ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

2024 equivati

تعیین تجربی و پیشبینی منحنیهای حد شکلدهی گلویی و شکست ورق آلومینیوم 2024 با استفاده از معیار آسیب

على زاهدى¹، بيژن ملائى داريانى^{2*}، محمدجواد ميرنيا³

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
 * تهران، صندوق پستی 4413-1587، 15875

چکیدہ	اطلاعات مقاله
منحنیهای حد شکلدهی ورق از ابزارهای مفید در بررسی شکلپذیری ورق بهمنظور طراحی محصولات صنعتی به شمار میرود. برای تعیین این منحنیها روشها و دستورالعملهایی در قالب آزمایشهای تجربی تدوین و ارائه شده است. هزینهبر و زمان بر بودن انجام این آزمایشهای تجربی باعث شده است تا پژوهشهای متعددی در استفاده از روشهای تحلیلی و نرمافزارهای المان محدود در تعیین این منحنیها صورت	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 29 تیر 1396 پذیرش: 14 مرداد 1396 ارائه در سایت: 17 شهریور 1396
بگیرد. در تحقیق حاضر، منحنیهای حد شکل دهی گلویی و حد شکست ورقهای آلومینیوم آلیاژی 2024 با استفاده از روش اتساع نیم کروی به صورت تجربی و عددی به دست آمده است. برای این منظور هندسههای متفاوتی از ورق فلزی برای ایجاد مسیر کرنشهای مختلف به کار گرفته شده است. برای شبیهسازی آزمایشهای تجربی، از حل گر صریح نرمافزار تحلیلی آباکوس استفاده گردید. با استفاده از روابط تئوری و آزمایشهای تجربی، خواص شکست ورق آلومینیومی برحسب کرنش شکست، تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود تعیین و به نرمافزار معرفی شد. با استفاده از مدل آسیب نرم، کرنشهای حد شکل دهی شکست توسط مدل عددی صحهگذاری شده، استخراج گردید. برای تعیین کرنشهای حد شکل دهی گلویی از روشی براساس تغییرات کرنش بیشینه در ناحیه گلویی شدن، بهره گرفته شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان میدهد که مدل عددی به کار گرفته شده، میتواند با بیشترین خطایی حدود 6% کرنشهای حد شکل دهی گلویی و شکست ورق	<i>کلید واژگان:</i> شکلپذیری ورق منحنی حد شکلدهی المان محدود میار آسیب
آلومينيومي 2024 را پيش بيني نمايد.	

Experimental Determination and Numerical Prediction of Necking and Fracture Forming Limit Curves of 2024 Aluminum Alloy Sheet Using Damage Criterion

Ali Zahedi¹, Bijan Mollaei-Dariani^{1*}, Mohammad Javad Mirnia²

1- Department of Mechanical Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, dariani@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT Forming limit diagram (FLD) is one of the useful tools in the assessment of the sheet formability for Original Research Paper Received 20 July 2017 designing industrial products. Experimental methods have been developed to determine FLDs. Costly Accepted 05 August 2017 and time-consuming experiments have led to several studies on the use of analytical methods and finite Available Online 08 September 2017 element software for predicting FLDs. In the present study, the necking and fracture forming limit curves of AA2024 aluminum alloy sheet were experimentally and numerically obtained through the Keywords: hemispherical stretching test. Different geometries of the initial blank were considered to create Sheet formability Forming Limit Diagram different strain paths. The commercial finite element code Abaqus/Explicit was utilized to simulate Finite Element experimental tests. Using theoretical equations and experimental results, fracture properties of the Damage Criterion aluminum sheet in terms of the equivalent plastic strain at fracture, the stress triaxiality and the Lode angle parameter were captured and implemented in the Abaqus software. In order to capture necking forming limit strains, a numerical criterion based on the major strain variation in the necking zone has been considered. Comparison of the results shows that the numerical model can predict the forming and fracture limit strains with the maximum error of about 6%.

1- مقدمه

کرنش کمینه^۲) را که ورق میتواند تا آستانه گلویی شدن موضعی و شکست تحمل کند، نشان میدهد. ترکیب کرنشهایی را که ورق فلزی قبل از گلویی شدن موضعی تحمل میکند، منحنی حد شکلدهی گلویی (NFLC³) و

برای پیش.بینی حد شکلدهی یک ورق فلزی بهطور سنتی از نمودار حد شکلدهی استفاده میشود. این نمودار، ترکیب کرنش.هایی (کرنش بیشینه[،] و

Recking Forming Emilt Curve

Please cite this article using:

¹ Major Strain

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. J. Mirnia, Experimental Determination and Numerical Prediction of Necking and Fracture Forming Limit Curves of 2024 Aluminum Alloy Sheet Using Damage Criterion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

 ² Minor Strain
 ³ Necking Forming Limit Curve

تركيب كرنشهايي را كه ورق فلزى قبل از شكست تحمل مىكند، منحنى حد شکلدهی شکست (FFLC¹) گویند. درواقع منحنی حد شکلدهی، میزان حداکثر کرنشهای حدی را در بارگذاریهای مختلف نشان میدهد. نظریه نمودار حد شکل دهی برای اولین بار توسط کیلر [1] و گودوین [2] در سال 1968 مطرح شد، مارسینیاک و کوزینسکی این نظریه را بسط دادند و مدلی را بنا نهادند كه قادر بود گلويي شدن موضعي را پيشبيني كند [4,3]. آنها به این نتیجه رسیدند که شکست در ورق بهطور ناگهانی اتفاق نمی افتد بلکه غیریکنواختی و ناهمگنی در ریزدانههای تشکیل دهنده ماده، سبب ایجاد باریک شدگی موضعی و درنهایت شکست می شود. این ناهمگنی به صورت یک شیار فرض میشود که سطح ورق را به دو قسمت همگن و ناهمگن تقسیم می کند. لازم است که منحنیهای حد شکل دهی فلزات و آلیاژهایی که در صنعت شکلدهی کاربرد دارند، با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف تعیین شود. آلیاژهای آلومینیوم بهواسطه شکلپذیری خوب در عین داشتن استحکام مکانیکی بالا، چگالی کم، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا و مقاومت نسبتاً بالا به خوردگی از دسته آلیاژهای پرکاربرد و موردتوجه صنعت شکلدهی میباشند. تعیین و تحلیل شکلپذیری ورقهای آلومینیومی میتواند در طراحی محصول و فرایند تولیدی کمک شایانی به مهندسین نماید.

تعیین تجربی منحنیهای NFLC فرایندی زمانبر بوده و نیاز به تجهیزات خاص خود دارد که ممکن است همیشه در دسترس مهندسین و محققین نباشد. از طرفی دیگر، در کنار هزینه پایین روش عددی، میتوان از آن بهعنوان ابزاری سودمند در تحلیل فرایندهای مختلف از جمله در حوزه تحلیل تنش و کرنش بهرهمند شد. ازاینرو محققین در سالهای اخیر روشهای عددی متفاوتی را بهمنظور پیشبینی حد شکلدهی ورق فلزی توسعه دادهاند. سيتو (2006) [5] براي اولين بار با استفاده از مشتق دوم کرنش بیشینه و استفاده از تاریخچه کرنشهای نزدیک محل گلویی شدن ورق، منحنی حد شکلدهی را به روش تجربی و عددی تعیین کرد. در این راستا، روشهای مختلف عددی با استفاده از نرمافزارهای المان محدود ارائه شد. ژانگ و همکاران (2011) [6] با استفاده از معیارهای مختلف روش عددی، منحنیهای NFLC آلومینیوم آلیاژی را بهدست آوردند و نتیجه گرفتند که سه معیار نسبت کرنش پلاستیک معادل، نقطه انشقاق برای تغييرات ضخامت المان بحراني و مشتق دوم كرنش ضخامتي المان بحراني با نتايج تجربى بهدست آمده انطباق قابل قبولى دارند. ماموسى و همكاران (2013) [7] منحنی حد شکلدهی و مکان گلویی شدن ورقهای TWB را با استفاده از سه معيار مشتق دوم كرنش ضخامتي، مشتق دوم كرنش بيشينه و مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل به دست آوردند. کمی و همکاران (2015) [8] با موفقیت از مدل GTN بهمنظور بررسی موقعیت گلویی شدن و تعیین منحنیهای NFLC ورقهای ساندویچی استفاده کردند. کلاسنگیانی و همكاران (2015) [9] به تعيين عددي منحنيهاي NFLC و لحظه گلويي شدن با استفاده از مشتق دوم کرنش ضخامتی و سه مدل آسیب نرم مختلف پرداختند. با استفاده از این مدلهای عددی، سمت چپ منحنی بالاتر از مقادیر تجربی گزارش شده و سمت راست آن با دقت خوبی پیشبینی شده است. ظهور و همكاران (2016) [10] با استفاده از معيارهای تسليم جديد و مدل اصلاح شده مارسینیاک-کوزینسکی به تعیین تئوری منحنی حد شكلدهي ورق ألومينيومي 2024 پرداختند. بررسي اين تحقيق نشان ميدهد که از آزمایشهای تجربی قابلتوجهی برای کالیبره کردن معیارهای تسلیم و

پژوهشهایی به منظور بررسی و ارزیابی مدلهای آسیب مختلف برای تعیین منحنیهای حد شکلدهی شکست (FFLC) انجام شده است. لای و همكاران (2010) [14] با تصحيح مدل آسيب مور-كلمب به پيشييني شکست ناشی از برش در شکلدهی ورقهای فلزی پرداختند. لو و همکاران (2012) [15] با در نظر گرفتن جوانهزنی، رشد و به هم پیوستن حفرهها در شکست فلزات و آلیاژها، مدلی را ارائه و صحهگذاری کردند. محققان این مدل را با در نظر گرفتن اثر تنش سه محوری و تنش برشی بیشینه معرفی کردهاند که مورد توجه سایر محققان قرار گرفته است. ژینکای و همکاران (2015) [16] با در نظر گرفتن مدول الاستیک به صورت متغیر و تنش سه محوری و شرایط کرنش مختلف، معیار آسیب نرمی را ارائه و گلویی شدن غیریکنواخت را مدل کردند. آنها نشان دادند که مدل ارائه شده، پیشبینی دقیقتری از حد شکلدهی ورق St14 نسبت به مدلهای سوئیفت و هیل دارد و تغییر ضخامت، تغییری در کرنشهای شکست ایجاد نمی کند. لو و همکاران (2017) [17] با در نظر گرفتن به هم پیوستگی برشی حفرهها و کنترل کردن پیچش آنها، مدل آسیبی را در محدوده برش تا کشش دومحوری با عنوان مدل DF2015 ارائه دادند. چنگ و همکاران (2017) [18] مدل شکستی را با در نظر گرفتن تغییرات نسبت تنشهای صفحهای در حین بارگذاری و ناهمسانگردی ورق ارائه دادند. آنها همچنین با استفاده از تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود^۲، رشد و به هم پیوستن حفرهها را مدل کردند. معیارهای آسیب نرمی که اخیراً توسعه داده شدهاند بر این اساس هستند که کرنش پلاستیک معادل در شکست به تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود وابسته است. اثر تنش سه محوری در پیشبینی آسیب در پژوهشهای زیادی مورد بررسی قرار گرفته است ولی نقش پارامتر زاویه لود و مکانیزمهای فیزیکی آن تاكنون به صورت جامع تحليل نشده است. بارسوم و فالساك (2007) [19] نشان دادند که تنش سه محوری^۳ به تنهایی نمیتواند رشد حفره و سایر رفتارهای مربوط و متناسب با نرم شوندگی و موضعی شدن را مشخص نماید. از این رو لازم است، فاکتور دیگری به نام پارامتر (زاویه) لود، در مطالعات شکست نرم به کار گرفته شود. با استفاده همزمان و در کنار هم تنش سه محوری و زاویه لود می توان رفتار مواد نرم را تحت شرایط بارگذاری پیچیده بررسی کرد.

در این تحقیق، منحنی حد شکلدهی گلویی (NFLC) و منحنی حد

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15]

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.36.2

صحه گذاری آن ها استفاده شده است. کرجی بانی و همکاران (2016) [11] با استفاده از دو معیار شتاب کرنش بیشینه و شتاب کرنش ضخامتی، NFLC ورق دولایه آلومینیوم/فولاد را به دست آوردند و با مقایسه با نتایج تجربی، این منحنیها را صحه گذاری کردند. باقرزاده و همکاران (2016) [12] بهعنوان کاربردی از روشهای عددی در پیش بینی گلویی شدن، از نرخ تغییرات هیدرودینامیکی ورقهای کامپوزیتی آلومینیوم/فولاد استفاده کردند. در هیدرودینامیکی ورقهای کامپوزیتی آلومینیوم/فولاد استفاده کردند. در پیش بینی دقیق شروع شکست اشاره کردهاند. حبیبی و همکاران (2017) [13] با استفاده از دو روش المان محدود به بررسی حد شکل دهی ورق پرداختند. در مدل اول از طریق گنجاندن معیار گلوئی مارسینیاک-کوزینسکی در مدل المان محدود آزمون ناکازیما، منحنی حد شکل دهی به دست آورده شد. در مدل دوم، منحنی حد شکل دهی از طریق شبیه سازی تئوری شد. در مدل دوم، منحنی حد شکل دهی از طریق شبیه ازی تئوری

² Lode angle ³ Triaxiality Stress

¹ Fracture Forming Limit Curve

شکلدهی شکست (FFLC) آلومینیوم آلیاژی 2024 با استفاده از آزمونهای تجربی و شبیهسازی عددی با کد تجاری المان محدود آباکوس به دست آمده و مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهشهای انجام شده در این زمینه اثر پارامتر لود در تعیین منحنیهای FFLC را در نظر نگرفته و نیز این دو منحنی برای ورق مورد مطالعه در قالب یک پژوهش ارائه نشده است. در این مقاله، برای پیشبینی منحنیهای FFLC از یک مدل آسیب پدیدار شناختی مقاله، نرای پیشبینی منحنیهای FFLC از یک مدل آسیب پدیدار شناختی ابا در نظر گرفتن تنش سه محوری، پارامتر لود و کرنش پلاستیک معادل استفاده شده است. همچنین برای پیشبینی منحنیهای NFLC، از روشی با دقت بالاتر و براساس نرخ تغییرات کرنش بیشینه در مرز بین ناحیه گلویی و تغییر شکل همگن استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روشهای استخراج کرنشهای حدی جامعتر بوده و اثر کرنش ضخامتی در ورق را در بر می گیرد.

2- آزمایشهای تجربی

1-2- خواص ماده

در این پژوهش ورق آلومینیومی آلیاژی 2024 با ضخامت 1mm استفاده شده است. به منظور استخراج خواص کششی ورق، آزمایش کشش تکمحوری با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام با ظرفیت 15 تن، طبق استاندارد ASTM E8-15 در دمای اتاق و در جهت نورد انجام شد. سرعت آزمایش کشش برابر با 2mm/min در نظر گرفته شد و آزمایش برای سه نمونه تکرار گردید. با توجه به طول گیچ 50mm هر نمونه، تنش و کرنش مهندسی از آزمایشهای کشش بهدست آمد و با استفاده از روابط (1) تنش کرنش حقیقی قبل از گلویی شدن تعیین شد. منحنی تنش کرنش حقیقی با میانگینی از سه نمونه آزمایششده در "شکل 1" ارائه شده است.

$$\sigma_T = \sigma_E (1 + \varepsilon_E) \tag{1}$$
$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E)$$

در این رابطه $(\sigma_{z} g \varepsilon_{E})$ تنش و کرنش مهندسی و $(\sigma_{\tau} g \varepsilon_{E})$ تنش و کرنش حقیقی هستند. همچنین رفتار پلاستیک ورق را میتوان با رابطه سوئیفت، رابطه (2)، بیان کرد.

$$\sigma = k\varepsilon^n \tag{2}$$

در رابطه (2)، k و n به ترتیب ضریب استحکام و توان کرنش سختی ماده هستند. خواص مکانیکی ورق آلومینیومی 2024 بررسی شده در این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است.



شكل 1 منحنى تنش كرنش حقيقى آلومينيوم 2024.

جدول 1 خواص مكانيكي ورق آلومينيومي 2024

 Table 1 Mechanical properties of 2024 aluminum alloy.

تنش تسليم	مدول الاستيسيته	نسبت	چگالی	n	k
(MPa)	(GPa)	پواسون	(kg/m ³)		(MPa)
145	70	0.3	7800	0.20	432.51

2-2- آزمایش اتساع نیم کروی

بهمنظور تعیین تجربی منحنیهای حد شکل دهی ورق از روش اتساع با سنبه نیم کروی استفاده شده است. همان طور که در "شکل 2" ارائه شده است، هندسههای متفاوتی از ورق در این آزمایش بهمنظور پوشش طیف مناسبی از شرایط تنشی و کرنشی در آزمایشها مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه در نظر گرفته شده از شکست (پارگی) ورق در قسمت ورق گیر و نزدیک به آن جلوگیری می کند و باعث تمرکز کرنشهای پلاستیک در نواحی نزدیک به مرکز نمونهها می شود. ابعاد ورقهای بریده شده در "شکل 3" نشان داده شده است، در این شکل W نشان دهنده عرض متغیر ورق است که برای نمونههای مختلف برابر 20، 30، 40، 50، 80 و 90 میلی متر می باشد. همچنین ابعاد نمونه مربعی، برای ایجاد کشش دو محوره در ورق، 120 در 120 میلی متر است.

بعد از آمادهسازی ورقها در راستای نورد آنها، بهمنظور تعیین کرنشهای حدی شبکههای دایروی^۱ به شعاع 2.5mm به روش اچ شیمیایی بر روی تمامی ورقها ایجاد شد. ورقها با استفاده از بید^۲ در محیط جانبی خود محکم میشوند (شکل 6). ابعاد بیدها به گونهای انتخاب شده است که هم از



Fig. 2 Prepared hemispherical punch test specimens. شکل 2 نمونههای آماده شده برای آزمایش اتساع نیم کروی



Fig. 3 Dimensional characteristics of hemispherical punch test specimens (all dimensions are in mm).

شکل 3 ابعاد نمونه های آزمایش اتساع نیم کروی (ابعاد به میلیمتر است.)

¹ Circular Grid Analysis ² Lock Bead

به داخل کشیده شدن ورقها جلوگیری شود و از طرفی نیروی بیشتری به ورقها وارد نشود بهطوری که باعث پارگی آن در نزدیکی شعاع ماتریس شود. همچنین در همه این آزمایشها برای کاهش اصطکاک بین سنبه و ورق و بهبود شرایط شکلدهی، از روانکار SAE50w استفاده شد. بهطوریکه پارگی در تمامی نمونهها در موقعیت نزدیک سر سنبه اتفاق افتاد.

بعد از انجام آزمایشها، با استفاده از روش آنالیز شبکههای دایروی منحنی حد شکلدهی تجربی ورق به دست آمد. در این روش به صورتی که در "شکل 4" نشان داده شده است، دایرههای حک شده بر روی نمونهها در منطقه تغییر شکل به بیضی تبدیل می شوند و کرنش های حد شکل دهی گلوئی با استفاده از روابط (3) و (4) به دست میآیند.

$$\varepsilon_1 = \ln(\frac{a}{d})$$
 (3)

$$\varepsilon_2 = \ln(\frac{b}{d}) \tag{4}$$

در رابطه (3) و (4) مانند آنچه در "شکل 4" نشان داده شده است، d قطر اولیه دایره، a و b به ترتیب قطر بزرگ و کوچک بیضی هستند که در نهایت حاصل رابطه (3) کرنش بیشینه حدی و حاصل رابطه (4) کرنش کمینه حدی خواهد بود.

به منظور خواندن کرنشهای سطحی از دوربین میکروسکوپی دینو لايت٬ با بزرگنمایی 230 برابر استفاده شده است. با استفاده از این تجهیز و اتصال آن به یک کامپیوتر، میتوان سطح تغییر شکل یافته در ناحیه شکست را با بزرگنمایی مطلوب بر روی صفحه نمایشگر کامپیوتر مشاهده و با نرمافزار مربوطه کرنشهای حدی را محاسبه کرد. با توجه به انعطاف پذیری این ابزار، میتوان آن را عمود بر سطح تغییر شکل یافته (بیضیهایی که در ناحیه گلوئی قرار دارند) کرد و طول a و b را با استفاده از صفحه نمایشگر کامپیوتر و نرمافزار آن، به دست آورد.

Fig. 4 Transformation of circle into ellipse after deformation شکل 4 تبدیل دایره به بیضی بعد از تغییر شکل



Fig. 5 The testing machine with the die set mounted

در "شكل 5" مجموعه قالب تعيين منحنى حد شكلدهي و دستگاه استفاده شده برای انجام آزمایش های تجربی نشان داده شده است. همچنین در "شکل 6" شماتیکی از اجزای قالب به همراه ابعاد آنها ارائه شده است. از نمونههای تغییر شکل یافته مشاهده شد که پارگی ورق در نزدیکی مرکز آن اتفاق میافتد و سپس به سمت لبه ورق حرکت میکند بهطوریکه پارگی به صورت یک مسیر خطی و نه زیگزاگی دیده می شود (شکل 14). همچنین قابل ذکر است که با توجه به نمونههای آزمایش، شکست در راستای ضخامت رخ میدهد و سپس به سمت لبههای ورق گسترش مییابد و با نزدیک شدن به کشش دومحوری این رخداد مشهودتر است.

3- پیش بینی عددی منحنی حد شکل دهی گلویی و شکست 3-1- معيار شكست نرم پديدار شناختى

با توجه به مکانیزم رشد و گسترش ترک، شکست در دو حالت برشی و نرم تقسیم می شود. شکست نرم به دلیل تنش های هیدرواستاتیک ایجاد می شود و شامل جوانهزنی حفرهها، رشد و به هم پیوستن آنها میشود. همچنین شکست برشی زمانی که باند برشی در ابعاد ماکروسکوپیک و به دلیل نرخ پایین کار سختی تشکیل میشود، رخ میدهد [19]. در مورد شکست برشی، حفرههایی که در باند برشی جوانه میزنند سطح مقطع تحمل بار را در این باند کاهش میدهند و درنهایت منجر به افزایش تنش و موضعی شدن آن می شوند. ادامه بار گذاری و تداوم برش، سطح مقطع حفره ها را بزر گتر کرده و این پدیده درنهایت منجر به هم پیوستگی حفرهها و شکست می شود. حفرههای بزرگ شده در ضمن برش، نیازی به افزایش حجمی ندارند و از اینرو شکست برشی در مقایسه با شکست نرم وابستگی کمتری به فشار دارد [15]. در ورق فلزی نازک، شکست می تواند با هر دو حالت دچار شکست شود و محتمل است که با ترکیبی از این دو حالت نیز شکست رخ دهد.

نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی رفتار مواد نرم نشان میدهد که برای پیش بینی بهتر رفتار مواد در طول مسیر بارگذاری باید مدل آسیب مناسبی را در تئوری پلاستیسیته کلاسیک لحاظ نمود. در مدل های مکانیک آسیب محیط پیوسته، زوال مواد توسط یک متغیر داخلی به نام پارامتر آسیب تشریح می شود و مقدار آن در هر لحظه از بارگذاری توسط پارامتر عددی D تعیین می شود. مدل آسیب نرم استفاده شده یک مدل پدیدار شناختی برای پیشبینی شروع آسیب است. در این مدل فرض می شود که کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب، تابعی از تنش سه محوره و کرنش پلاستیک معادل است. در سال 2008 بای و ویرزبیکی [20] با استفاده از آزمایشهای تجربی نشان دادند که شکست نرم برای آلیاژهای آلومینیومی و سایر فلزات، به نامتغیر سوم^۲ تنش انحرافی که می تواند توسط زاویه لود بیان شود، مربوط





² Third Invariant

شکل 5 مجموعه قالب و دستگاه استفاده شده برای انجام آزمایشهای تجربی

¹ Dino lite

می شود. با توجه به این موارد می توان کرنش پلاستیک در آستانه شکست را به صورت تابعی از این سه پارامتر و به صورت رابطه (5) نوشت:

$$\bar{\varepsilon}_{D}^{pl}(\eta,\xi(\theta),\dot{\varepsilon}^{pl}) \tag{5}$$

 $ar{arepsilon}^{pl}$ در رابطه (5)، η بیانگر تنش سه محوری و (heta) تابعی از زاویه لود و كرنش پلاستيك معادل است و اين سه، به صورت روابط (6)، (7) و (8) ارائه مى شوند [21]:

$$\eta = -\frac{p}{q} \tag{6}$$

$$\xi(\theta) = \cos(3\theta)) = \left(\frac{r}{q}\right)^3 \tag{7}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2) \tag{8}$$

r در این روابط p تنش هیدرواستاتیک فشاری، q تنش معادل وون میزز و نامتغير سوم تنش انحرافي است. اين سه متغير به ترتيب از روابط (9)، (10) و (11) به دست میآیند:

$$p = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{9}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + (\sigma_3 + \sigma_2)^2]}$$
(10)

$$r = \left(\frac{9}{2}S \cdot S : S\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{27}{2}S_1S_2S_3\right)^{\frac{1}{3}}$$
(11)

در این روابط ترمهای σ_1 و σ_3 و σ_3 به ترتیب بهعنوان تنشهای اصلی بیشینه، متوسط و کمینه و ترمهای S_1 S_2 و S_2 به ترتیب به عنوان تنشهای انحرافی اصلى بيشينه، متوسط و كمينه تعريف مي شوند.

حال زمانی که رابطه (12) ارضا شود، طبق این مدل آسیب نرم، شکست در ورق شروع میشود:

$$w_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \xi(\theta), \dot{\varepsilon}^{pl})} = 1$$
(12)

در رابطه (12)، w_D متغیری است که با تغییر شکل پلاستیک به صورت یکنواخت افزایش می یابد. به منظور استفاده از این مدل در بررسی فرایندهای شکلدهی ورق و همینطور در پیشبینی FLC با فرض تنش صفحهای و بارگذاری تناسبی روابط (13) و (14) نوشته می شود: $(\sigma_3 = 0)$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{13}$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{14}$$

در این روابط $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ به ترتیب کرنشهای صفحهای بیشینه و کمینه میباشند. حال با استفاده از قانون جریان لوی میزز و با فرض حجم ثابت در طی تغییر شکل پلاستیک، میتوان بین نسبت تنش و کرنش ارتباط برقرار کرد. برای این منظور قانون جریان لوی میزز و تنشهای انحرافی اصلی به صورت روابط (15) و (16) نوشته می شود [21]:

$$\frac{d\varepsilon_1}{S_1} = \frac{d\varepsilon_2}{S_2} = \frac{d\varepsilon_3}{S_3}$$
(15)

$$S_{1} = \sigma_{1} - p = \frac{\sigma_{1}}{3} \sigma_{1}$$

$$S_{2} = \sigma_{2} - p = \frac{2\alpha - 1}{3} \sigma_{1}$$

$$S_{3} = \sigma_{3} - p = -\frac{1 + \alpha}{3} \sigma_{1}$$
(16)

با جایگذاری معادلات (16) در رابطه (15) رابطه بین جزء کرنشها به صورت معادله (17) تبديل مىشود.

 $\frac{d\varepsilon_1}{2-\alpha} = \frac{d\varepsilon_2}{2\alpha - 1} = -\frac{d\varepsilon_3}{1+\alpha}$ (17) $2 - \alpha$ حال با در نظر داشتن فرضیات گفته شده و استفاده از روابط (14) و (17) ارتباط بین α, β به صورت $(\alpha, \beta) = (2\beta + 1)/(2 + \beta)$ ارتباط بین α, β ارتباط بین α, β ارتباط بین

صورت مى توان روابط (6) و (7) را كه براساس نسبت تنش هستند، با استفاده از این رابطه براساس نسبت کرنش نوشت. در این صورت، تنش سه محوره، كرنش پلاستيك معادل و زاويه لود به ترتيب به صورت روابط (18)، (19) و (20) به دست میآید:

$$\eta = \frac{\beta + 1}{\sqrt{3(\beta^2 + \beta + 1)}} \tag{18}$$

$$\xi(\theta) = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\beta(\beta+1)}{(\beta^2+\beta+1)^{3/2}}$$
(19)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_1}{\sqrt{3}}\sqrt{\beta^2 + \beta + 1} \tag{20}$$

با استفاده از روابط بهدست آمده، خواص شکست ورق مورد مطالعه با استفاده از آزمایشهای تجربی استخراج می شود. با انجام شبیه سازی عددی و صحهگذاری آن، مسیرهای کرنش (β) برای هر آزمایش بهدست میآید. اندازه نیز برای هر آزمایش، مقدار کرنش بیشینه است. با محاسبه تنش سه ε_1 محوری و پارامتر لود و کرنش معادل، مشخصههای شکست به این ترتیب به نرمافزار معرفی می شود. همچنین باید در نظر داشت که در بسیاری از فرايندهاى شكلدهى ورق بارگذارى صفحهاى انجام شده بهصورت تناسبى و یا نزدیک به آن است و از اینرو فرض در نظر گرفته شده، قابل قبول است.

3-2- معيار گلوئي شدن

به منظور تعیین کرنشهای صفحهای حدی از روش مشتق اول کرنش بیشینه استفاده گردید. در این روش تاریخچه کرنش در سه مسیر عمود بر ترک ورق در نظر گرفته می شود و با توجه به تغییرات کرنش، محدوده گلویی شدن بر روی ورق معین می گردد. در "شکل 7" شماتیکی از تغییرات کرنش دو نقطه A و B در ناحیه گلویی شدن نشان داده شده است. در اینجا روش استفاده شده بهمنظور تعیین کرنشهای حدی به صورت زیر است:

ابتدا اندازه طول ناحيه گلويي شدن بايد مشخص شود. كرنش اصلي نقاط داخل ناحیه گلویی تا لحظه پارگی به صورت ممتد افزایش مییابد تا این که آن المان حذف می شود و به نقطه شکست می رسد؛ اما در نقاط نزدیک به ناحیه گلویی کرنش نقاط بعد از رسیدن به حدی رشد نکرده و مقدار ثابتی به خود می گیرد. به این صورت تفاوت بین نقاط داخل ناحیه گلویی شدن و مرز آن مشخص میشود.

نتايج تجربي [22] نشان ميدهد كه شروع گلويي شدن با كاهش نرخ کرنش در نقاط نزدیک به ناحیه گلویی همزمان است؛ بنابراین گلویی زمانی اتفاق میافتد که نرخ کرنش در مرز ناحیه ناپایداری به مقدار بیشینه موضعی خود ($\dot{\epsilon_1}^{\max A}$) مىرسد.

حال با توجه به این موارد می توان کرنشهای حدی در ناحیه گلویی شدن را ثبت کرد. در لحظه مربوط به گلویی شدن، کرنشهای بیشینه و کمینه المان واقع بر مركز گلويي (مانند نقطه B) بهعنوان كرنشهاي حدى ثبت می شود. این کار برای سه مسیر عمود بر ترک انجام شده و میانگینی از مقادیر به دست آمده بهعنوان کرنشهای حدی تمام نمونههای مورد بررسی گزارش میشود.

4- شبیه سازی المان محدود

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15]

¹ Levy-Mises

1-4- مدلسازی آزمایش اتساع نیم کروی

بهمنظور شبیه سازی و تحلیل عددی آزمایش اتساع نیم کروی، از حل گر صریح نرم افزار آباکوس 41-6 استفاده گردید. در این شبیه سازی سنبه، ماتریس و ورق گیر به صورت صلب گسسته^۱ و ورق به صورت تغییر شکل پذیر تعریف شد و تمام اجزای قالب و ورق، دقیقاً براساس ابعاد و هندسه آزمایش های تجربی به نرم افزار معرفی شد. به منظور مشاهده محل دقیق بروز ترک و مسیر رشد آن، فرایند به صورت کامل و بدون در نظر گرفتن تقارن مدل گردید. در این شبیه سازی برای مش بندی ورق از المان های پوسته مدل گردید. در این شبیه سازی برای مش بندی ورق از المان های پوسته به مرجع [23] المان ها در منطقه گلویی شدن و آسیب نهایی به صورت مشتطیلی و با اندازه mm در نظر گرفته شده اند. با توجه به این موارد برای مثال نمونه ها با عرض 20mm دو 120m و 120m به ترتیب دارای 3878 858

ضخامت ورق مانند آزمایشهای تجربی Imm در نظر گرفته شده است و در راستای ضخامت هر المان از 5 نقطه انتگرالگیری بهمنظور استخراج تنشها و کرنشها استفاده شده است. در این حالت با توجه به اینکه در این شبیه سازی از تکنیک حذف المان استفاده شده، در صورتی که تمامی نقاط انتگرالگیری در راستای ضخامت یک المان به I=1 رسیدند، آن المان حذف خواهد شد.

با استفاده از نتایج آزمایش کشش یک محوره (شکل 1)، رفتار ماده به صورت همسانگرد الاستوپلاستیک و براساس معیار تسلیم وون میزز به نرمافزار معرفی شد. همچنین در این شبیه سازی تماس بین ورق و اجزای قالب براساس مدل اصطکاکی کلمبی تعریف شد. ضریب اصطکاک بین ورق و ماتریس و نیز بین ورق و ورق گیر، 0.15 و بین ورق و سنبه 0.09 در نظر گرفته شد.

در "شکل 8" مدل المان محدود شبیه سازی آزمایش انجام شده نشان داده شده است. به منظور نمایش ورق مابین ورق گیر و ماتریس، از نمای بر ش یافته ورق گیر استفاده شده است.

در این شبیهسازی درحالی که ماتریس در موقعیت خود ثابت است، بعد از این که ورق گیر ورق را محکم می گیرد، نیروی ورق گیری برابر با 100kN از



Fig. 7 Schematic of the methodology used in FE model to obtain limit strains

شکل 7 شماتیک روش استخراج کرنشهای حدی از مدل FE

طرف ورق گیر به ورق وارد می شود تا طبق استاندارد از ورود ورق به ناحیه در معرض کشش جلوگیری شود. سپس سنبه با سرعت 1000mm/min به سمت ورق و در راستای محور خود حرکت کرده و تا پارگی ورق پیش می رود. سرعت سنبه با توجه به شبه استاتیک بودن فرایند انتخاب شده و جزئیات آن در [7] ارائه شده است.

4-2- اعمال معيار آسيب

در این مطالعه به منظور معرفی معیار آسیب از معیار آسیب نرم استفاده شده است. در قسمت تعریف رفتار ماده در فایل ورودی نرمافزار میتوان مشخصههای تنش سه محوری، کرنش پلاستیک معادل و پارامتر لود را به نرمافزار به عنوان خواص شکست ماده معرفی کرد. با استفاده از روابط تئوری ارائه شده در بخش 3 و کرنشهای اندازه گیری شده از نمونههای کشش در آزمایش اتساع نیم کروی و مدل عددی صحه گذاری شده، سه مشخصه اشاره شده به دست میآید.

برای مثال، برای نمونه با عرض 120mm، کرنش بیشینه صفحهای به دست آمده از اندازه گیری نمونه تجربی، برابر 0.39 میباشد. از طرفی، با استفاده از شبیه سازی انجام شده، مسیر کرنش های صفحهای این نمونه مانند آنچه در "شکل 9" ارائه شده است به دست میآید. حال با استفاده از این مسیر کرنش، مقدار β برابر 0.83 محاسبه می شود. درنهایت با استفاده از



Fig. 8 Finite element model of hemispherical punch test شکل 8 مدل المان محدود آزمایش سنبه نیم کروی



Fig. 9 The predicted strain path in W120 specimen

شکل 9 مسیر کرنش پیش بینی شده در نمونه W120

¹ Discrete Rigid



Fig. 12 Equivalent plastic strain distribution in W50 specimen after fracture

شکل 12 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 50mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن



Fig. 13 Equivalent plastic strain distribution in W120 specimen after fracture

شکل 13 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 120mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن



Fig. 14 W20 deformed specimen at onset of fracture in experiments شکل 14 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 20mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایش های تجربی



Fig. 15 W50 deformed specimen at onset of fracture in experiments شکل 15 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 50mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایشهای تجربی

بیشترین عرض ارائه شده است. همانطور که مشاهده میشود انطباق مناسبی بین این دو دسته نتیجه حاصل شده است. مقدار حداکثر نیروی اتساع برای نمونه برش خورده با عرض 30 میلیمتر در حدود 5 کیلو نیوتن و در مورد نمونه مستطیلی در حدود 29 کیلو نیوتن میباشد. مطابق با این مقایسه، منحنی نیرو جابجایی به دست آمده از شبیهسازیهای عددی با اختلافی



شكل 10 منحنى تجربى خواص شكست نرم آلومينيوم آلياژى 2024

روابط (18)، (19) و (20) مقادیر $(\bar{\epsilon}, \eta, \bar{\xi}(\theta))$ برای این نمونه، برابر با (قرابط (18)، (19) و (20) میشوند. به این ترتیب برای سایر آزمایشهای انجام شده، این روند تکرار میشود و اطلاعات مربوط به شکست ورق وارد کد المان محدود میشود. منحنی کرنش شکست براساس تنش سه محوره (η, ϵ_f) در "شکل 10" ارائه شده است. با توجه به نتایج تجربی به دست آمده اثر پارامتر لود برای مقادیر 1– و 1+ به یک صورت است و در این منحنی فقط به ارائه نتایج برای اندازه پارامتر لود 1+ بسنده شده است. در این منحنی تنشهای سه محوره با مقادیر ابتدای منحنی مربوط به نمونههای با عرض کم (کشش تک محوری) و تنش های سه محوری با مقادیر انتهای منحنی مربوط به حالت کشش دومحوری است.

5- نتايج و بحث

بهمنظور صحت سنجی مدل عددی، محل بروز ترک و منحنی نیرو جابجایی پیش بینی شده برای سه نمونه مختلف بررسی می گردد. مطابق "شکلهای 11، 12 و 13" مشاهده می گردد که ترک در نمونههای شبیه سازی شده تقریباً از وسط نمونهها (تمامی هندسهها) شروع شده و رشد می نماید. در "شکلهای 14، 15 و 16" نمونههای آزمایش تجربی نظیر ارائه شده است. مقایسه نمونههای اتساع عددی و تجربی نشان دهنده پیش بینی مناسب موقعیت و مسیر رشد ترک در شبیه سازی انجام شده است.

در ادامه بهمنظور بررسی و صحهگذاری مدل عددی از منحنی نیرو جابجایی سنبه استفاده میشود. این منحنی در "شکل 17" برای آزمایش های تجربی در مقایسه با شبیه سازی های عددی برای دو نمونه با کمترین و



Fig. 11 Equivalent plastic strain distribution in W20 specimen after fracture

شکل 11 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 20mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن



Fig. 16 W120 deformed specimen at onset of fracture in experiments شکل 16 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 120mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایشهای تجربی



Fig. 17 Comparison of numerical and experimental force displacement curve شکل 17 مقایسه منحنی نیرو جابجایی حاصل از شبیهسازی عددی و آزمایشهای

شکل ۱۱ مقدیسه منگلی کیرو جابجایی حاص از شبیه شاری عنادی و ارتقایشگای تجربی

حدود 2.5% بالاتر از منحنی تجربی قرار گرفته است. مقایسه نمودارهای نیرو نشان میدهد که هم مقدار حداکثر نیروی شکلدهی و هم زمان پارگی ورق با دقت قابل قبولی پیشربینی شدهاند.

1-5- منحنی NFLC و FFLC عددی

کرنشهای حد گلویی بیشینه و کمینه با استفاده از نرخ تغییرات کرنش بیشینه، بهصورتی که در بخش 3 به آن پرداخته شد، به دست میآید. شماتیک این روش به همراه تغییرات کرنش دو نقطه A و B در ناحیه گلویی شدن در "شکل 7" نشان داده شده است.

کرنشهای حدی به همراه مسیرهای کرنش برای تمام نمونهها با استفاده از شبیهسازی عددی به دست آمد. این مسیرها در فضای کرنشهای صفحهای که در "شکل 18" ارائه شده، رسم شده است. حالتهای تنش در سمت چپ و راست منحنی NFLC متفاوت از هم است؛ سمت چپ منحنی شامل کشش-فشار است درحالی که سمت راست آن، هر دو حالت تنش به صورت



Fig. 18 Predicted strain paths up to necking point (for specimens with width of 20 mm to 120 mm, from left to right respectively) شکل 18 مسیرهای کرنش به دست آمده تا نقطه گلویی حاصل از شبیهسازی عددی (از چپ به راست به ترتیب برای نمونهها با عرض 20 تا 120 میلیمتر)

کشش-کشش است. همان طور که ملاحظه می شود، مسیرهای به دست آمده در محدوده کشش تک محوری (0.5 $=\beta$) و کشش دومحوری (1.6 $=\beta$) است و نیز این مسیرهای کرنش به صورت خطی و یا بسیار نزدیک به آن است. از این رو فرض بارگذاری تناسبی در نظر گرفته شده در این آزمایش ها فرض درستی است. همچنین، دیده شد که در حالتی که المانهای ناحیه گلویی شدن شکل مستطیلی نداشته باشند، مسیرهای کرنش به دست آمده غیر خطی خواهند شد که برای نمونه هایی نزدیک به حالت کرنش صفحه ای این امر مشهودتر است.

با استفاده از معیار آسیب معرفیشده به نرمافزار و با توجه به تکنیک حذف المان، کرنشهای شکست نمونههای مورد آزمایش را میتوان از تحلیل عددی فرایند به دست آورد. برای این منظور کرنشهای صفحهای اولین المانی که از نمونه حذف میشود، بهعنوان کرنش شکست در نظر گرفته میشود. به این صورت منحنی حد شکلدهی شکست (FFLC) به دست میآید.

در "شکل 19" منحنی NFLC و FFLC به دست آمده از تحلیل عددی ارائه شده است. دیده می شود که با نزدیک شدن به حالت کشش تک محوری و دومحوری اختلاف بیشتری بین گلویی شدن و شکست نهایی در نمونهها وجود دارد و در حالت کرنش صفحهای این اختلاف به کمترین مقدار خود می رسد.



شکل 19 منحنی NFLC و آلومینیومی 2024 حاصل از شبیه سازی عددی

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.36.2

5-2- منحنی NFLC و FFLC تجربی

بعد از تغییر شکل ورق، دایرههای حک شده بر روی ورق در ناحیه تغییر شکل، به بیضی تبدیل شده و کرنشهای حدی گلوئی نمونهها با استفاده از روابط (3) و (4) محاسبه میشوند. میانگینی از کرنشهای حد گلوئی برای هر نمونه محاسبه شده و منحنی NFLC به صورت "شکل 21" به دست میآید. به منظور ترسیم منحنی حد شکلدهی براساس شکست میتوان از روش معکوس استفاده کرد [24]. ارتفاعی که نمونههای آزمایشهای تجربی دچار شکست شدهاند اندازه گیری شده و در جدول 2 ارائه شده است. با استفاده از مدل عددی ساخته و صحه گذاری شده، تغییرات کرنشهای صفحهای در طول حرکت سنبه برای 8 نمونه مورد آزمایش به دست میآید. در "شکل در شکل رسم شده برای 8 نمونه مورد آزمایش به دست میآید. در "شکل مدل عددی ساخته و افزایشی این ورق با عرض 90 میلیمتر ارائه شده است. حوالت تنش در ناحیه گلویی آنها به صورت کشش-کشش است برقرار میباشد. همچنین در اینجا فرض میشود که شرایط کرنشها در شروع میباشد. همچنین در اینجا فرض میشود که شرایط کرنشها در شروع

نتایج بهدستآمده در "شکل 21" ارائه شده است. همانطور که دیده می شود کرنش های شکست بالاتر از کرنش های گلویی شدن قرار دارند و البته این اختلاف قابل ملاحظه است. در واقع این امر نشان دهنده این است که در این جنس بعد از اینکه ورق دچار گلویی شد تا رسیدن به شکست نهایی ماده انعطاف بیشتری را از خود نشان می دهد.

5-3- مقایسه نتایج عددی و تجربی

نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشهای انجام گرفته برای دو منحنی NFLC و FFLC به ترتیب در "شکلهای 22 و 23" ارائه شده است.



Fig. 20 In-plane strains variation along punch stroke and fracture strains by the inverse method for the W90 specimen شكل 20 منحنى تغييرات كرنشهاى صفحهاى اصلى با جابجايي سنبه و تعيين

کرنش شکست به روش معکوس برای نمونه با عرض 90 میلیمتر

جدول 2 ارتفاع پارگی محاسبه شده از نمونههای آزمایش (واحد:mm) **Table 2** Limiting dome height measured from fractured specimens of AA 2024 [unit: mm]

20	30	40	50	60	80	90	120	عرض نمونه
19.03	20.00	19.80	19.03	17.77	18.36	21.21	25.01	ارتفاع شكست

با استفاده از رابطه (21) اختلاف نتایج بهدست آمده از شبیهسازی عددی برای پیشبینی منحنیهای NFLC و FFLC تعیین میشود.

Error of
$$\bar{\varepsilon}_f = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_f^{\text{FEM}} - \bar{\varepsilon}_f^{\text{Exp}}}{\bar{\varepsilon}_f^{\text{Exp}}} \right| \times 100$$
 (21)

در این رابطه $\overline{\mathcal{E}}_{f}^{\text{FEM}}$ کرنش معادل به دست آمده از روش المان محدود و $\overline{\mathcal{E}}_{f}^{\text{FEM}}$ کرنش معادل حاصل از آزمایشهای تجربی است. با استفاده از رابطه (21)، بیشترین مقدار خطای به دست آمده برای منحنیهای NFLC عدد 6.87 میباشد. اختلاف مقادیر را میتوان مناسب برای یک مدل عددی معرفی کرد و از این مدل عددی برای بررسی اثر سایر پارامترها بر روی منحنیهای NFLC و FFLC این آلیاژ آلومینیومی استفاده کرد.

6-نتیجه گیری

در این تحقیق منحنیهای NFLC و FFLC ورق آلومینیومی 2024 با استفاده از آزمونهای تجربی و نیز شبیه سازی با کد المان محدود آباکوس به دست آمد. هندسه های مختلف ارائه شده برای ورق و ابعاد قالب طراحی شده، کرنش های حدی را در محدوده مناسبی از شرایط تنش کرنش مابین کشش تک محوری و دومحوری به دست می دهد. همچنین وابستگی کرنش های



شکل 22 مقایسه منحنیهای NFLC عددی و تجربی



Fig. 23 Comparison of experimental and numerical FFLC

شکل 23 مقایسه منحنیهای FFLC عددی و تجربی

شکست ماده به تنش سه محوری و پارامتر لود در شرایط مختلف بارگذاری نشان داده شد و به صورت تجربی مقادیر آنها به دست آمد.

- هندسه های در نظر گرفته شده برای ورق آلومینیوم 2024، طیف مناسبی از شرایط تنشی و کرنشی در محدوده کشش تکمحوره تا دومحوری به دست آورده است.
- نایج نشان میدهد که در طی آزمایشهای تجربی، کرنشهای شکست بهطور میانگین به اندازه 2.77% بالاتر از کرنشهای گلویی قرار می گیرند.
- نتایج مدل عددی ایجاد شده برای پیشبینی کرنشهای حدی و شکست و مسیر کرنش در نرمافزار آباکوس با نتایج آزمایشهای تجربی صحه گذاری شده است و از این مدل میتوان برای بررسی اثر سایر پارامترهای مؤثر بر روی دو منحنی مورد مطالعه در این مقاله استفاده کرد.
- پیش, اینی کرنش های حدی گلوئی براساس نرخ کرنش بیشینه با بیشترین اختلاف 6.32% انجام گرفته است. این روش پیش, بینی، در حالتی که شعاع سنبه شکل دهی کمتر از حالت استاندارد باشد نیز مورد استفاده قرار گرفته و در مقایسه سایر روش ها از دقت و جامعیت[22] بیشتری برخوردار است.
- با استفاده از معیار آسیب پدیدار شناختی و با در نظر گرفتن اثر تنش سه محوره، پارامتر زاویه لود و کرنش پلاستیک معادل، کرنشهای شکست ورق آلومینیومی 2024 با بیشترین اختلاف 6.87% در مقایسه با نتایج تجربی پیشبینی شده است. این دقت پیشبینی مناسب درنتیجهی در نظر گرفته شدن شکست برشی درون ضخامتی و اثر پارامتر زاویه لود است.
- نتایج حاصل از مدل عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان میدهد، موقعیت و مسیر رشد ترک در مدل عددی بهدرستی پیش شده است.

از مدل عددی توسعه شده میتوان به عنوان ابزاری جهت بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر روی شکلپذیری ورق مانند ضخامت، ناهمسانگردی و نرخ بارگذاری استفاده کرد که در کار آتی مؤلفین مورد توجه قرار خواهد گرفت.

7- فهرست علايم

S,

=pi

تنش هیدرواستاتیک فشاری (MPa)	p
تنش معادل میزز (MPa)	q

¹ نامتغیر سوم تنش انحرافی

تنش انحرافی در جهت i (MPa)

نسبت کرنش صفحهای بیشینه به کمینه
$$eta$$

ⁱ³ کرنش صفحهای اصلی در جهت i

(MPa) i تنش اصلی در جهت
$$\sigma$$

8- مراجع

- S. P. Keeler, Circular Grid System—A Valuable Aid for Evaluating Sheet Metal Formability, SAE Technical Paper, pp. 1-9, 1968.
- [2] G. M. Goodwin, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, SAE Technical Paper, pp. 10-18, 1968.
- [3] Z. Marciniak, K. Kuczyński, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, No. 9, pp. 609-620, 1967.
- [4] Z. Marciniak, K. Kuczyński, T. Pokora, Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 15, No. 10, pp. 789-800, 1973.
- [5] Q. Situ, M. K. Jain, M. Bruhis, A suitable criterion for precise determination of incipient necking in sheet materials, material science forum, Vol. 519, pp. 111-116, 2006.
- [6] C. Zhang, L. Leotoing, G. Zhao, D. Guines, E. Ragneau, A comparative study of different necking criteria for numerical and experimental prediction of FLCs, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 20, No. 6, pp. 1036-1042, 2011.
- [7] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, No. 11, pp. 3210-3221, 2013.
- [8] A. Kami, B. M. Dariani, A. S. Vanini, D. S. Comsa, D. Banabic, Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 216, pp. 472-483, 2015.
- [9] K. Kolasangiani, M. Shariati, K. Farhangdoost, Prediction of forming limit curves (FLD, MSFLD and FLSD) and necking time for SS304L sheet using finite element method and ductile fracture criteria, Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME), Vol. 4, No. 2, pp. 121-132, 2015.
- [10] M. Zohoor, S. Shahi, M. HoseinpourGollo, An experimental and theoretical investigation for determination of advanced yield criteria parameters and forming limit diagram of Aluminum alloy 2024, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 192-202, 2016. (in Persian) (فارسی)
- [11] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 230, No. 6, pp. 1018-1029, 2016.
- [12] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.
- [13] M. Habibi, A. Ghazanfari, A. Assempour, R. Naghdabadi, R. Hashemi, Determination of forming limit diagram using two modified finite element models, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48, pp. 379–388, 2017. (in Persian فارسي)
- [14] Y. Li, M. Luo, J. Gerlach, T. Wierzbicki, Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 14, pp. 1858-1869, 2010.
- [15] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, K. Pack, New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals, International Journal of Solids and Structures, Vol. 49, No. 25, pp. 3605-3615, 2012.
- [16] X. Ma, F. Li, J. Li, Q. Wang, Z. Yuan, Y. Fang, Analysis of forming limits based on a new ductile damage criterion in St14 steel sheets, Materials & Design, Vol. 68, pp. 134-145, 2015.

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.36.2

- [21] S. J. Hu, Z. Marciniak, J. L. Duncan, Mechanics of Sheet Metal Forming, Second Edition, pp 2.20-2.26, London, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] A. J. Martínez-Donaire, F. J. García-Lomas, C. Vallellano, New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under through-thickness strain gradients, Materials & Design, Vol. 57, pp. 135-145, 2014.
- [23] F. Ozturk, D. Lee, Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, No. 1, pp. 247-253, 2005.
- [24] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 1, pp. 81-98, 2004.
- [17] Y. Lou, L. Chen, T. Clausmeyer, A. E. Tekkaya, J. W. Yoon, Modeling of ductile fracture from shear to balanced biaxial tension for sheet metals, International Journal of Solids and Structures, Vol. 112, pp. 169-184, 2017.
- [18] C. Cheng, B. Meng, J. Han, M. Wan, X. Wu, R. Zhao, A modified Lou-Huh model for characterization of ductile fracture of DP590 sheet, Materials & Design, Vol. 118, pp. 89-98, 2017.
- Design, Vol. 118, pp. 89-98, 2017.
 [19] I. Barsoum, J. Faleskog, Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, No. 6, pp. 1768-1786, 2007.
- [20] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, International Journal of Plasticity, Vol. 24, No. 6, pp. 1071-1096, 2008.