ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

پیش بینی تحلیلی کرنشها و تنشهای حدی در هیدروفرمینگ لولههای آلومینیومی ناهمسانگرد

حسن مسلمي نائيني*'، سيدجلال هاشمي'، غلامحسين لياقت'، مهران محمدي'، حامد ديلمي عضدي°

۱ – استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳– استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۵– استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

*تهران، صندوق پستی: ۳۳۳–۱۴۱۱۵، moslemi@modares.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
منحنی حد شکلدهی نشاندهنده مقدار شکلپذیری ورق.های فلزی در حالتهای مختلف بارگذاری قبل از رسیدن به نقطه گلویی شدن است. در	مقاله پژوهشی کامل انه مید می بدوند.
این مقاله، کاربرد معیارهای ناپایداری پلاستیک برای پیشبینی گلویی شدن و همچنین منحنی حد شکلدهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله مورد	دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۲ یذبرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۲
بررسی قرار گرفته است. معیارهای ناپایداری پلاستیک مختلف همراه با معیار تسلیم ناهمسانگرد درجه ۲ بارلات به کار گرفته شده و در نسبت	ب یو ی ارائه در سایت: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۳
کرنش متفاوت، کرنشهای حدی محاسبه و در مرحله بعد کرنشهای حدی به تنشهای حدی تبدیل شدهاند. برای بررسی صحت نتایج تحلیلی، 	کلید واژگان:
یک دستگاه بالج ازاد با قابلیت اعمال تغذیه محوری ساخته شده است. لولهها تحت مسیرهای بارگذاری مختلفی قرار گرفتند و شرایط کرنشی	هيدروفرمينگ لوله
متفاوت برای به دست أوردن منحنی حد شکلدهی ایجاد شد. منحنیهای حد شکلدهی به دست أمده به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک	لوله الومينيومي
با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که معیار ناپایداری سویفت برای لولهها بهترین پیش بینی را برای منحنی حد شکل دهی در فرآیند	ناپايدارى پلاستىك
هيدروفرمينگ لوله دارد.	ناهمسانگردی
	حد شکل دھی

Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes

Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Seyed Jalal Hashemi², Gholamhossein Liaghat³, Mehran Mohammadi⁴, Hamed Deilami Azodi⁵

1- Prof., Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2- PhD Student, Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

3- Prof., Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

4- MSc. Student, Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

5- Assis.Prof., Department of Mechanical Engineering, Industrial Univ.of Arak, Arak, Iran.

*P.O.B. 14115-333, Iran, Tehran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 05 July 2013 Accepted 03 November 2013 Available Online 23 April 2014	Forming limit diagram (FLD) shows the formability of metal sheets under different loading conditions before that necking is taken place. In this paper, the application of plastic instability criterion for prediction of necking and also FLD have been investigated. Using Balart's anisotropic yield function and plastic instability criterion in different strain ratios, limit strains have been
Keywords: Tube hydroforming Aluminum tube Plastic Instability Anisotropy Forming Limit	calculated, and then the limit strains have been converted to limit stresses. To verify the analytical results, a free bulge setup with the ability of applying the axial feeding has been fabricated. Tubes have been undergone different loading paths and different plane strain conditions have been induced to obtain FLD. FLDs which have been obtained using plastic instability criterion have been compared with experimental results. The results show that swift instability criterion for tubes have the best prediction of FLD in tube hydroforming process.

ساده مستقیم یا با خم است. با اعمال فشار سیال به داخل لوله و اعمال نیروی محوری به دو انتها، لوله تغییر شکل داده و شکل داخلی قالبی را که در آن قرار دارد به خود می گیرد. شکل ۱ نحوه انجام فرآیند را نمایش

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ، قطعات یکپارچه لولهای شکل را در یک مرحله و با نسبت استحکام به وزن بالا تولید میکند. در این فرآیند، قطعه اولیه یک لوله

Please cite this article using:

hive of

www.SID.ir برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Moslemi Naeini, S.J. Hashemi, Gh.H. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 133-140, 2014 (In Persian)

میدهد. اعمال فشار داخلی بیش از حد باعث ترکیدگی لوله شده و از طرف دیگر اعمال نیروی محوری زیاد همراه با فشار داخلی کم باعث به وجود آمدن چروکیدگی در سطح لوله خواهد شد. بالج آزاد لوله فرآیندی است که برای تعیین مقدار هیدروفرمپذیری لولهها انجام میشود.

مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی زیادی بر روی شکل پذیری لوله در فرآیند هیدروفرمینگ صورت گرفته است. احمد و هشمی [۱] یک روش تحلیلی برای برآورد پارامترهایی مانند فشار، نیروی محوری و نیروی بستن قالب در فرآیند بالج ارائه دادند. آنها همچنین اصولی را برای طراحی قالبها و ابزار مطرح کردند. سوکولوسکی و همکاران [۲] روشی تحلیلی- تجربی برایبه دست آوردن منحنی تنش- کرنش از طریق آزمایش بالج آزاد توسعه دادند.

یک مدل ریاضی برای تغییر شکل پلاستیک لوله حین فرآیند بالج توسط هوانگ و لین [۳] ارائه شد. آنها در این مدل سطح لوله را به صورت بیضی گون فرض کردند و اثر نازکشدگی غیر یکنواخت در محل بالج و اصطکاک بین لوله و قالب را نیز در نظر گرفتند. زینگ و ماکینوچی [۴] مسیر تغییر شکل بهینه را برای لولههای همسانگرد و ناهمسانگرد تحت فشار داخلی و تغذیه محوری به دست آوردند. در مطالعه آنها تأثیر مسیر تغییر شکل، خواص ماده و نسبت طول به قطر فعال، بر روی نحوه شروع و توسعه چروکیدگی مورد بررسی قرار گرفت. دونالد و هشمی [۵] شبیهسازی سه بعدی بالج آزاد لوله را تحت تأثیر فشار داخلی یک واسطه سخت مورد بررسی قرار دادند و تأثیر تغییر ضریب اصطکاک بین واسطه و لوله را بر روی فرآیند آزمایش کردند.

کیم و همکاران [۶] برای پیش بینی ترکیدگی در بالج آزاد، این فرآیند را شبیه سازی کردند. آن ها به این منظور از معیار شکست نرم اویانه بر اساس تابع پتانسیل درجه دوم هیل استفاده کردند. در این مطالعه تأثیر خواص ماده در ناحیه جوش نیز در نظر گرفته شد.

سانگ و همکاران [۷] برای پیش بینی شروع گلویی شدن در فرآیند بالج از معیار سویفت و معیار شکست نرم کوکرافت و لاتهام استفاده کردند. یوشیدا و کوابارا [۸] وابستگی منحنی حد شکل دهی لولههای فولادی را به مسیر کرنش برای مسیرهای تنشی خطی و ترکیبی به وسیله یک دستگاه کشش-فشار مورد بررسی قرار دادند. جانسون و همکاران [۹] در مقالهای، همه موشهای عددی و تحلیلی به دست آوردن منحنی حد شکل دهی را مورد مطالعه قرار داده و برای یک قالب مخروطی به کار گرفتند. افتخاری شهری و همکارانش [۱۰] تأثیر ارتعاش بدنه قالب را بر روی توزیع ضخامت محصول مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ارتعاش میتواند باعث بهبود ضخامت محصول شود به شرطی که دامنه مناسبی برای ارتعاشات انتخاب شود. م. الیاسی و همکارانش [۱۱] یک قالب جدید را برای تولید قطعه پلهای طراحی کردند. با استفاده از قالب جدید یک قطعه با توزیع ضخامت یکنواخت تولید شد.

با وجود کارهای انجام شده، تحقیقات کمی بر روی منحنی حد شکل دهی لولههای آلومینیومی در فرآیند هیدروفرمینگ با در نظر گرفتن ناهمسانگردی انجام شده است. چو و ژو [۱۲] منحنی حد شکل دهی لولههای آلومینیومی را با استفاده از معیار مماسی و معیار تسلیم هیل ۴۸ به دست آوردند. هوانگ و همکارانش [۱۳] نیز با معیار مماسی و با استفاده از معیار تسلیم هیل ۷۹، حد شکل دهی لولههای آلومینیومی AA60661 را محاسبه کردند. با توجه به پژوهشهای پیشین تا به حال معیار تسلیم بارلات، که برای ورقهای SiDir

آلومینیومی نسبت به معیار هیل کارایی بالاتری دارد، برای پیشبینی حد شکلدهی در کنار معیارهای گلویی شدن و مماسی به کار گرفته نشده است. هدف این مقاله به دست آوردن منحنی حد شکلدهی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله به کمک معیارهای ناپایداری پلاستیک است. ناهمسانگردی لولهها در نظر گرفته شده و از معیار تسلیم درجه ۲ بارلات استفاده شده است. خواص مکانیکی لوله در راستای طولی و محیطی به کار گرفته شده تا بهترین انطباق با نتایج تجربی ایجاد شود. کرنشهای حدی پیشبینی شده توسط معیارهای ناپایداری به تنشهای حدی تبدیل شده و با نتایج تجربی مقایسه شدهاند. در نهایت تأثیر خواص مکانیکی بر روی کرنشهای حدی برسی شده است.

۲- خواص مکانیکی لوله

لولههای آلومینیومی مورد استفاده در این مطالعه از آلیاژ AA6063 بودهاند. قطر خارجی لوله ۴۰ میلیمتر و ضخامت آن ۱/۵ میلیمتر است. لولههای آلومینیومی بدون درز بوده و به وسیله فرآیند اکستروژن تهیه شدهاند. بعد از تولید هیچ عملیات حرارتی بر روی لولهها انجام نشده است.

برای به دست آوردن خواص مکانیکی لوله در دو راستای طولی و محیطی، نمونهها بر طبق استاندارد ASTM-E8M به وسیله برشکاری سیمی تهیه شدهاند. منحنیهای تنش- کرنش مهندسی به دست آمده در شکل ۲ نمایش داده شده است. یک نمونه کشش به وسیله برش سیمی تهیه شده قبل و بعد از کشش در شکل ۳ نشان داده شده است.



مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۲

حسن مسلمی نائینی و همکاران

پیشبینی تحلیلی کرنشها و تنشهای حدی در هیدروفرمینگ لولههای آلومینیومی ناهمسانگرد

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\overline{\varepsilon}}{2\overline{\sigma}} (2\sigma_1 - c\sigma_2) \tag{Y}$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{d\varepsilon}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_2 - c\sigma_1) \tag{(A)}$$

نمو کرنش $\, \overline{arepsilon} \, \, d \, \overline{arepsilon} \,$ از معادله (۹) به دست میآید.

$$d\overline{\varepsilon} = 2 \left[\frac{1}{4 - c^2} \left(d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + cd\varepsilon_1 d\varepsilon_2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(9)

تنش در دو راستای محیطی و محوری به ترتیب از معادلات (۱۰) و (۱۱)به ، F_{sealing} . دست میآیند که در آنها r و t شعاع و ضخامت لوله هستند. F_{sealing} نیروهای آببندی و نیروی اصطکاک لوله و قالب هستند.

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \tag{1.}$$

$$\sigma_2 = \frac{\pi p r^2 - F_{\text{axial}} - F_{\text{sealing}} + F_{\text{friction}}}{2\pi r t} \tag{11}$$

نسبت کرنشها (eta) و نسبت تنشها (lpha)که با معادلات (۱۲) تعریف می شوند.

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad , \quad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{11}$$

۳-۱- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلویی شدگی موضعی (هیل)

بر اساس معیار گلوییشدگی موضعی هیل [۱۵]، ناپایداری پلاستیک زمانی رخ میدهد که شرایط زیر برقرار باشد: (۱۳) با فرض اینکه نسبت تنشها در محل گلوییشدگی ثابت میماند، معادله بالا

به حالت زیر تبدیل می شود: $d\sigma_2 = \sigma_2(d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2)$ (۱۴) (۱۴)

با استفاده از معادله (۷) و (۸) و همچنین معادلات (۱۳) و (۱۴)، تغییرات تنشهای اصلی در ناحیه گلوییشدگی مطابق معادلات (۱۵) و (۱۶) به دست میآید.

$$d\sigma_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left(\frac{(2-c)(1+\alpha)}{2}\right) \sigma_1^2 \tag{14}$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\varepsilon}{\overline{\sigma}} \left(\frac{\alpha(2-\varepsilon)(1+\alpha)}{2}\right) \sigma_1^2 \tag{19}$$

بر اساس معادله (۳) و معادلات (۱۵) و (۱۶) تغییرات تنش مؤثر بر طبق معادله (۱۷) حاصل می شود.

$$d\overline{\sigma} = \overline{\sigma}d\overline{\varepsilon} \left[\frac{(2-c)(1+\alpha)}{2(1+\alpha^2-c\alpha)^{0.5}} \right]$$
(1V)

در ازمایش کشش تکمحوری، گلویی شدن زمانی رخ میدهد که معادله (۱۸) برقرار باشد.

معنای فیزیکی این معیار در شکل ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده $\overline{\sigma}_{
m Neck}$ است. در واقع با افزایش مقدار Z، کرنش گلویی نیز بیشتر میشود. $\overline{\sigma}_{
m Neck}$ تنش گلویی و $\overline{e}_{
m Neck}$ کرنش گلویی هستند.

معیار مماسی بر اساس گلویی شدن هیل (Z_L)با توجه به معادله (۲۰) محاسبه میشود.



شکل ۳ نمونه آزمایش کشش تکمحوری

جدول ۱ خواص مکانیکی لوله					
ضريب	ضريب	ضريب استحكام	خاصيت مكانيكي		
ناهمسانگردی <i>R</i>	کارسختی n	(MPa) K	(یکا)		
٠/۴	٠/٣٣۴	YQA/Y	مقدار		

خواص مکانیکی لوله مورد آزمایش بر اساس مدل توانی نشان داده شده در معادله (۱) که از میانگین گرفتن بین دو راستای طولی و محیطی به دست آمده، در جدول ۱ نشان داده شده است. K ضریب استحکام و n ضریب کارسختی است. ضریب ناهمسانگردی ماده بر طبق معادله (۲) به دست می آید که W^3 و t^3 کرنش در راستاهای عرضی و ضخامتی نمونه کشش هستند.

$$\overline{r} = K\overline{\varepsilon}^n \tag{1}$$

$$R = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_t} \tag{(Y)}$$

۳–محاسبه تحلیلی منحنی حد شکل دهی در فر آیند هیدرو-فرمینگ لوله در محاسبه تحلیلی،یک لوله جدار نازک تحت فرآیند بالج آزاد در نظر گرفته می شود. لوله تحت فشار داخلی p و نیروی محوری F_{axial} قرار دارد که در دو انتها بسته شده است. با توجه به ضخامت پایین لوله نسبت به ابعاد دیگر آن، از تنش در راستای ضخامت صرف نظر شده و حالت تنش صفحه ای در نظر گرفته می شود. معیار تسلیم غیر درجه ۲ ناهمسانگرد بارلات و لاین [۱۴] بر حسب مولفه های اصلی تنش به صورت معادله (۳) بیان می شود.

$$\left|\sigma_{1}\right|^{a}+\left|u\sigma_{2}\right|^{a}+\frac{c}{2-c}\left|\sigma_{1}-u\sigma_{2}\right|^{a}=\frac{2}{2-c}\overline{\sigma}^{a}$$
(7)

که در آن σ_1 تنش در راستای محیطی و σ_2 تنش در راستای محوری و $\overline{\sigma}$ تنش مؤثر هستند. a توان معیار تسلیم است که به شکل سطح تسلیم بستگی دارد. c u و u به ترتیب با معادلات (۴) و (۵) تعریف میشود.

$$c = 2\sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \tag{(f)}$$

$$u = \sqrt{\frac{R_0}{1 + R_0} \frac{1 + R_{90}}{R_{90}}} \tag{(\Delta)}$$

R ضریب ناهمسانگردی در هر راستا است. قانون جریان وابسته مطابق معادله (۶) تعریف می شود که در آن *d A* ضریب پلاستیک و *f* پتانسیل پلاستیک است که با استفاده از معیار تسلیم تعریف می شود.

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \tag{(5)}$$

 $_1^3$ ، $_2^3$ و $_3^3$ بترتیب کرنش در راستای محیطی، کرنش در راستای محوری و کیش در راستای محوری و معیار کرنش در راستای ضخامتی می باشند. در اینجا با استفاده از قانون جریان و معیار تسلیم بارلات معادلات (۷) و (۸) حاصل می شوند. برای به دست آوردن معادلات (۷) و (۸) تغییر شکل ورق در حالت ناهمسانگردی صفحهای ($R_0 = R_{90}$) فرض شده و توان سطح تسلیم ($R_0 = R_{90}$) برابر با دو در نظر گرفته شده است.

www.SID.ir

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۲

حسن مسلمی نائینی و همکاران Archive of SID



$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\overline{\sigma}} \frac{d\overline{\sigma}}{d\overline{\varepsilon}} \leq \frac{(2 - c)(1 + \alpha)}{2(1 + \alpha^2 - c\alpha)^{0.5}}$$

$$(\Upsilon \cdot)$$

۳-۲- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلوییشدگی برای لولهها (سویفت برای لولهها)

بر اساس این معیار [۱۶]، ناپایداری پلاستیک زمانی رخ میدهد که شرایط معادلات (۲۱) و (۲۲) به طور همزمان رخ دهد.

$$dp = 0 \tag{(1)}$$

$$dF_{\text{axial}} = 0 \tag{(YY)}$$

در واقع بر اساس این معیار هنگامی که مقدار فشار داخلی و نیروی محوری بیشینه شوند، گلویی رخ میدهد.

p مقدار فشار داخلی p از معادله (۱۰) به دست میآید. با قرار دادن p در معادله (۲۲) به دست میآید که در نهایت با تبدیل تغییر شکلها به کرنش، معادله (۲۴) به دست خواهد آمد.

$$dp = d\sigma_1 \frac{t}{r} + \sigma_1 \frac{dt}{r} - \sigma_1 \frac{tdr}{r^2}$$
(11)

$$d\sigma_1 = \sigma_1(2d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2) \tag{(14)}$$

مقدار F_{axial} از معادله ۱۱ به دست می آید که با قرار دادن آن در معادله (۲۲) و فرض صفر بودن نیروی آب بندی و نیروی اصطکاک و استفاده از معادله (۲۲) و مشتق گیری جزئی، معادله (۲۲) به دست می آید:

$$-2\sigma_2 t dr - 2r \sigma_2 dt - 2r t d\sigma_2 + 2r dr p + r^2 dp = 0$$
(Ya)

$$d\sigma_2 = \frac{-2drt\sigma_2}{2rt} - \frac{2r\sigma_2dt}{2rt} + \frac{2rpdr}{2rt}$$
(79)

$$d\sigma_2 = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 \tag{YY}$$

با استفاده از معادلات (۷) و (۸) تغییرات تنشهای اصلی با معادلات (۲۸) و (۲۹)به دست میآیند.

$$d\sigma_1 = \frac{d\overline{\varepsilon}}{\overline{\sigma}} \left(\frac{(4 - 2c\alpha + 2\alpha - c)}{2} \right) \sigma_1^2 \tag{YA}$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\varepsilon}{\bar{\sigma}} \left(\frac{(2 - 2c\alpha + 2\alpha^2)}{2}\right) \sigma_1^2 \tag{19}$$

حال با توجه به معادله (۳) تغییرات تنش مؤثر از معادله (۳۰) به دست خواهد آمد.

$$d\overline{\sigma} = \frac{\overline{\sigma} d\overline{c}}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (4\alpha^3 c^2 - (4\alpha^2 c^3 + 4\alpha^2 - 12\alpha^3 c + 14\alpha^2 c^2) - 2\alpha c^3 - 16\alpha^2 c + 16\alpha c^2 + 12\alpha^2 - 32\alpha c + 3c^2 + 16\alpha - 16c + 20)^{0.5}$$
(7.)

مطابق معادله (۳۱)به دست میآید.

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\overline{\sigma}} \frac{d\overline{\sigma}}{d\overline{\varepsilon}} \leq \frac{1}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (4\alpha^3 c^2) -4\alpha^2 c^3 + 4\alpha^2 - 12\alpha^3 c + 14\alpha^2 c^2 -2\alpha c^3 - 16\alpha^2 c + 16\alpha c^2 + 12\alpha^2 -32\alpha c + 3c^2 + 16\alpha - 16c + 20)^{0.5}$$
(71)

۳-۳- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلوییشدگی برای ورقها (سویفت برای ورقها)

بر اساس معیار گلوییشدگی برای ورقها، وقتی نیرو در جهتهای اصلی به بیشینه برسد، ناپایداری پلاستیک رخ میدهد [۱۶]. این شرایط در معادلات (۳۲) و (۳۳) نشان داده شده است.

$$dF_1 = 0 \tag{(YY)}$$

$$ar_2 = 0$$
 (11)

براییک لوله در قرآیند هیدروفرمینک بیروهای اصلی محیطی و طولی به
ترتیب با معادلات (۳۴) و (۳۵)به دست میآید که در آن
$$l$$
 طول لوله است.
 $F_1 = \pi r^2 p - F_{axial} + F_{sealing} + F_{friction}$ (۳۴)

$$F_2 = prl$$
 (ra)

از طرف دیگر نیروهای F_1 و F_2 با استفاده از معادلات (۳۶) و (۳۷)به دست میآیند که A_1 و A_2 سطح مقطع در راستاهای طولی و محیطی لوله هستند.

$$dF_1 = d(\sigma_1 A_1) = d\sigma_1 A_1 + \sigma_1 dA_1 = 0 \tag{(77)}$$

$$dF_2 = d(\sigma_2 A_2) = d\sigma_2 A_2 + \sigma_2 dA_2 = 0 \tag{(TV)}$$

با توجه به ثابت بودن حجم ماده معادله (۳۸) برقرار است.

$$-\left(\frac{dA}{A}\right) = \left(\frac{dI}{I}\right) = d\varepsilon_1 \tag{(7.4)}$$

با استفاده از معادلات بالا دو شرط لازم مطابق معادلات (۳۹) و (۴۰) حاصل

مى شود.
$$d\sigma_1 = \sigma_1 d\varepsilon_1 \tag{179} \\ d\sigma_2 = \sigma_2 d\varepsilon_2 \tag{4.1}$$

همانند معیارهای بالا و با استفاده از معادلات (۷) و (۸)، تغییرات تنشهای اصلی مطابق معادلات (۴۱) و (۴۲) و تنش مؤثر از معادله (۴۳) به دست میآید.

$$d\sigma_1 = \frac{d\overline{\varepsilon}}{\overline{\sigma}} \left(\frac{2-c\alpha}{2}\right) \sigma_1^2 \tag{f1}$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\overline{\varepsilon}}{\overline{\sigma}} \left(\frac{\alpha(\alpha-c)}{2}\right) \sigma_1^2 \tag{ft}$$

$$d\sigma = \frac{1}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} \times (\alpha^3 c^2) \\ -\alpha^2 c^3 + \alpha^4 - 2\alpha^3 c + 2\alpha^2 c^2 \\ -2\alpha^2 c^2 + 2\alpha c^2 - 4\alpha c + 4)^{0.5}$$
(fr)

معیار مماسی بر اساس ناپایداری پلاستیک برای ورقها (
$$Z_S$$
) از معادله (۴۴)
به دست میآید.

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\overline{\sigma}} \frac{d\overline{\sigma}}{d\overline{\varepsilon}} \leq \frac{1}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (\alpha^3 c^2 - \alpha^2 c^3 + \alpha^4 - 2\alpha^3 c + 2\alpha^2 c^2 - 2\alpha^2 c^2 - 4\alpha c + 4)^{0.5}$$
(ff)

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۲

حسن مسلمی نائینی و همکاران ArChive of SID

الب عل هروی روغن هروی الب عل هروی الب علی الب

شکل ۵ شکل دستگاه بالج آزاد لوله



فشارسنج دیجیتال شکل ۶ ابزارهای اندازه گیری فشار و تغذیه محوری



۴- بخش تجربی

به منظور انجام بالج آزاد لولههای آلومینیومی تحت منحنیهای بارگذاری مختلف و به دست آوردن حداکثر ارتفاع بالج و منحنی حد شکلدهی و پارگی، یک دستگاه با قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیه محوری در دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد. دستگاه مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است.

فشار داخلی به وسیله فشارسنج و تغذیه محوری به وسیله یک LVDT اندازه گیری می شود. دو قطعه مذکور در شکل ۶ نمایش داده شدهاند. تغذیه محوری توسط جکهای هیدرولیکی در دو طرف انجام می شود. برای اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری از دو پمپ هیدرولیکی استفاده شده است.

برای به دست آوردن نقاط منحنی حد شکل دهی باید حالتهای مختلف بارگذاری ترکیبی از فشار داخلی و تغذیه محوری روی لوله اعمال شود. به این منظور از منحنی بارگذاری فشار و تغذیه محوری خطی استفاده شده است. هشت منحنی بارگذاری به کار گرفته شده، در شکل ۷ نمایش داده شدهاند.

بارگذاری به صورت پلهای اعمال شده است. یعنی ابتدا فشار داخلی افزایش یافته و سپس تغذیه محوری اعمال شده است، تا ترکیدگی در لوله ایجاد شود. در این مورد پلههای افزایش فشار داخلی ۰/۵ مگاپاسکال و پله افزایش تغذیه محوری

۳-۴- به دست آوردن کرنشهای حدی

برای به دست آوردن کرنشهای حدی ($\epsilon_1^{2} e = \epsilon_2^{2}$) در فرآیند هیدرو-فرمینگ لوله، از معیارهای ناپایداری پلاستیکی بالا استفاده شد. با استفاده از مدل کارسختی توانی ($\overline{\sigma} = K\overline{\epsilon}^{n}$) هر کدام از معادلات (۲۰)، (۳۱) و (۴۴) را میتوان به صورت معادله (۴۵) نوشت.

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{\overline{\sigma}} \frac{d\overline{\sigma}}{d\overline{\varepsilon}} = \frac{n}{\overline{\varepsilon}} = \frac{\xi_i}{\phi_i} \tag{(6a)}$$

که در آن *ξ_i و φ* توابعی بر حسب نسبت تنشها (α) و ضریب ناهمسانگردی صفحهای (*R*) هستند. با فرض خطی بودن نسبت کرنشها، کرنش مؤثر از معادله (۴۶) به دست میآید.

$$d\overline{\varepsilon} = 2 \left[\frac{1}{4c^2} \left(d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + cd\varepsilon_1 d\varepsilon_2 \right) \right]^{1/2} = \Psi \varepsilon_1$$
(*?)

$$\Psi = 2 \left[\frac{1}{4 - c^2} \left(1 + \beta^2 + c\beta \right) \right]^{7/2}$$
(FY)

$$\alpha = \frac{2\rho + c}{2 + 2c\beta} \tag{(f.)}$$

با توجه به معادلات (۴۵)، (۴۶) و (۴۸)، کرنشهای حدی طبق معادلات (۴۹) و (۵۰) به دست می آیند.

$$\varepsilon_1^{\ c} = \frac{\phi_i n}{\xi_i \psi} \tag{(fq)}$$

$$\varepsilon_2^{\ c} = \beta \varepsilon_1^{\ c} \tag{(\Delta)}$$

برای به دست آوردن منحنی حد شکل دهی بر اساس هر معیار ناپایداری مقادیر n و R از آزمایش کشش به دست میآیند و یک مقدار اولیه برای β در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از معادله (۴۸) مقدار α به دست میآید. با داشتن α ، مقدار i^{2} و f برای هر معیار با استفاده از معادلات میآید. با داشتن α ، مقدار i^{2} و f برای هر معیار با استفاده از معادلات معادله (۲۰)، (۳۱) و (۴۹) به دست خواهند آمد. سپس با قرار دادن این مقدار کرنش معادله (۴۹) و همچنین به دست آوردن ψ از معادله (۴۷)، مقدار کرنش حدی c^{2} محاسبه می شود. با استفاده از این مقدار c^{2} ، مقدار کرنش معادله (۴۹) و همچنین به دست آوردن ψ از معادله (۲۰)، مقدار کرنش مقدار c^{2} محاسبه می شود. با استفاده از این مقدار c^{2} ، مقدار منحنی حدی c^{2} محاسبه می شود. با استفاده از این مقدار منعیار مقدار منحنی مدر حدی c^{2} محاسبه می شود. با استفاده از این مقدار معادله در معدار کرنش مقدار c^{2} محاسبه می شود. با استفاده از این مقدار منع معادله مقدار منحنی مقدار معادله معادله (۲۰)، مقدار معادله معادله (۲۰)، مقدار معادله می شود. معار با استفاده از این مقدار معادله معدار منع معادله معادله معادله معادله (۲۰) و معادله (۵۰) معادله از معادله (۲۰) معادله می شود. ما معادله از معادله (۲۰) معادله معادله از منحنی معدار حدی معدار معادله (۲۰) معادله می شود. معار معادله از منحنی معدار معدار معدار معدار معادله منحنی معدار شکل دهی به دست می آید. حال با تغییر مقدار β ، دیگر نقاط منحنی نیز محاسبه خواهند شد.

۳-۵- به دست آوردن تنشهای حدی

به دلیل اینکه برای به دست آوردن کرنشهای حدی، فرض می شود که نسبت کرنش مقدار ثابتی است، منحنی حد شکل دهی وابسته به مسیر تغییر شکل است. اگر نقاط منحنی حد شکل دهی که بر حسب کرنشهای حدی هستند به تنشهای معادل آن بر طبق سطح تسلیم تبدیل شود، منحنی جدید تنشهای حدی (σ_1^c و σ_2^c) را معرفی می کند. این منحنی دیگر به مسیر تغییر شکل وابسته نیست و می تواند برای هر حالت به کار رود.

در اینجا با در نظر گرفتن ناهمسانگردی و سطح تسلیم بارلات و با استفاده از معیارهای ناپایداری معرفی شده، تنشهای حدی با استفاده از معادلات (۵۱) و (۵۲)به دست میآیند.

$$\sigma_1^{\ c} = \frac{2}{4c^2} \{ K(\Psi \varepsilon_1^{\ c})^{n1} \} \Big[c \varepsilon_2^{\ c} + 2\varepsilon_1^{\ c} \Big]$$
(21)

$$\sigma_2^{\ c} = \frac{2}{4c^2} \{ K(\Psi \varepsilon_1^{\ c})^{n1} \} \left[c \varepsilon_1^{\ c} + 2 \varepsilon_2^{\ c} \right] \tag{\Delta7}$$

www.SID.ir مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱۶، شما*ر*ه ۲

۰/۳ میلیمتر بوده است. نمونهای از منحنیهای بارگذاری اعمال شده بر روی لوله با منحنی مورد نظر در شکل ۸ مقایسه شده است.

برای اندازه گیری کرنش ها در کار تجربی نیز یک طرح شبکهای دایرهای منظم با قطر دو میلیمتر بر روی نمونه ها حک شد. برای حک این دایرهها از دستگاه حک الکتروشیمیایی، که در شکل ۹ نشان داده شده، استفاده شده است.

پس از انجام آزمایش بالج، تغییر شکل با اندازه گیری قطر دایرهها در راستای طولی و محیطی لوله کرنشها به دست آمدند. دایرههای حک شده بر روی لولهها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای به دست آوردن کرنشهای حدی ابتدا لولهها حکاکی شده و سپس تحت بارگذاری قرار می گیرند. بارگذاری زمانی متوقف می شود که ترکیدگی در لوله رخ داده باشد. پس از ترکیدگی اندازه دایرههای حکاکی شده بر روی لوله در محل نزدیک به ترکیدگی اندازه گیری می شود و با توجه تغییر قطر دایرهها در دو راستای محیطی و طولی لوله، کرنشهای حدی محاسبه می شوند. اندازه گیری قطرها با استفاده از خطکش میلر انجام شده که دقت اندازه گیری با آن در حدود ۲۰/۲ میلی متر است. خطکش میلر طلق شفافی است که خطوط تیرهرنگ با اندازههای مختلف روی آن چاپ شده است.



شکل ۸ مقایسه منحنی بارگذاری مورد نظر و منحنی اعمالی به لوله



شکل ۹ دستگاه حک الکتروشیمیایی



شکل ۱۰ دایرههای حک شده بر روی لوله



شکل ۱۱ منحنیهای حد شکلدهی پیش بینی شده به وسیله معیارهای ناپایداری یلاستیک



شکل ۱۲ تغییر قطر دایرهای حک شده بر روی لوله

۵- نتايج

۵-۱- کرنشها و تنشهای حدی برای لولههای آلومینیومی

با استفاده معیارهای ناپایداری معرفی شده در بخش ۳، منحنیهای حد شکلدهی کرنشی و تنشی به دست آمدند. منحنیهای حد شکلدهی بر اساس خواص مکانیکی،که در جدول ۱ آمده است، محاسبه شدهاند.

منحنیهای حد شکل دهی کرنشی بر اساس سه معیار ناپایداری در شکل ۱۱ نشان داده شدهاند و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفتهاند. همان طور که مشخص است معیار ناپایداری سویفت برای لولهها بهترین تطابق را با نتایج تجربی نشان میدهد. در مقادیر منفی کرنش فرعی، نتایج دو معیار هیل و سویفت برای لولهها خیلی نزدیک به هم است. اما پیش بینی معیار ناپایداری سویفت برای ورقها خیلی بالاتر از نتایج تجربی است و اختلاف زیادی را نشان میدهد. دو معیار گلویی سویفت برای ورقها و هیل برای پیش بینی ناپایداری در ورقی که ابتدا شکل صفحهای را دارد، توسعه داده شدهاند؛ در نتیجه پیش بینی آنها برای ترکیدگی لوله که در ابتدا حالت خمیده دارد، اختلاف بیشتری با نتایج تجربی خواهد داشت.

بر اساس نوع منحنیهای بارگذاری اعمال شده، نباید کرنش فرعی مثبت و بزرگی در لوله ایجاد شود؛ زیرا لوله در بیشتر موارد، به غیر از تغذیه محوری صفر، در راستای محوری تحت فشار قرار دارد. ولی معیار سویفت برای ورقها، کرنشهای مثبت فرعی بزرگی را پیشبینی کرده که غیر واقعی مینماید. سه نمونه از لولههایی که تحت منحنیهای بارگذاری نشان داده شده در شکل ۷ SID

قرار گرفته و دچار ترکیدگی شدهاند، در شکل ۱۲ دیده میشود. مشاهده می شود که با افزایش تغذیه محوری شکل پذیری بیشتر شده و ارتفاع بالج افزايش مىيابد.

تنشهای حدی به دست آمده به وسیله پیشبینی سه معیار ناپایداری در شکل ۱۳ با نتایج تجربی، همراه با سطح تسلیم ماده، مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود پیش بینی همه معیارهای ناپایداری تقریباً بالاتر از نتایج تجربی است. فقط در تنشهای فرعی مثبت زیادتر، کمی انطباق بین نتایج پیش بینی دو معیار سویفت برای لولهها و هیل با نتایج تجربی وجود دارد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، نقاط تنش تجربى پراكنده هستند و نظم خاص ندارند. اين اختلاف، بيشتر بين نقاط قرار گرفته در سمت چپ و راست محور تنش فرعی صفر وجود دارد. در سمت چپ این محور تنش فرعی از نوع فشاری است و ممکن است رفتار ماده بر اساس مدل کارسختی همسانگرد نباشد و این موضوع باعث اختلاف در نتایج شود. همچنین برای محاسبه خواص مکانیکی ماده،از آزمایش کشش تکمحوری استفاده شده است؛ در حالی که ماهیت فرآیند صفحهای است و بهتر است برای محاسبه خواص از کشش دو محوره استفاده شود.

۵-۲- پیش بینی ارتفاع بالج

با استفاده از کرنشهای حدی پیشبینی شده در راستای محیطی توسط سه معیار ناپایداری، ارتفاع بالج لولهها در زمان ترکیدگی محاسبه شد و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. کرنش اصلی در بالج آزاد، کرنش در راستای محیطی لوله است که به وسیله معادله (۴۲) به دست می آید:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \ln(\frac{d - d_0}{d_0}) = \ln(\frac{h}{r_0}) \tag{(57)}$$

در این معادله r_0 و d_0 به ترتیب شعاع و قطر اولیه لوله هستند. h ارتفاع بالج لوله در لحظه ترکیدگی و d قطر لوله در آن لحظه است. با قرار دادن کرنشهای حدی پیشبینی شده در معادله ۵۳، ارتفاع بالج در حالتهای مختلف بارگذاری به دست میآید. نحوه اندازه گیری ارتفاع بالج (h) در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



h d_0 **شکل ۱۴** اندازهگیری ارتفاع بالج

www.SID.ir مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۲

ارتفاع بالج پیشبینی شده توسط سه معیار ناپایداری در شکل ۱۵ با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل مشاهده میشود، معیار ناپایداری سویفت برای ورقها، پیشبینی خیلی بالایی برای ارتفاع بالج دارد. اما نتایج دو معیار هیل و سویفت برای لولهها به نتایج تجربی نزدیکتر است که هر چقدر مقدار کرنش فرعی منفیتر میشود، معیار هیل پیشبینی بهتری دارد.

۵-۳- تأثیر ضریب کارسختی بر کرنشهای حدی

در این بخش به منظور بررسی تأثیر ضریب کارسختی (n) ماده بر روی کرنشهای حدی پیشبینی شده به وسیله معیارهای مختلف، سه مقدار ۰/۱۵، ۲۳۳۴ و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۵ مقایسه ارتفاع بالج پیشبینی شده توسط معیارهای ناپایداری با نتایج تجربی



شکل ۱۶ تأثیر ضریب کارسختی بر روی کرنشهای حدی پیشیینی شده به وسیله معیار هیل







منحنیهای حد شکل دهی پیش بینی شده با سه ضریب کار سختی مختلف در شکلهای ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. ضریب ناهمسانگردی در همه حالتها برابر ۰/۴ است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضریب کار سختی کرنش های حدی افزایش یافته و منحنی حد شکل دهی بالاتر می رود. هر چقدر ضریب کار سختی زیادتر شود، مقدار افزایش طول یکنواخت اصلی بالاتر می رود. با توجه به نتایج مشخص می شود که افزایش ضریب استحکام، بیشترین تأثیر را بر روی پیش بینی معیار سویفت برای ورق ها داشته و منحنی حد شکل دهی مربوط به این معیار خیلی بالاتر رفته است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، پیشبینی کرنشها و تنشهای حدی در هیدروفرمینگ به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- معیار ناپایداری سویفت برای لولهها بهترین پیش بینی را برای کرنشهای حدی دارد. پیش بینی معیار سویفت برای ورقها اختلاف زیادی با نتایج تجربی را دارا است.

۲- تنشهای حدی پیشبینی شده به وسیله معیارهای ناپایداری، با نتایج تجربی اختلاف دارد و فقط در بعضی حالتها، معیار هیل پیشبینی نزدیکتری به نتایج تجربی را دارد.

۳- مقدار ارتفاع بالج لوله با تبدیل کرنش حدی اصلی به دست میآید و معیار هیل بهترین پیشبینی را برای ارتفاع بالج لوله دارد.

با افزایش ضریب کارسختی ماده، کرنش حدی بیشتر شده و منحنی حد شکلدهی بالاتر میرود.

۷- فهرست علائم

a توان معيار تسليم (-)

- (N) نیروی محوری (N)
- (MPa) ضريب استحكام (MPa)
- n ضریب کارسختی (-)
 - p فشار داخلی (MPa)
- (-) ضریب ناهمسانگردی (-) *م*ریب ا
 - (mm) شعاع لوله (r
 - (mm) ضخامت لوله (t

علايم يونانى نسبت کرنشها (-) β نسبت تنشها (-) α تنش مؤثر (MPa) $\overline{\sigma}$ كرنش مؤثر (-) $\overline{\varepsilon}$ تنش در راستای محیطی (MPa) σ_1 تنش در راستای محوری (MPa) σ_2 ضريب پلاستيک λ تابع يتانسيل يلاستيك f کرنش در راستای محیطی (-) *E*1

(-) کرنش در راستای محوری ${\mathcal E}_2$

*E*3 کرنش در راستای ضخامتی (-)

۸- مراجع

- M. Ahmed, M.S.J. Hashmi, Estimation of machineparameters for hydraulicbulgeforming of tubularcomponents, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 9–23, 1997.
- [2] T.Sokolowski, K.Gerke, M.Ahmetoglu, T.Altan, Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 34-40, 2000.
- [3] Y.Hwang, Y.Lin, Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125–126, No. 1, pp. 821–825, 2002.
- [4] H L. Xing, A. Makinouchi, Numerical analysis and design for tubular hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009-1026, 2001.
- [5] B.J.Mac Donald, M.S.J.Hashmi, Three-dimensional finite element simulation of bulge forming using a solid bulging medium, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, No. 2, pp. 107-116, 2001.
- [6] J. Kim, Y. Kim, B. Kang, S. Hwang, Finite element analysis for bursting failure prediction in bulge forming of a seamed tube, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 9, pp. 953–966, 2004.
- [7] W. Song, S. Kim, J. Kim, B. Kang, Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164–165, pp. 1618–1623, 2005.
- [8] K. Yoshida, T. Kuwabara, Effect of strain hardening behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths, *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, No. 7, pp. 1260–1284, 2007.
- [9] M. Jansson, L. Nilsson, K. Simonsson, On strain localisation in tube hydroforming of aluminium extrusions, *Journal of materials processing technology*, Vol. 195, No. 1, pp. 3–14, 2008.
- [10] S.E., Eftekhari Shahri, S.Y. Ahmadi Brooghani,K. Khalili,B. S. Kang, Ultrasonic tube hydreforming a numerical andanalytical study, *Journal* of Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 46-59,2013 (in Persian).
- [11] M. Elyasi, Z. P.oghipour, M. Bakhshi, A. H. Gorji, Analysis of Geometry and Thickness Distribution in a New Hydroforming Die for Cylindrical Stepped Tubes", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol.2, pp. 47-57,2010 (in Persian).
- [12] Chu, E., and Yu Xu, Influences of generalized loading parameters on FLD predictions for aluminum tube hydroforming." *Journal of materials* processing technology, Vol. 196, No. 1 pp. 1-9, 2008.
- [13] Hwang, Yeong-Maw, Yi-Kai Lin, and Han-Chieh Chuang. Forming limit diagrams of tubular materials by bulge tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No.11, pp. 5024-5034, 2009.
- [14] F. Barlat, J. Lian, Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I. A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions, *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-66, 1989.
- [15] R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, New York, Oxford University Press, 1983.
- [16] H.W. Swift, Plastic instability under plane stress, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, No. 1, pp. 1–18, 1952.