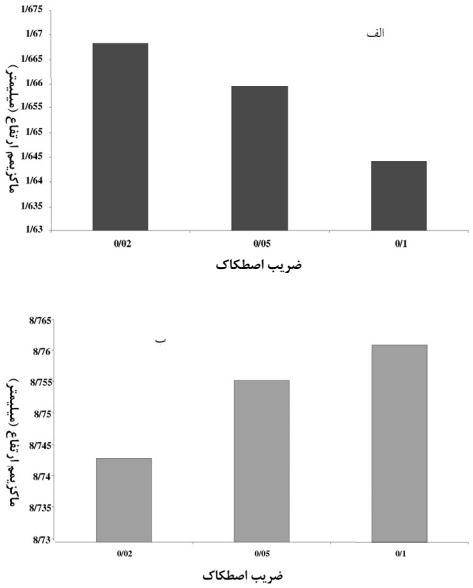


شکل ۱۲ تغییرات قطر خارجی در شکلدهی قطعات پیش شکل داده شده با جنس‌های مختلف الف) منحنی اول ب) منحنی دوم

۳-۲- ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک در فرایند شکلدهی دبل بالج هیدروفرمینگ، نشان دهندهٔ اثر پارامترهای تأثیرگذاری مانند صافی سطح دیواره قالب، کیفیت سطح قطعه پیش شکل داده شده و لزجت سیال واسطه شکلدهی 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 شکلدهی منحنی اول می‌شود. با افزایش نیروهای مقاوم در برابر شکلدهی 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

٤- نتیجه‌گیری

۱- در این مقاله، دقت ناچیز فرایندهای تولیدی سنتی مانند شکلدهی چرخشی در مقایسه با روش نوین دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ نشان داده شده. در مقایسه با روش دیل بالج تیوب هیدروفرم، روشهای سنتی، 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 شکلدهی افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه سطح قالب صیقلی‌تر بوده و از ورقهایی با سطح صیقلی یا روکش‌دار استفاده شود، کیفیت قطعه نهایی بهتر خواهد بود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]

۳- با افزایش ضریب کرنش سختی فشار لازم برای شکلدهی به‌شدت کاهش می‌یابد.

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

[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** " شبیه‌سازی فرایند شکلدهی دبل بلانک 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1389.10.3.8.3]