

بررسی های تجربی و عددی پارامترهای موثر در یک روش جدید هیدروفورمینگ ورق

مرتضی حسین زاده^۱، حمید مستاجران^۲، محمد بخشی^۳، عبدالحمید گرجی^۴، سلمان نوروزی^۵ و سید جمال حسینی پور^۶

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۳/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۱۸)

چکیده

در سال های اخیر، روش های مختلف هیدروفورمینگ ورق های فلزی از سوی محققان ارائه شده است. این روش ها، علی رغم داشتن مزایای بسیار، محدودیت هایی نیز دارند. از سوی نگارندگان این مقاله نیز قبلاً یک روش جدید هیدروفورمینگ ارائه شده است. در روش ارائه شده در این مقاله از یک صفحه پلی یورتانی به منظور کنترل نیروی ورقگیر و کاهش چروکیدگی در ناحیه فلنج استفاده می شود. پارامترهای موثر، نظیر پیش بشکهای کردن و فشار شکل دهی، به صورت تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که شکل دهی در قالب جدید هیدروفورمینگ در مقایسه با روش های دیگر هیدروفورمینگ به فشار سیال بسیار پایین تری نیاز دارد. به همین دلیل، پیش بشکهای کردن تأثیر چندانی بر توزیع ضخامت محصول ندارد. همچنین، نشان داده شده که با افزایش فشار شکل دهی، ضخامت بحرانی از ناحیه سر سنبه به ناحیه دیواره قطعه انتقال پیدا می کند. همچنین، تأثیر اصطکاک بین سنبه و ورق به صورت شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که افزایش اصطکاک سبب بهبود توزیع ضخامت در فرایند کشش عمیق می شود.

واژه های کلیدی: شکل دهی فلزات، کشش عمیق، هیدروفورمینگ ورق، شبیه سازی اجزای محدود

Experimental and Numerical Investigations of the Effective Parameters in a New Sheet Hydroforming Method

M. Hosseinzade, H. Mostajeran, M. Bakhshi, A.H. Gorji, S. Norouzi, and S.J. Hosseinipour
Mech. Eng. Dept., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

ABSTRACT

In recent years, several sheet hydroforming methods have been introduced by researchers. Despite the advantages of these methods, they have some limitations. A new sheet hydroforming process was previously introduced by the authors, where in a polyurethane diaphragm is used to control the blank holder force and to reduce wrinkling in the flange area. In this paper, the effect of significant parameters, including pre-bulging and forming pressure was studied by experimental work and by finite element simulation. It was shown that in forming by the proposed die, a much lower pressure was required compared to those in other sheet hydroformings. Moreover, it was concluded that in the new die, pre-bulging does not considerably affect the sheet thickness distribution. It was also illustrated that by increasing the internal pressure, the critical thickness will be transferred from the punch tip area towards the product wall area. Also, the effect of friction coefficient between the punch and the blank was studied numerically and it was shown that increasing the friction coefficient causes improvement in the thickness distribution.

Keywords: Metal Forming, Deep Drawing, Sheet Hydroforming, Finite Element Simulation

۱-دانشجوی دکتری: m_hosseinzadeh59@yahoo.com

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد: h.mostajeran@stu.nit.ac.ir

۳- استاد (نویسنده پاسخگو): bakhshi@nit.ac.ir

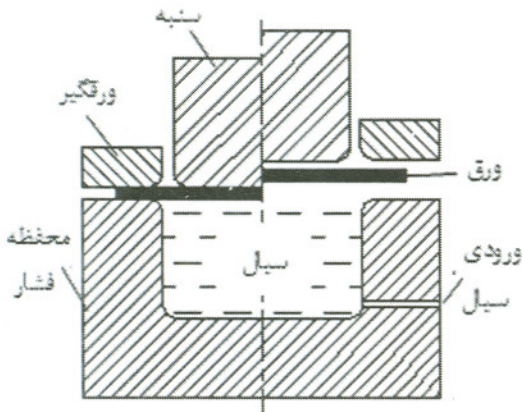
۴- دانشجوی دکتری: Hamidgorji@nit.ac.ir

۵-استادیار: S_nourouzi@nit.ac.ir

۶- استادیار: J_hosseini@nit.ac.ir

Archive of SID

تحت تغییر شکل قرار گرفتن دیافراگم، خرابی زودرس در آن اتفاق می افتد. علاوه، تعویض دیافراگم وقت گیر و پرهزینه بوده و استفاده از آن موجب افزایش نیروی شکل دهی می شود. همچنین استفاده از دیافراگم مانع شکل دهی لبه های تیز در ورق خواهد شد. از این رو، کاربرد روش هیدروفرمینگ استاندارد در صنعت با مشکلاتی همراه می باشد که با استقبال صنعتگران مواجه نگردیده است. به منظور رفع مشکلات روش هیدروفرمینگ استاندارد روش کشش عمیق هیدرومکانیکی ساده بر اساس روش هیدروفرمینگ استاندارد ارائه شد که در شکل ۲ شماتیک این روش نشان داده شده است [۳-۴].



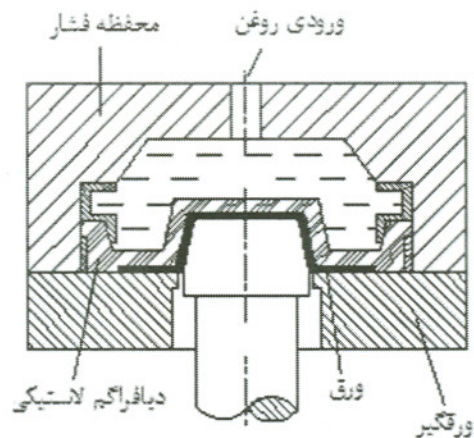
شکل (۲): نمایش شماتیک روش هیدرومکانیکی.

همانطور که از شکل پیداست، در این روش، دیافراگم حذف شده و ورق بطور مستقیم با روغن در تماس می باشد. در روش کشش عمیق هیدرومکانیکی ساده، همانند روش کشش عمیق سنتی، ورق در بین ورقگیر و قالب (محفظه فشار) تحت فشار نگه داشته می شود. از این رو، نسبت کشش در این روش چندان زیاد نیست. همچنین آب بندی در این حالت بسیار مشکل می باشد که این نکته یک محدودیت عمده محسوب می شود. برای رفع محدودیت فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی ساده، روش دیگر هیدروفرمینگ به نام کشش عمیق هیدرومکانیکی ارائه گردید که شماتیک آن در شکل ۳ آمده است [۴]. در این روش، ورق گیر در فاصله معینی از ورق قرار می گیرد و با وارد شدن فشار روغن، ورق به ورق گیر می چسبد. بدین ترتیب نسبت کشش افزایش یافته

۱- مقدمه

در طی سالهای اخیر نوآوریهای بسیاری در زمینه فرآیند کشش عمیق ورق های فلزی معرفی شده است که یک نمونه مهم آن روش هیدروفرمینگ ورق می باشد [۱]. در این روش، علاوه بر اعمال نیروی پرس، بطور همزمان از فشار یک سیال نیز برای عملیات شکل دهی استفاده می شود [۲]. در مقایسه با روش کشش عمیق سنتی، تکنولوژی هیدروفرمینگ ورق مزایای متعددی دارد که مهمترین آنها عبارتند از: شکل دهی قطعات پیچیده، شکل دهی با نسبت کشش زیاد، دقت ابعادی بالاتر به دلیل کاهش برگشت فنری، صافی سطح مطلوب و عدم نیاز به قالب پیچیده [۳].

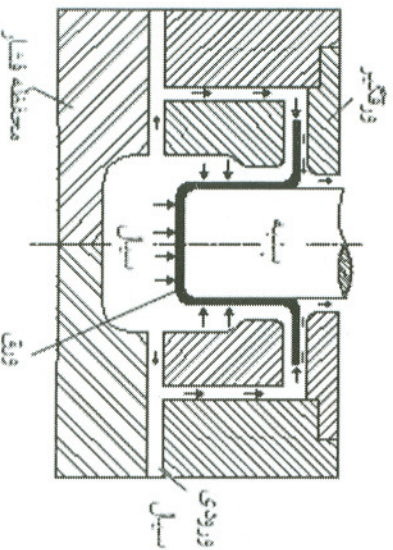
در زمینه هیدروفرمینگ ورق تحقیقات بسیاری در طی سالهای اخیر انجام شده و روشهای متعددی از سوی محققان ارائه گردیده است. روش هیدروفرمینگ استاندارد توسط سیرووارودچلوان و همکارش [۱]، کندیل [۲] و ژنگ و همکارش [۳] مورد بررسی قرار گرفت. تصویر کلی این روش در شکل ۱ نشان داده شده که در آن قالب به یک محفظه فشار تبدیل گردیده و فشار سیال از طریق یک دیافراگم لاستیکی واقع در بین ورق و سیال به ورق منتقل می شود.



شکل (۱): نمایش شماتیک روش هیدروفرمینگ

استاندارد.

همانگونه که در شکل ۱ دیده می شود، یکی از اجزای اصلی روش هیدروفرمینگ استاندارد، دیافراگم لاستیکی است. *SID.ir* سیال مورد استفاده قرار می گیرد. به علت تماس مستقیم سیال با دیافراگم و نیز

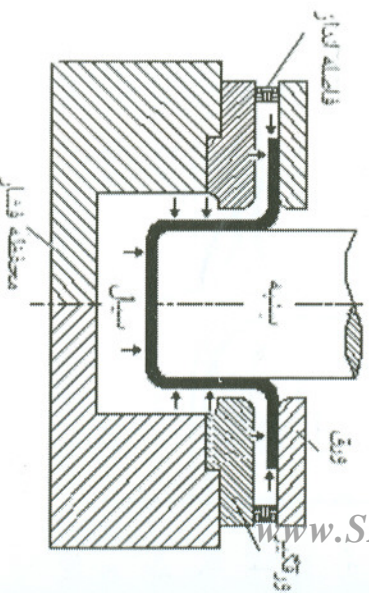


شکل (۴): نمایش شماتیک روش هیدروفرم [۳].

تنش در ناحیه ای که ورق به دور سنبه چسبیده است تغییر می کند. این امر از پارگی و چروکیدگی ورق در مراحل ابتدایی شکل دهی جلوگیری می کند. پس از اینکه فشار تا اندازه از پیش تعیین شده ای رسید، سنبه شروع به حرکت می کند.

از نظر آن محققان بر طبق محل قرار گیری سنبه، پیش بشکه ای کردن به دو صورت انجام می گیرد. پیش بشکه ای کردن مثبت^۳ و پیش بشکه ای کردن منفی^۴ تصویر این دو روش در شکل ۵ نشان داده شده است.

به منظور رفع محدودیتهای روشهای قبلی، یک روش جدید هیدروفرمینگ ورق از سوی نگارندگان ارائه شد [۶]. شماتیک روش جدید در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، بر خلاف هیدروفرمینگ استاندارد (شکل ۱) که در آن دیافراگم لاستیکی ورق را بطور کامل از محفظه فشار جدا می کند، در این روش و در زیر پلی یورتانی صرفاً^۵ در ناحیه بین ورقگیر و ماتریس و در زیر ماتریس استفاده شده است. در مجموعه قالب طراحی شده، روغن از سمت پایین وارد محفظه فشار شده و به زیر ورق و پلی یورتان فشار اعمال می کند. نیروی ورقگیری در این روش تابعی از فشار محفظه است. شکل دهی در این روش شامل دو مرحله می باشد:

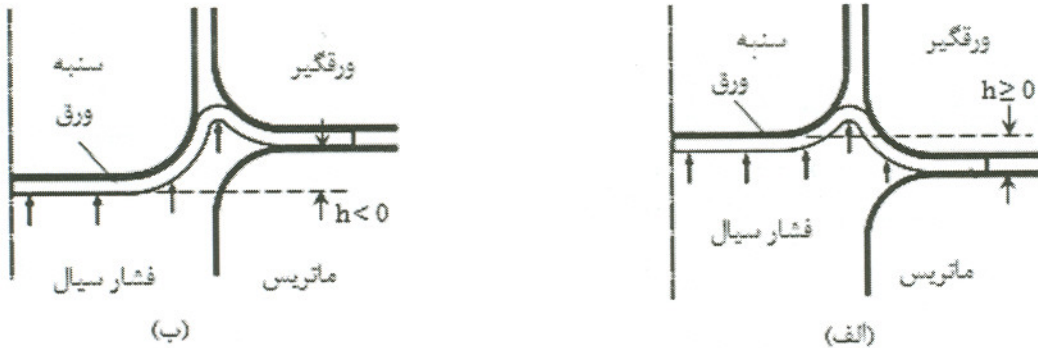


شکل (۳): نمایش شماتیک روش کشش عمیق هیدرومکانیکی [۴].

است، اما به علت اینکه ورق در یک سمت با محیط نرم یعنی با روغن در تماس می باشد، در حین انجام فرآیند، در ناحیه فلنج آن یعنی ناحیه ای از ورق که بین ورقگیر و قالب قرار دارد، چروکیدگی به وجود می آید که یک محدودیت اصلی این روش محسوب می گردد.

بر اساس روش کشش عمیق هیدرومکانیکی، روش کشش عمیق هیدروفرم توسعه یافته است که شماتیک آن در شکل ۴ آمده است [۳]. در این روش، ورق در هر دو سمت در بین ورقگیر و قالب در تماس می باشد و نه با ورق گیر و نه با قالب تماس ندارد. بر این اساس نسبت کشش حدی^۱ افزایش یافته است، اما احتمال ایجاد چروکیدگی در ورق نسبت به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی بیشتر می باشد، زیرا ورق در هر دو طرف آزاد است. لنگ^۲ و همکارانش [۵] تاثیر پیش بشکه ای کردن را در شکل دهی کشش عمیق هیدرومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. منظور از پیش بشکه ای کردن، افزایش فشار درون محفظه قبل از حرکت سنبه می باشد. این کار دو تاثیر مهم دارد. اول اینکه افزایش فشار روغن سبب شکل گیری اولیه ورق به دور سنبه می شود. این امر سبب افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق می گردد و از نازک شدگی ورق جلوگیری می کند. دیگر اینکه در هنگام حرکت سنبه حالت

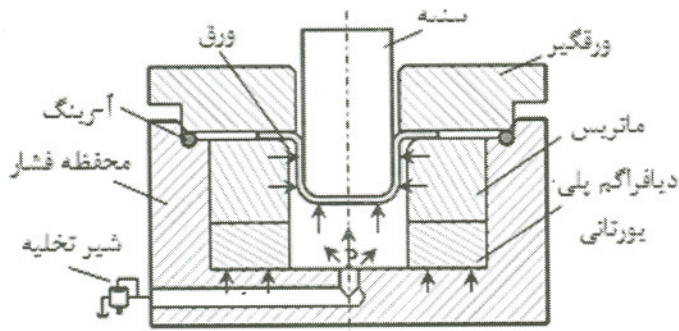
Archive of SID



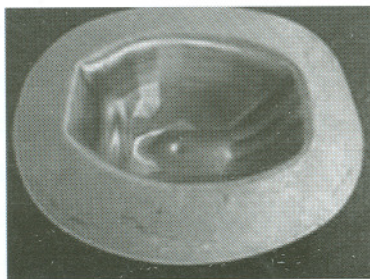
شکل (۵): حالت‌های مختلف پیش‌بشکه‌ای، (الف) مثبت، (ب) منفی.

شکل ۷ یک نمونه از قطعه پیچیده شکل داده شده با این روش را نشان می‌دهد. در این مقاله تاثیر پارامترهای موثر در روش جدید نظیر فشار پیش بشکه ای کردن و فشار شکل دهی بصورت تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

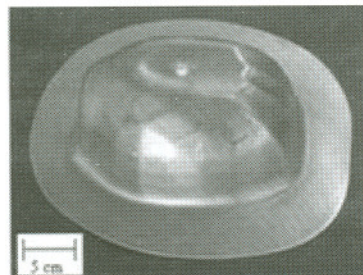
۱) فشرده شدن پلی یورتان در اثر وارد شدن فشار روغن از سمت پایین و اعمال نیروی ورقگیر و
 ۲) شکل دهی قطعه در اثر حرکت سنبله نشان داده شده است که قالب جدید هیدروفورمینگ برای شکل دهی قطعات صنعتی پیچیده فلنج دار مناسب می باشد [۶].



شکل (۶): نمایش شماتیک روش ارائه شده برای هیدروفورمینگ ورق.



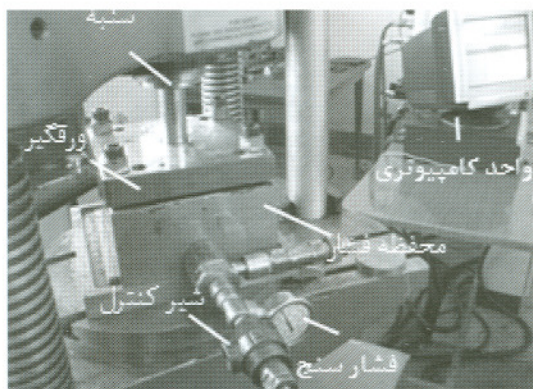
(ب)



(الف)

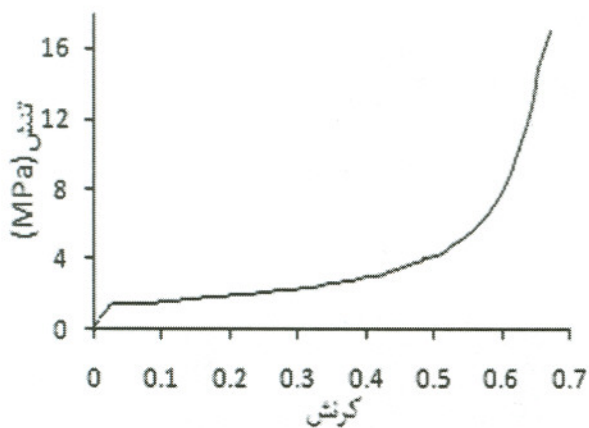
شکل (۷): قطعه پیچیده شکل داده با روش ارائه شده [۶].

۲- مراحل آزمایشگاهی



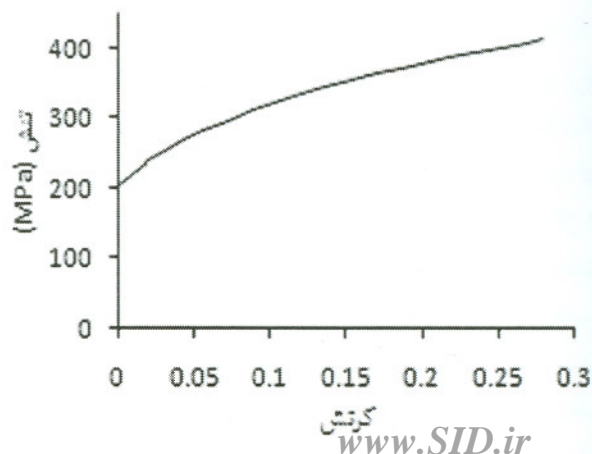
شکل (۸): مجموعه قالب ارائه شده در حالت نصب شده بر روی دستگاه.

و دانسیته $1,500 \text{ Kg/m}^3$ استفاده شده است. خواص الاستیکی پلی یورتان با استفاده از آزمایش فشار تک محوری و طبق استاندارد ASTM-D575-91 [۷] بدست آمده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



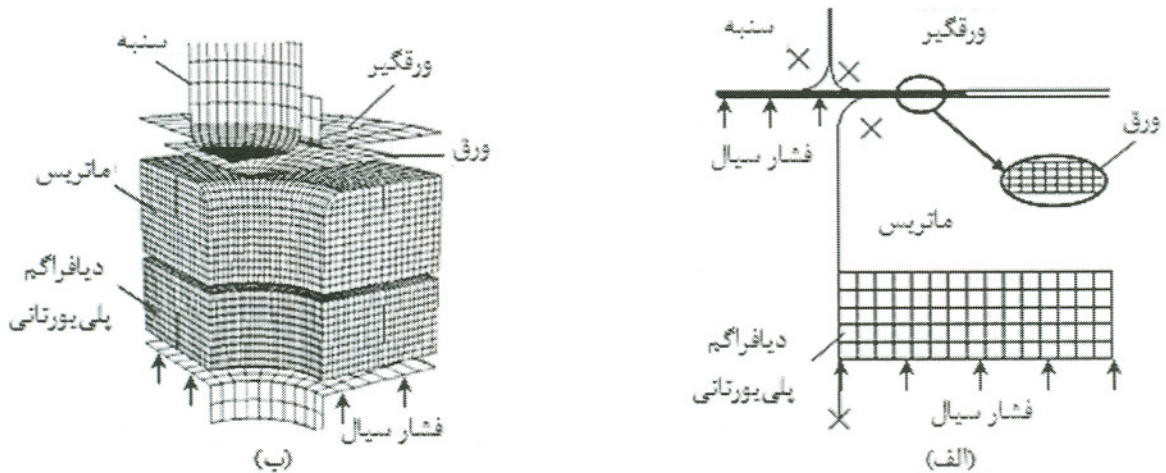
شکل (۱۰): نمودار تنش-گرنش پلی یورتان با سختی ۸۰.

تمام آزمایشها با استفاده از یک دستگاه آزمایش اونیورسال هیدرولیکی با ظرفیت 600 KN انجام شده است. کلیه حرکات دستگاه توسط واحد کامپیوتری متصل به آن قابل کنترل می باشد. همچنین سیستم تولید فشار توسط یک مجموعه هیدرولیکی تامین شد که قابلیت اعمال فشار را تا 20 MPa داشته و مقدار فشار بیشینه، با یک شیر محدود کننده فشار قابل کنترل می باشد. مجموعه قالب در حالت نصب شده بر روی دستگاه در شکل ۸ نشان داده شده است. جهت بررسی تاثیر پارامترهای مربوط به قالب جدید، آزمایشها برای تولید یک قطعه استوانه ای انجام گرفت. ورق بکار رفته برای شکل دهی از جنس فولاد St14 می باشد. برای تعیین خواص مکانیکی آن از آزمایش کشش استفاده شده است. شکل ۹ منحنی تنش-گرنش حقیقی بدست آمده را برای نمونه فولادی نشان می دهد. پارامترهای اصلی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای انجام آزمایشها از یک صفحه پلی یورتانی با سختی 80 shore-A



شکل (۹): نمودار تنش-گرنش حقیقی.

دانسیته (ρ)	ضریب استحکام (k)	ضریب پواسن (ν)	نمای کرنش سختی (n)	مدول یانگ (E)	تنش تسلیم (σ_y)
7800 Kg/m^3	549 Mpa	0.3	0.24	210 Mpa	204 Mpa



شکل (۱۱): مدل اجزای محدود ایجاد شده در نرم افزار (الف) دوبعدی، (ب) سه بعدی.

صلب تحلیلی^۲ در نظر گرفته شده اند. برای شبکه بندی ورق از المان پوسته ای متقارن محوری SAX1^۳ و برای شبکه بندی دیافراگم از المان مربعی متقارن محوری چهارگره ای CAX4R استفاده شد. بعلاوه، به منظور بررسی چروکیدگی از شبیه سازی سه بعدی استفاده شده است. در مدلسازی سه بعدی به علت تقارن، تنها یک چهارم ورق و مجموعه قالب شبکه بندی شده است. در مدل ایجاد شده ورق و پلی یورتان بصورت شکل پذیر و سایر اجزا بصورت صلب مجزا^۴ در نظر گرفته شده اند. ورق با استفاده از المان پوسته ای چهارگره ای S4R و پلی یورتان نیز با المان مکعبی هشت گرهِ ای C3D8R

۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه سازی از نرم افزار اجزای محدود Explicit ABAQUS / 6.5 استفاده شده است. بدلیل تقارن محوری قطعه و قالب، شبیه سازی در حالت دو بعدی انجام گرفت. ورق بصورت یک ماده الاستیک-پلاستیک شکل پذیر و دیافراگم بصورت یک ماده هایپراستیک شکل پذیر^۱ در نظر گرفته شد. جهت معرفی خواص ورق، نتایج به دست آمده از تست کشش ورق بصورت جدول تنش-کرنش به نرم افزار معرفی گردید. همچنین جهت معرفی خواص پلی یورتان، نتایج به دست آمده از تست فشار تک محوری بصورت جدول تنش-کرنش به نرم افزار معرفی گردید. سایر اجزا بصورت

Archive of SID

تقریبی به دست آمده است که در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$e_z = FLD_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0 \right) \left(\frac{n}{0.21} \right). \quad (2)$$

در رابطه (۲)، FLD_0 کرنش مهندسی اصلی در شرایط کرنش صفحه ای، n نمای کرنش سختی و e_z کرنش مهندسی در دیواره می باشد.

با توجه به رابطه (۳) کرنش مهندسی را می توان به کرنش واقعی تبدیل کرد.

$$\varepsilon_\theta = \ln(1 + (e_\theta / 100)) \quad (3)$$

همچنین، با توجه به برقرار بودن شرایط کرنش صفحه ای:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_z + \varepsilon_t = 0 \Rightarrow \varepsilon_t = -\varepsilon_z, \quad (4)$$

$$\% \text{thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0}. \quad (5)$$

با قرار دادن مقادیر جدول ۱ در روابط (۵-۱) ضخامت نهایی قطعه کار در لحظه گلوبی شدن ۰/۷۱ به دست می آید. در نرم افزار توزیع ضخامت تحت عنوان STH شناخته می شود.

۴- بررسی پارامترهای موثر

در این بخش پارامترهای موثر در این روش جدید هیدروفرمینگ بررسی شده است.

۴-۱- پیش بشکه ای شدن

برای بررسی تاثیر مسیر فشار شکل دهی و پیش بشکه ای کردن، دو مسیر فشار با قابلیت کنترل آسان انتخاب شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

فشار بیشینه در این دو مسیر یکسان می باشد. در مسیر فشار نشان داده شده در شکل ۱۲-الف فشار با حرکت سنبه افزایش می یابد تا به مقدار بیشینه مورد نظر برسد و

شبه بندی شده اند. شکل ۱۱ مدل‌های ایجاد شده را نشان می دهد.

ورق بصورت ماده همسانگرد در نظر گرفته شده است. جهت مدل کردن اصطکاک بین اجزای قالب و ورق از مدل کولمب استفاده شده است. ضریب اصطکاک بین ورق و ورقگیر ۰/۰۸، بین ورق و سنبه برابر ۰/۱ و بین ورق و ماتریس برابر ۰/۰۶ در نظر گرفته شد [۸].

در انواع روشهای هیدروفرمینگ نشان داده شده در شکل های ۲ - ۴ در تمام سطوح زیرین ورق، فشار سیال اعمال می شود.

در مقابل، در روش ارایه شده، مطابق شکل (۶)، فشار سیال تنها در محدوده محفظه فشار وجود دارد و در زیر ورق گیر فشار وارد نمی شود. به منظور اعمال فشار سیال به ورق در محدوده محفظه فشار در شبیه سازی، از زیر روال^۱ Vdload استفاده شده است. مقدار و توزیع فشار سیال با توجه به مسیرهای فشار مورد استفاده (که در بخش های بعدی به آن پرداخته شده است) با استفاده از این زیرروال تعیین شده است. فشار زیر پلی یورتان نیز بصورت یک فشار یکنواخت با دامنه مناسب وارد شده است.

به منظور مشخص کردن پارگی در قطعات شبیه سازی شده، ماکزیمم مقدار نازک شدگی در ورق، t_f ، که با استفاده از مرجع [۹] به دست می آید به عنوان معیار حداکثر نازک شدگی ورق در نظر گرفته شده است. ماکزیمم مقدار نازک شدگی با استفاده از کرنش ضخامتی در شرایط کرنش صفحه ای از دیاگرام حد شکل دهی به دست می آید (رابطه ۱).

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right) \Rightarrow t_0 = t_f \exp(\varepsilon_t), \quad (1)$$

در رابطه (۱)، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی ورق در لحظه شروع گلوبی می باشد.

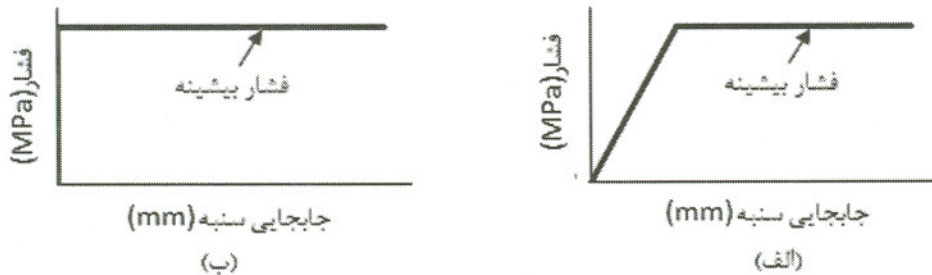
کرنش مهندسی اصلی، e_z ، در شرایط کرنش صفحه ای توسط گروه تحقیقاتی کشش عمیق آمریکای شمالی^۲ بطور

Archive of SID

نیفتاده است. ناحیه E بخش فوقانی جداره فنجان و ناحیه فلنج احتمالی است که در آن افزایش ضخامت به وجود می آید. همانطور که دیده می شود بیشترین کاهش ضخامت مربوط به دو ناحیه یعنی ناحیه در تماس با شعاع سر سنبه (ناحیه B) و ناحیه دیواره (ناحیه D) می باشد. با توجه به شکل ۱۵ می توان گفت که در مسیر فشار شکل ۱۲-ب نازک شدگی بیشتری اتفاق می افتد. از این رو می توان نتیجه گیری نمود که پیش بشکه ای کردنی که در این مقاله ایجاد گردیده، تاثیر منفی بر توزیع ضخامت قطعه دارد. اما به دلیل اینکه این تاثیر چندان قابل ملاحظه نمی باشد و همچنین به دلیل آسانتر بودن کنترل مسیر فشار، در ادامه مقاله از مسیر فشار شکل ۱۲-ب استفاده شده است.

سپس با استفاده از شیر کنترل فشار، ثابت نگه داشته می شود. در مسیر فشار نشان داده شده در شکل ۱۲-ب، در حالیکه سنبه در تماس با ورق و ثابت است، فشار به مقدار بیشینه می رسد و سپس در طول کورس ثابت نگه داشته می شود. این مسیر فشار موجب ایجاد حالت پیش بشکه ای کردن در قالب می شود که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

منحنی تغییرات ضخامت اندازه گیری شده در راستای نشان داده شده در شکل ۱۴-الف، برای دو نمونه تولید شده با استفاده از مسیرهای فشار شکل ۱۲ در شکل ۱۵ نشان داده شده است که در آن منحنی ها بر اساس ناحیه های شکل ۱۴-ب تفکیک شده اند. ناحیه A مربوط به کف قطعه می باشد که تغییر ضخامت زیادی در آن اتفاق

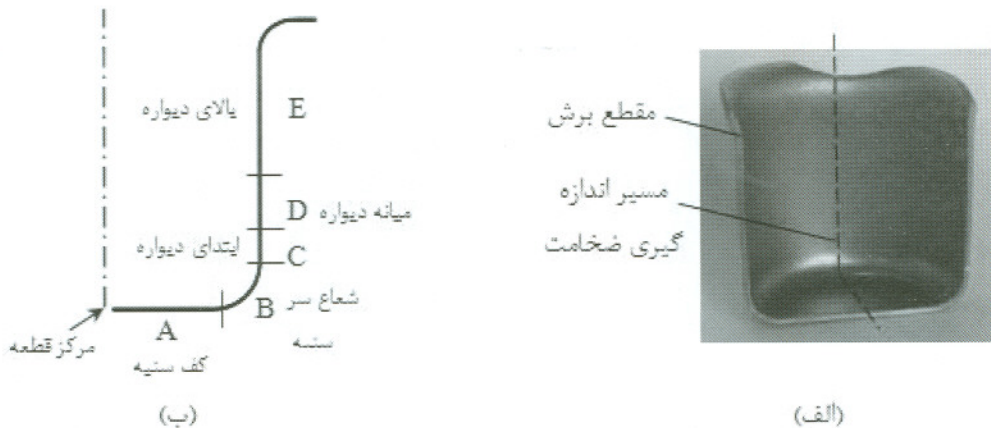


شکل (۱۲): مسیر فشارهای استفاده شده در آزمایش ها، (الف) خطی-ثابت، (ب) ثابت.

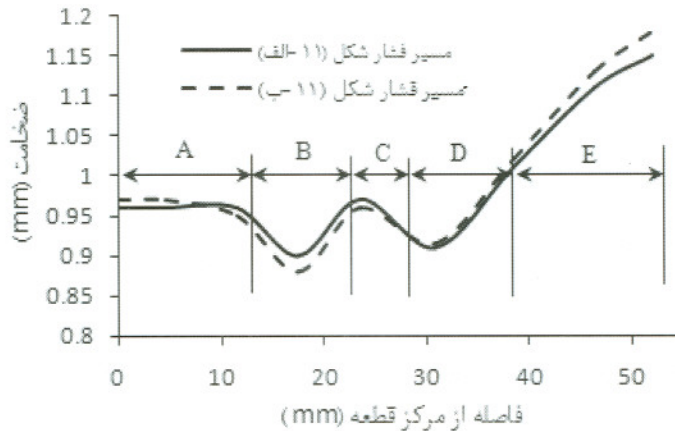


شکل (۱۳): حالت پیش بشکه ای ایجاد شده با استفاده از مسیر فشار شکل ۱۲-ب.

Archive of SID



شکل (۱۴): (الف) مقطع برش داده شده، (ب) تقسیم بندی نمونه شکل داده شده.



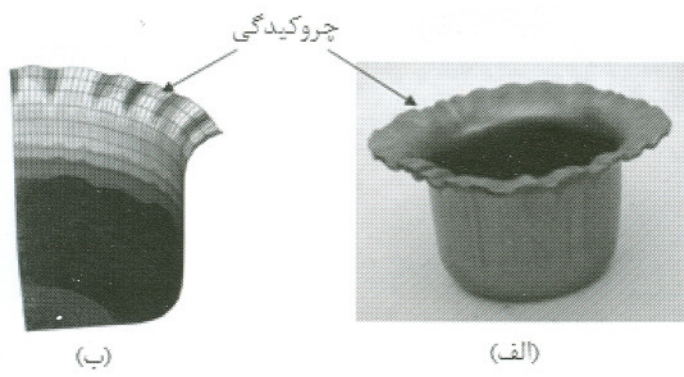
شکل (۱۵): توزیع ضخامت نمونه های تولید شده با استفاده از دو مسیر نشان داده شده در شکل (۱۲).

بیشینه افزایش داده شد و ملاحظه گردید که در فشار MPa ۳/۳ چروکیدگی برطرف گردید. قطعه تولید شده با این مسیر فشار در شکل ۱۷ نشان داده شده است. پس از شکل گیری اولین قطعه سالم، برای بدست آوردن فشار پارگی، فشار شکل دهی به تدریج افزایش داده شد. با افزایش فشار شکل دهی نمونه های دیگری تولید شدند. شکل های ۱۸-۱۹ قطعات تولید شده با فشارهای MPa ۴ و MPa ۵/۵ را نشان می دهد که بطور کامل و مطلوب شکل داده شده اند.

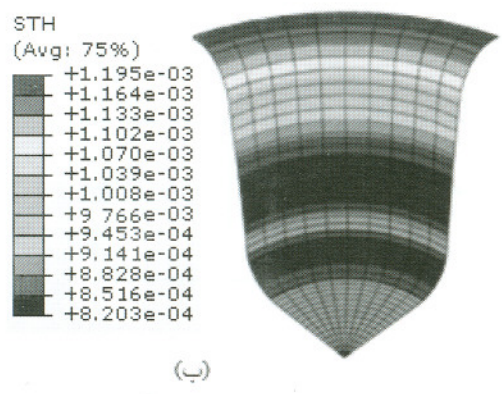
۴-۲- فشار شکل دهی

برای بررسی تاثیر فشار شکل دهی در قالب جدید هیدروفرمینگ، مقادیر مختلف فشار بر اساس مسیر فشار شکل ۱۲-ب اعمال گردید. شکل ۱۶ قطعه شکل داده شده با فشار بیشینه MPa ۲/۸ را نشان می دهد که در ناحیه فلنج آن چروکیدگی ایجاد شده است. همانطور که ذکر شد، در قالب جدید هیدروفرمینگ نیروی ورقگیر تابع فشار محفظه می باشد. بنابراین با پایین بودن فشار روغن، نیروی ورقگیر نیز کم می باشد و چروکیدگی در ناحیه فلنج به وجود می آید. برای حذف چروکیدگی در ناحیه فلنج، فشار

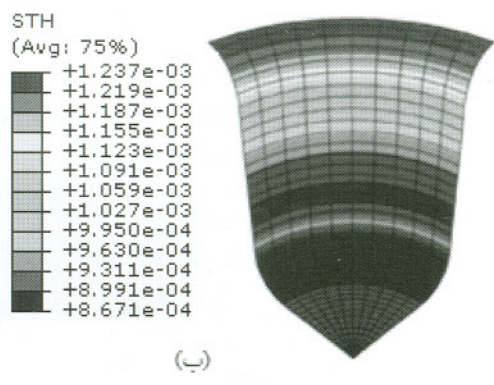
Archive of SID



شکل (۱۶): نمونه چروک شده با فشار ۲/۸، (الف) تجربی، (ب) شبیه سازی.

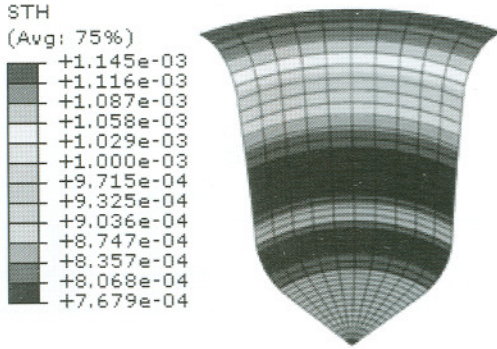


شکل (۱۷): نمونه شکل داده شده با فشار بیشینه ۳/۳، (الف) تجربی، (ب) شبیه سازی.



شکل (۱۸): نمونه شکل داده شده با فشار بیشینه ۴، (الف) تجربی، (ب) شبیه سازی.

Archive of SID



(ب)

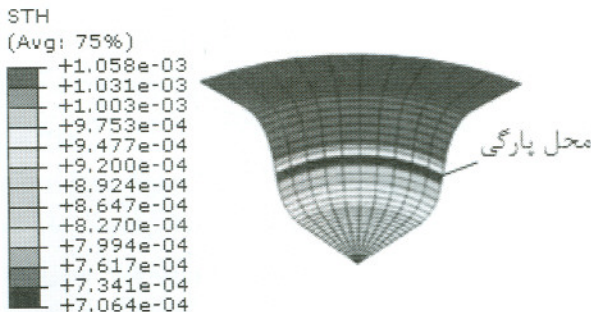


(الف)

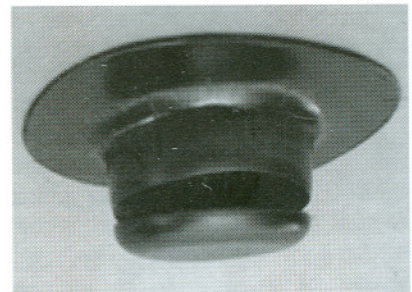
شکل (۱۹): نمونه شکل داده شده با فشار بیشینه ۵/۵، (الف) تجربی، (ب) شبیه‌سازی.

شکل دهی قطعات مطلوب که در شکل های ۱۹-۱۷ نشان داده شده، این نتیجه گیری به دست می آید که این سطح فشار در مقایسه با فشار های گزارش شده در مراجع [۸] و [۱۱] برای تولید قطعات نسبتاً مشابه بسیار پایین تر است. نمودارهای توزیع ضخامت به دست آمده از آزمایشات تجربی و شبیه سازی برای فشارهای مختلف در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، نمودارهای توزیع ضخامت مربوط به فشارهای ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ MPa دارای دو منطقه بحرانی توزیع ضخامت هستند و از شکل ۱۵ پیروی می کنند، اما نمودار توزیع ضخامت فشار ۵/۵ MPa دارای یک منطقه بحرانی می باشد.

شکل ۲۰ نمونه تولید شده با فشار ۶ MPa را نشان می دهد که پارگی در ناحیه تماس با شعاع سر سنبه (ناحیه B در شکل ۱۴-ب اتفاق افتاده است. علت این امر آن است که با افزایش فشار، بر اساس شکل ۶، روغن از سمت پایین پلی یورتان آن را با فشار بیشتری به سمت بالا فشرده می کند. این فشردگی پلی یورتان از طریق ماتریس به ورقگیر منتقل می گردد. در نتیجه ورق با نیروی بیشتر ورقگیر مواجه می شود و از این رو در ناحیه تماس با شعاع سر سنبه ورق دچار پارگی می شود. در واقع با افزایش نیروی ورقگیر، قالب جدید هیدروفورمینگ مشابه عملیات کشش عمیق معمولی عمل می کند [۱۰]. با ملاحظه سطح فشار مناسب برای



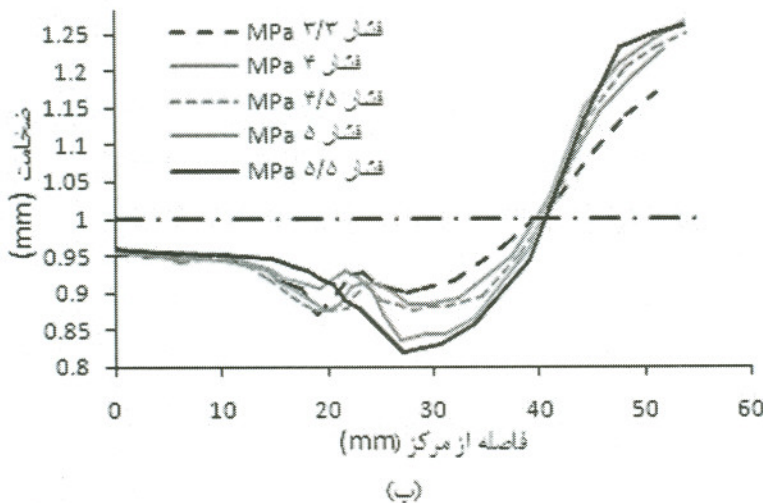
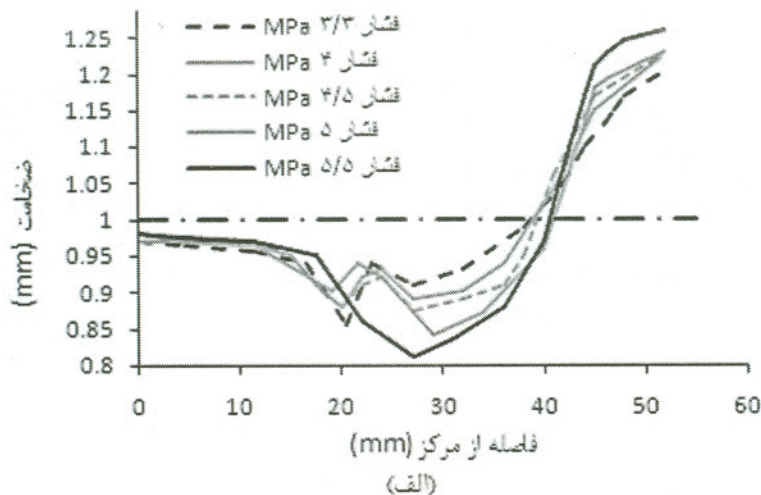
(ب)



(الف) www.SID.ir

شکل (۲۰): نمونه شکل داده شده با فشار بیشینه ۶، (الف) تجربی، (ب) شبیه‌سازی.

Archive of SID

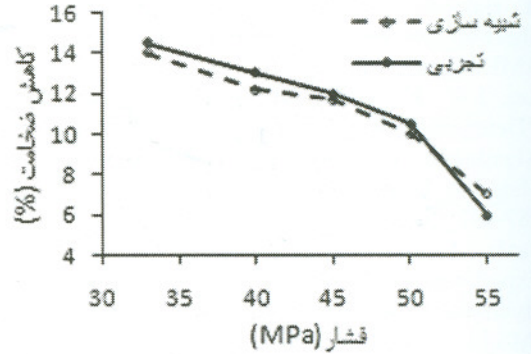
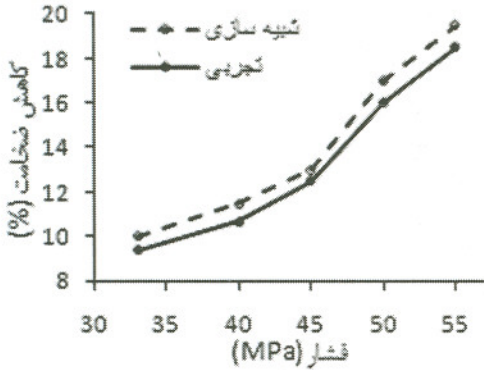


شکل (۲۱): توزیع ضخامت نمونه تولیدشده با استفاده از فشارهای مختلف، (الف) تجربی، (ب) شبیه‌سازی.

سنبه می‌تواند سبب افزایش کشش پذیری شود. در صورت کشیده شدن دیواره، جزءهای روی دیواره نسبت به سنبه به سمت بالا حرکت می‌کنند و بین دیواره و سنبه تنش برشی ایجاد می‌شود، بطوریکه پایین دیواره به طور کامل نیروی کشش را دریافت نمی‌کند. بنابراین به اندازه نواحی بالا کار-سخت نشده است. به همین علت برای افزایش کشش پذیری می‌توان از سنبه زبر و روانکاری غیریکنواخت استفاده کرد. اما استفاده از این مزایا در هنگام تولید دشوار است زیرا سنبه ساییده و هموار می‌شود و ممکن است به طور اتفاقی به ماده روانکار آلوده شود [۱۰].

با استفاده از نمودارهای شکل ۲۱ ضخامت‌های بحرانی در دو منطقه B و D با توجه به فشارهای مختلف به دست آمده و در شکل‌های ۲۲-۲۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌های ۲۲-۲۳ پیداست کاهش ضخامت در ناحیه‌های B و D با تغییر فشار رفتار متفاوتی دارد. در فشارهای پایین کاهش ضخامت در ناحیه B بیشتر و در ناحیه D کمتر است. در مقابل، در فشارهای بالا کاهش ضخامت در ناحیه B کمتر و در ناحیه D بیشتر است. این انتقال ضخامت بحرانی در کشش عمیق لنتی نیز مشاهده می‌شود. در کشش عمیق سنتی، وجود اصطکاک زیاد روی سطح استوانه ای

Archive of SID

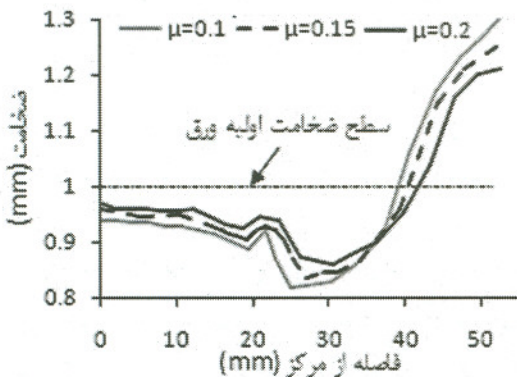


شکل (۲۳): منحنی حداقل تغییرات ضخامت در ناحیه D.

شکل (۲۲): منحنی حداقل تغییرات ضخامت در ناحیه B.

و پلی یورتان SA 80 ، نسبت کشش حدی ۲/۲۵ به دست آمده است.

جهت بررسی بهتر اثر اصطکاک در محل پارگی، فرآیند هیدروفرمینگ ارایه شده با ضرایب اصطکاک ۰/۲ ، ۰/۱۵ ، ۰/۱ بین سنبه و ورق شبیه سازی شده است. نمودارهای توزیع ضخامت این شبیه سازیها در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همانطور که از شکل دیده می شود، با افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق، ضخامت بحرانی ورق به سمت منطقه E (دیواره قالب) می رود که دلیل آن قبلاً ذکر شده است.



شکل (۲۴): توزیع ضخامت نمونه‌های شبیه‌سازی شده با ضرایب اصطکاک مختلف.

اما در روش هیدروفرمینگ به علت وجود فشار روغن در زیر ورق، نیروی اصطکاک بین سنبه و ورق افزایش می یابد. با پایین بودن فشار، ناحیه دیواره قطعه (ناحیه های C و D) به خوبی به سنبه نچسبیده است و اصطکاک بین سنبه و ورق کم می گردد و سبب می شود تا ورق از روی شعاع سنبه کشیده شود. بنابراین در ناحیه شعاع سنبه، ورق دچار نازک شدگی می گردد و پارگی از این ناحیه اتفاق می افتد. اما هنگامی که فشار افزایش می یابد دیواره قطعه به سنبه می چسبد و سبب افزایش نیروی اصطکاک بین سنبه و ورق می شود و به دلیل ذکر شده برای کشش عمیق سنتی مانع از کشیده شدن و نازک شدگی ورق می شود و سبب بالا رفتن تنش در دیواره می شود و پارگی در دیواره رخ می دهد. با توجه به دلیل ذکر شده مشاهده می شود که در شکل ۲۰ با رسیدن فشار به ۶ MPa ، پارگی در ابتدای دیواره رخ داده است، در حالی که هیچگونه چروکیدگی در ناحیه فلنج ظاهر نشده است. بعلاوه این نکته را باید مد نظر قرار داد که با کاهش فشار سیال، در ناحیه فلنج قطعه کار چروکیدگی بوجود می آید. از این رو این نتیجه گیری حاصل می شود که برای شکل دهی مطلوب قطعه کار در قالب جدید هیدروفرمینگ، از یک سو فشار شکل دهی باید مانع از چروکیدگی در ناحیه فلنج شده و از سوی دیگر مانع نازک شدگی بیش از حد در دیواره قطعه گردد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می شود، پژوهش انجام شده در این مقاله، فشار ۴ MPa بهترین فشار می باشد. با استفاده از این فشار

Archive of SID

6. M. Bakhshi-Jooybari, "A New Die Design for Sheet Hydroforming of Complex Industrial Parts", AMPT Conf., Maname, Bahrain, 2008.
7. Lee, J.W., Kwo, H.C., Rhee, M.H., and IM, Y.T., "Determination of Forming Limit of a Structural Aluminium Tube in Rubber Pad Bending", J. Materials Processing Tech., Vol. 140, No. 2, pp. 487-493, 2003.
8. Fazli., A. and Dariani., B.M., "Theoretical and Experimental Analysis of the Axisymmetric Hydromechanical Deep Drawing Process", Proc. IMechE J. Eng. Manufacture, Vol. 220, No. 1, Part B, pp. 1420-1437, 2006.
9. Aue-U-Lan, Y., Ngaile, G., and Altan, T., "Optimizing Tube Hydroforming, Using Process Simulation and Experimental Verification", J. Material Processing Tech., Vol. 146, No. 3, pp. 137-143, 2004
10. Hosford, W.F. and Caddell, R.M., "Metal Forming Mechanics and Metallurgy", Prentice-Hall, London, 1983.
11. Azodi, H.D., "Analysis of Rupture Instability in the Hydromechanical Deep Drawing of Cylindrical Cups", Int. J. Adv. Manufacturing Tech., Vol. 39, No. 1, pp. 734-743, 2008.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی اثر پارامترهایی نظیر پیش بشکه ای شدن، فشار شکل دهی و ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق در شکل دهی یک قطعه استوانه ای با استفاده از یک قالب جدید هیدروفرمینگ ارایه شده توسط نویسندگان بطور تجربی و شبیه سازی پرداخته شد. در روش هیدروفرمینگ مورد نظر نیروی ورقگیر تابعی از فشار سیال درون محفظه می باشد. بنابراین، نشان داده شد که این امر سبب ایجاد محدودیت در بیشترین فشار قابل اعمال می شود به طوریکه فشار شکل دهی در این روش، برای پلی یورتان با سختی 80 shoreA (80SA) در مقایسه با سایر روشها پایین می باشد. همچنین، نسبت کشش حدی در این روش در مقایسه با روش کشش عمیق هیدرومکانیکی ساده مقدار بیشتری می باشد. مشاهده گردید که به علت پایین بودن سطح فشار شکل دهی، پیش بشکه ای کردن تأثیر چندانی در شکل دهی ندارد. از طرفی، نشان داده شد که افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق سبب جابجایی محل پارگی از نوک سنبه به سمت دیواره قطعه کار می شود.

مراجع

1. Thiruvarudchelvan, S. and Lewis, W., "A Note on Hydroforming with Constant Fluid Pressure", J. Material Processing Tech., Vol. 88, No. 1, pp. 51-56, 1999.
2. Kandil, A., "An Experimental Study of Hydroforming Deep Drawing", J. Material Processing Tech., Vol. 134, No. 1, pp. 70-80, 2003.
3. Zhang, S.H. and Danckert, J., "Development of Hydro-mechanical Deep Drawing", J. Material Processing Tech., Vol. 83, No. 3, pp. 14-25, 1998.
4. Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T., and Zhou, L.X., "Recent Developments in Sheet Hydroforming Technology", J. Material Processing Tech., Vol. 151, No. 1, pp. 237-241, 2004.
5. Lang, L., Dankert, J., and Nielsen, K.B., "Investigation into the Effect of Pre-bulging during Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 4, pp. 649-657, 2004.