



Failure Analysis in Single-Point Incremental Forming of Bilayer Sheet Using the Ductile Fracture Criterion

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zahedi Dizaj Yekan A.¹ PhD,

Mollaie Dariani B.*¹ PhD,

Mirmia M.J.² PhD

How to cite this article

Zahedi Dizaj Yekan A, Mollaie Dariani B, Mirmia M.J. Failure Analysis in Single-Point Incremental Forming of Bilayer Sheet Using the Ductile Fracture Criterion. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1543-1554.

¹Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

²Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: No. 350, Hafez Avenue, Valiasr Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1591634311
Phone: +98 (21) 64543413
Fax: +98 (21) 66419736
dariani@aut.ac.ir

Article History

Received: September 23, 2019

Accepted: January 16, 2020

ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

Incremental forming of metal sheets is one of the new methods of metal forming with high flexibility in batch production of complex geometries. Due to the absence of a matrix and the gradual applying of forming forces, the forming limit in this process is increased compared to conventional ones. In this research, formability, forming, and finally fracture of aluminum/copper bilayer sheets produced by explosive welding method in the single point incremental forming process are studied. In the numerical prediction of growth and onset of fracture of sheets in this process, the Xue-Wierzbicki damage criterion was used as the VUMAT subroutine in Abaqus software. Using the numerical model, variations of the stress triaxiality and equivalent plastic strain as the variables affecting the damage growth in the incremental forming process were analyzed and explained, and the effect of cyclic and nonlinear loading in this process was shown. Experimental results show a different failure height of various geometries due to different loading conditions. Also, using the verified numerical model, in addition to predicting crack growth location, the fracture height in the formed geometries was predicted by 4.06% difference with respect to the experimental results.

Keywords Incremental Forming, Damage Criterion, Fracture Height, Bilayer Sheet

CITATION LINKS

[1] Analysis of material formability in incremental ... [2] Prediction of forming limit in single point incremental forming with the ductile fracture ... [3] An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet ... [4] Failure mechanisms in single-point incremental forming of ... [5] Mechanics of fracture in single point incremental ... [6] Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point ... [7] Formability limits by fracture in sheet metal ... [8] Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal ... [9] Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point ... [10] Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of ... [11] Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and ... [12] A model of one-surface cyclic plasticity with Lemaitre damage criterion for plastic instability prediction in the incremental forming ... [13] Numerical prediction of the ductile damage in single point incremental forming ... [14] Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a ... [15] Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using ... [16] Damage prediction in single point incremental forming using an ... [17] Failure strains of anisotropic thin sheet metals: Experimental evaluation and theoretical ... [18] On the comparison of formability of roll-bonded steel-Cu composite sheet metal in incremental forming and stamping ... [19] Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental ... [20] Multi-response optimization on single-point incremental forming of hyperbolic ... [21] Process parameters optimization of the explosive-welded Al/Cu bimetal in the incremental sheet metal forming ... [22] Numerical and experimental study on incremental forming process of ... [23] Single point incremental forming of Cu-Al composite sheets: A comprehensive ... [24] Residual stress measurement of single point incremental ... [25] A novel material modeling technique in the single-point incremental forming ... [26] Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject ... [27] Experimental determination and numerical prediction of necking and ... [28] Ductile damage and deformation mechanics in multistage single point ... [29] Suppression of necking in incremental sheet ... [30] Experimental determination and numerical prediction of necking and ...

تحلیل شکست در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق دولایه با استفاده از معیار آسیب نرم

علی زاهدی‌دیزجیکان PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

بیژن ملائی‌داریانی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

سیدمحمدجواد میرنیا PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی با انعطاف‌پذیری بالا در تولید هندسه‌های پیچیده و در تیراژ متوسط است. با توجه به عدم حضور قالب مادگی در این فرآیند و اعمال تدریجی نیروهای شکل‌دهی، حد شکل‌پذیری ورق در این فرآیند نسبت به فرآیندهای شکل‌دهی سنتی افزایش می‌یابد. در این پژوهش شکل‌پذیری و شکل‌دهی و در نهایت شکست ورق‌های دولایه آلومینیوم/مس حاصل از روش جوشکاری انفجاری در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق مطالعه شده است. در پیش‌بینی عددی رشد و شروع شکست ورق‌های دولایه در این فرآیند، از معیار آسیب ژو-ویزیکی در قالب زیربرنامه VUMAT نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. با استفاده از مدل عددی تغییرات تنش سه‌محوری و کرنش پلاستیک معادل به‌عنوان متغیرهای موثر بر رشد آسیب در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تحلیل و تبیین شد و نحوه بارگذاری سیکلی و غیرخطی در این فرآیند نشان داده شد. نتایج تجربی نشان‌دهنده متفاوت بودن ارتفاع شکست هندسه‌های مختلف به‌دلیل بروز شرایط بارگذاری متفاوت است. همچنین با استفاده از مدل عددی صحت‌گذاری شده، علاوه بر پیش‌بینی محل رشد ترک، ارتفاع شکست در هندسه‌های مختلف شکل‌دهی شده با اختلاف ۶/۰۴٪ نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی شد.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی تدریجی، معیار آسیب، ارتفاع شکست، ورق دو لایه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۶

*نویسنده مسئول: dariani@aut.ac.ir

مقدمه

با توجه به رشد سریع صنایع مختلف، روش‌های تولید و مهندسی نیز فراخور نیاز طراحی گسترش می‌یابد. در این بین، شکل‌دهی تدریجی ورق‌های فلزی با استفاده از ماشین ابزار کنترل عددی، اخیراً در صنایع شکل‌دهی فلزی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اعمال تدریجی نیروهای شکل‌دهی و نیز موضعی بودن تغییر شکل، حدود شکل‌پذیری ورق در این فرآیند نسبت به فرآیندهای شکل‌دهی سنتی افزایش می‌یابد. از این رو، به‌منظور استفاده از منحنی‌های حد شکل‌دهی در این فرآیند باید از منحنی‌های خاص آن استفاده شود. فلیسی و همکاران^[1]، منحنی حد شکل‌پذیری ورق آلومینیومی AA1050 را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (Single Point Incremental Forming) به‌دست آوردند. در این مطالعه به بروز شکست نرم در شکل‌دهی

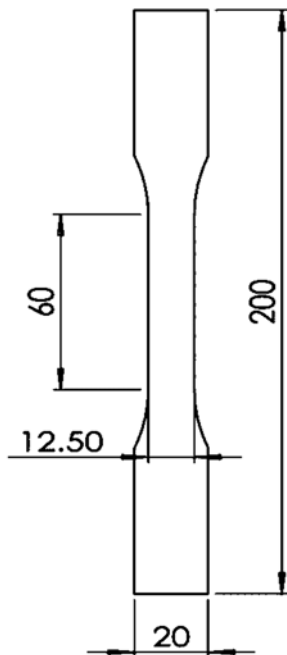
هندسه هرم ناقص اشاره شده است. هوآنگ و همکاران^[2]، با استفاده از معیار آسیب اویان شروع شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی هندسه شیار مستقیم ورق AA5052 را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه با توجه به کالیبره‌نکردن ضرایب مدل شکست با استفاده از این فرآیند، پیش‌بینی عمق شکست با خطای قابل توجهی گزارش شده است. ایمنز و فن دن بوگارد^[3]، مکانیزم‌های تغییر شکل ورق که منجر به افزایش شکل‌پذیری در فرآیند شکل‌دهی تدریجی می‌شود را تشریح کردند. براساس این مقاله، اعمال موضعی و تدریجی تغییر شکل و همچنین خمش ورق، دو عامل مهم بر افزایش شکل‌پذیری در این فرآیند است. سیلو و همکاران^[4]، با استفاده از آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی تدریجی ورق AA1050 و روابط تحلیلی نشان دادند که با افزایش نسبت ضخامت ورق به شعاع ابزار شکل‌دهی، تنش سه محوری کاهش و کرنش شکست افزایش پیدا می‌کند و منجر به کاهش نرخ رشد آسیب در شعاع‌های پایین ابزار می‌شود. ماهوترا و همکاران^[5]، مکانیک شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی تشریح کردند. فاکتورهای موثر بر روی رشد و یا تضعیف آسیب در این فرآیند تبیین شده و عوامل موثر بر روی بهبود شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته است. سنتنو و همکاران^[6]، کرنش‌های شکست را در آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی برای ورق AISI304 با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال تعیین کردند و نشان دادند که حد این کرنش‌ها بالاتر از کرنش‌های حاصل از فرآیند شکل‌دهی اتساع است. آیسپیک و همکاران^[7]، با استفاده از هندسه‌های مخروط و هرم ناقص با زاویه دیواره ثابت به اندازه‌گیری کرنش‌های شکست ورق AA1050 در فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداختند و شیوه تجربی جدیدی را برای این منظور ارائه دادند. در ادامه این کار، سوئر و همکاران^[8]، با استفاده از شکل هندسی خاصی، به بررسی شکست بر اثر تنش‌های برشی خارج صفحه‌ای که منجر به شکست مد دوم می‌شود پرداختند. محققان با استفاده از هندسه در نظر گرفته‌شده، کرنش‌های بحرانی شکست را برای محدوده‌ای از کرنش‌های اصلی فرعی به‌دست آوردند. فنک و همکاران^[9]، به‌صورت تحلیلی، عددی و تجربی تنش‌های تغییر شکل را در فرآیند SPIF مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌ای تحلیلی برای تنش سه محوری در دو ناحیه از ورق (ناحیه تماس با ابزار و ناحیه تغییر شکل‌یافته) پیدا کردند. روابط تحلیلی به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که شکست نرم در راستای ضخامت، از سطح بیرونی ورق به سمت سطح در تماس با ابزار شکل‌دهی و در راستای محیطی، از سمت ناحیه تغییر شکل‌یافته به سمت ناحیه در تماس با نوک ابزار شکل‌دهی حرکت می‌کند. زاهدی و همکاران^[10]، با بررسی زاویه دیواره مجاز شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های دو لایه آلومینیوم/فولاد، به اثر مطلوب شعاع کم ابزار و اندازه پایین گام عمودی بر روی شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه در این فرآیند اشاره کردند. الغمدی و حسین^[11] نشان دادند که با کاهش اندازه شعاع ابزار تا مقدار آستانه، فشار هیدرواستاتیک در زیر ابزار افزایش می‌یابد و رشد آسیب کمتر می‌شود. با کاهش اندازه

برای ورق‌های دو لایه بیشتر از ورق‌های تک‌لایه است. *ساختمانیان* و همکاران^[19]، به بررسی عددی و تجربی نیروهای شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های دو لایه فولاد/تیتانیوم خالص پرداختند. براساس این مطالعه، به دلیل شکل‌پذیری بیشتر ورق فولادی در لایه بیرونی و اصطکاک چسبنده تیتانیوم به ابزار در لایه درونی، در حالتی که ورق فولادی در لایه بیرونی باشد نیروهای شکل‌دهی بالاتر و شکل‌پذیری ورق دو لایه کمتر خواهد بود. هنرپیشه و همکاران^[20]، به بررسی فرآیند شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های دو لایه آلومینیوم/مس AA1050-C10100 پرداختند. آنها در این مطالعه به بررسی اثر پارامترهای فرآیند در دو سطح مختلف بر روی عمق شکست در هندسه مخروط ناقص با زاویه متغیر پرداختند. براساس این مطالعه، با افزایش اندازه گام عمودی، کاهش شعاع ابزار و کاهش سرعت دوران اسپیندل ابزار، شکل‌پذیری ورق دو لایه بهبود می‌یابد. همچنین نشان داده شده است که در حالتی که ابزار با ورق مسی در تماس باشد شکل‌پذیری ورق دو لایه بهبود می‌یابد. در مطالعه عددی انجام‌شده، توزیع ضخامت ورق و اندازه نیروهای شکل‌دهی بررسی شده است. این مطالعه در یک هندسه مخروط با زاویه دیواره متغیر که شرایط کرنش به کرنش صفحه‌ای نزدیک است صورت گرفته است. *قیصریان* و هنرپیشه^[21]، با بررسی تجربی اثر پارامترهای مختلف نشان دادند در حالتی که ورق مسی در لایه بیرونی ورق دولایه آلومینیوم/مس قرار گیرد، نازک‌شدگی بیشتری در فرآیند شکل‌دهی تدریجی رخ می‌دهد. همچنین در کار مشابهی، هنرپیشه و همکاران^[22]، به بررسی عددی و صحت‌گذاری نتایج آن پرداختند. *لیو* و *لی*^[23]، نشان دادند که شکل‌دهی تدریجی ورق‌های دو لایه آلومینیوم/مس AA1060-C10100 همانند ورق‌های تک‌لایه، متاثر از پارامترهای اصلی فرآیند شامل شعاع ابزار و اندازه گام عمودی است. براساس این مطالعه، افزایش شعاع ابزار و اندازه گام عمودی باعث کاهش ضخامت دیواره ورق و افزایش نیروهای شکل‌دهی و اُفت صافی سطح ورق می‌شود. *علی‌نقیان* و همکاران^[24]، تنش‌های پسماند در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های آلومینیوم/مس را اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که با افزایش اندازه شعاع ابزار و کاهش اندازه گام عمودی، تنش پسماند کمتری در ورق در طی این فرآیند شکل‌دهی ایجاد می‌شود. *ساختمانیان* و همکاران^[25]، نشان دادند که با استفاده از التراسونیک در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های دو لایه فولاد/تیتانیومی، مکانیزم‌های تغییر شکل به دلیل کاهش اصطکاک تغییر کرده و نیروهای شکل‌دهی کاهش می‌یابد. با مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده، مشخص شد تحقیقات محدودی بر روی شکل‌دهی و بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه در فرآیند شکل‌دهی تدریجی انجام شده است که اغلب به صورت بررسی‌های تجربی است. از این رو، در این مقاله در کنار آزمایش‌های تجربی، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به بررسی شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق پرداخته شده است. در این بررسی علی‌رغم

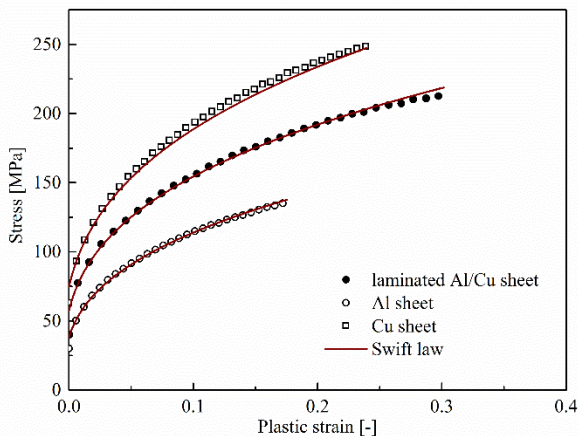
شعاع ابزار از مقدار آستانه، با وجود افزایش فشار هیدرواستاتیک، نرخ تجمع آسیب بیشتر شده و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. این پژوهش نشان می‌دهد که فشار هیدرواستاتیک (و یا تنش سه محوری) به‌تنهایی نمی‌تواند رشد آسیب را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تبیین کند. جین و همکاران^[12] و همچنین بنسید و همکاران^[13]، با استفاده از معیار آسیب کمتر به پیش‌بینی حداکثر زاویه قابل شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق پرداختند و با استفاده از بررسی توزیع اندیکاتور آسیب، وقوع گلوپی موضعی در این بررسی‌ها نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، با به‌کارگیری معیار آسیب در تعریف رفتار ماده، می‌توان پیش‌بینی بهتری از هندسه شکل‌دهی‌شده و توزیع ضخامت آن داشت. *میرزیا* و *شمساری*^[14] رشد آسیب و شروع شکست در شکل‌دهی ورق‌های AA6061-T6 در فرآیند شکل‌دهی تدریجی را با استفاده از مدل آسیب MMC3 بررسی کردند. در تحلیل عددی با در نظر داشتن تغییرات تنش سه محوری و پارامتر لود، تغییر شکل غیرخطی و افزایش شکل‌پذیری در این فرآیند تشریح شده است. *گاتا* و همکاران^[15]، با در نظرگرفتن اثر تنش‌های برشی ضخامت و اصلاح مدل آسیب GTN، نشان دادند که رشد آسیب و شکل‌پذیری در فرآیند SPIF علاوه بر وضعیت کرنش به وضعیت تنش‌ها نیز وابسته است و بدون در نظرگرفتن آنها نمی‌توان پیش‌بینی قابل قبولی از شکل‌دهی در این فرآیند به‌دست آورد. همچنین *گرمان* و همکاران^[16]، با استفاده از مدل آسیب GTN شکل‌دهی تدریجی ورق DC01 را مورد بررسی عددی قرار دادند و با نتایج تحلیلی و تجربی موجود مقایسه کردند. بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ارتباطی بین سخت‌شوندگی ماده و پارامترهای آسیب در این مدل آسیب وجود ندارد و پیش‌بینی زاویه حد شکل‌دهی در ورق مورد بررسی با خطای قابل توجهی همراه است. در مدل آسیب مناسب این فرآیند باید اثر جمعی کرنش پلاستیک در نظر گرفته شود. *باساک* و همکاران^[17]، به بررسی اثر ناهمسان‌گردی ورق AA6061 بر روی کرنش‌های شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق پرداختند.

علاوه بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شکست و شکل‌پذیری ورق‌های تک‌لایه در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق، با توجه به کاربرد متنوع ورق‌های دو لایه، پژوهش‌های محدودی نیز بر روی انواع مختلف این ورق‌ها انجام شده است. استفاده از ورق‌های دو لایه به‌عنوان ورق کامپوزیتی، با توجه به ارایه خواص متفاوت در هر لایه، می‌تواند منجر به کاهش وزن، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و کاهش هزینه‌ها شود. در پژوهشی *لغمید* و *حسین*^[18]، شکل‌پذیری ورق دولایه فولاد/مس را در فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی و استمپینگ مقایسه کردند. آنها نشان دادند که مانند ورق‌های تک‌لایه، شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه نیز در فرآیند شکل‌دهی تدریجی افزایش می‌یابد و البته طبق این بررسی، به دلیل بالا بودن اندازه تنش‌های هیدرواستاتیک و در نتیجه افزایش استحکام لایه اتصال دو ورق در این فرآیند، مقدار بهبود شکل‌پذیری

است که نشان‌دهنده داکتیلیته بالای این ورق است. از طرفی، کرنش‌های قابل تحمل در ورق دولایه بیشتر از دو ورق مس و آلومینیوم است که به دلیل ضخامت بیشتر این ورق در مقایسه با ورق‌های تشکیل‌دهنده آن است.



شکل ۱) ابعاد نمونه‌های تحت آزمون کشش (ابعاد به میلی‌متر هستند)



نمودار ۱) نتایج آزمون کشش تک‌محوری برای ورق‌های تک‌لایه و دو لایه

آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی ورق

به‌منظور بیان شکل‌پذیری ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، می‌توان از هندسه‌هایی استفاده کرد که زاویه دیواره آنها به تدریج افزایش پیدا می‌کند. در این حالت با افزایش عمق شکل‌دهی، نازک‌شدگی ورق بیشتر می‌شود و در نهایت شکست اتفاق می‌افتد. به این ترتیب، با استفاده از هندسه با زاویه دیواره متغیر، می‌توان زاویه بحرانی را برای جنس ورق و پارامترهای فرآیند مشخص کرد. با توجه به این مطالب، طبق شکل ۲ هندسه‌های شیار مستقیم، مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر و هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر برای

مدل‌سازی رفتار ماده در ناحیه الاستیک-پلاستیک، خواص آسیب ورق نیز به نرم‌افزار معرفی می‌شود تا تحلیل دقیق‌تری از تغییر شکل ورق در طی فرآیند شکل‌دهی تدریجی به‌دست آید. برای این منظور از معیار آسیب ژو-ویزبیک که در آن اثر فشار هیدرواستاتیک و پارامتر لود بر روی کرنش شکست ورق دیده شده است، در قالب زیربرنامه VUMAT استفاده شد. برای صحنه‌گذاری بر شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده و تحلیل شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه، آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی بر روی ورق‌های دولایه آلومینیوم/مس AA1050-C10100 که به روش جوشکاری انفجاری تولید شده است، انجام شد. ارتفاع شکست در فرآیند شکل‌دهی برای چند هندسه مختلف به‌دست‌آمده و نتایج تحلیل شده است.

آزمون تجربی

ماده

در میان روش‌های متعددی که برای ساخت ورق‌های دو لایه وجود دارد، روش جوشکاری انفجاری استحکام اتصال مناسبی را بین دو لایه ناهمجنس ایجاد می‌کند به‌طوری که جدایش بین لایه‌ها در فرآیندهای شکل‌دهی اتفاق نمی‌افتد. از این رو، در این مقاله از ورق‌های دو لایه آلومینیوم AA1050 و مس C10100 که به روش جوشکاری انفجاری و یک مرحله نورد سرد تکمیلی تولید شده‌اند، استفاده شد. با استفاده از میکروسکوپ نوری، ضخامت لایه‌های ورق دو لایه اندازه‌گیری شد که ضخامت ورق‌های مسی و آلومینیومی به ترتیب برابر ۰/۳۵ میلی‌متر و ۰/۶۵ میلی‌متر است که در مجموع ورق دو لایه دارای ضخامت ۱ میلی‌متر می‌شود.

آزمایش‌های کشش تک‌محوری به‌منظور تعیین رفتار الاستیک-پلاستیک ورق و ضرایب ناهمسانگردی آنها انجام شدند. این آزمایش‌ها هم بر روی ورق دو لایه و هم ورق‌های تک‌لایه آن و در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه با جهت نورد، طبق استاندارد ASTM E08-04 انجام شدند. براساس استاندارد، نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری، طبق ابعادی که در شکل ۱ نشان داده شده است، با استفاده از جت آب بریده شدند و با دستگاه آزمون کشش مجهز به اکستنسومتر (Extensometer)، آزمایش‌های کشش تک‌محوری انجام شد. طول گیج استفاده‌شده به‌منظور خواندن کرنش‌ها ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و هر یک از آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند. با استفاده از داده‌های آزمون کشش، تنش و کرنش‌های حقیقی طبق رابطه ۱ محاسبه شدند.

$$\varepsilon_i = \ln \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (1) \text{ رابطه}$$

$$\sigma_i = \frac{F}{A_i} = \sigma_e(1 + \varepsilon_e)$$

نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۱ نشان می‌دهد که قانون سخت‌شوندگی سويفت به‌صورت مناسبی رفتار تنش و کرنش ورق‌های تک‌لایه و دو لایه را پیش‌بینی کرده است. همچنین تنش تسلیم و استحکام ورق مسی بالاتر از ورق دو لایه و ورق آلومینیومی

شبیه‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی

برای مدل‌سازی فرآیند از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس و به‌صورت حل صریح استفاده شده است (شکل ۴). با توجه به اعمال نیروهای موضعی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق، نمی‌توان از تقارن در شبیه‌سازی استفاده کرد؛ همچنین جهت به‌دست‌آوردن مسیر رشد ترک، کل ورق و مسیر حرکت ابزار در شبیه‌سازی این فرآیند لحاظ شد. برای مدل‌کردن ابزار، با توجه به عدم دخالت اندازه و شعاع ساق ابزار، فقط قسمت کروی آن مدل‌سازی شد و به همین صورت فقط بخشی از صفحه پشتیبان که دارای انحنا است مدل‌سازی شد. هر دوی ابزار و قالب به‌صورت صلب تحلیلی و با المان‌های R3D4 تعریف شدند و ورق دو لایه به‌صورت مربع 100×100 میلی‌متر (مطابق آزمون‌های تجربی) و به‌صورت تغییر شکل‌پذیر با المان S4R مش‌بندی شد و با توجه به ضخامت هر لایه که 0.65 میلی‌متر برای لایه آلومینیومی و 0.35 میلی‌متر برای لایه مسی است، به دو قسمت مجزا تقسیم شد. خواص هر لایه با استفاده از زیربرنامه VUMAT به آن لایه تخصیص داده شد. به‌منظور تعریف خواص پلاستیک ماده از معیار تسلیم هیل ۱۹۴۸ استفاده شد و همچنین رفتار آسیب ماده با استفاده از معیار آسیب ژو-ویرزیکی به نرم‌افزار معرفی شد. قسمت بعدی این مقاله به تبیین مدل آسیب استفاده‌شده در این شبیه‌سازی‌ها اختصاص داده شده است.

به‌منظور شبیه‌سازی تماس بین ورق و ابزار، از الگوریتم تماس عمومی استفاده شد. در این الگوریتم انواع تماس‌ها بین سطوح وجود دارد که در این کار پژوهشی با توجه به نوع تماس بین ابزار و ورق، از روش پنالتی و برای تعریف شرایط اصطکاک بین ورق و ابزار، از اصطکاک کولمبی استفاده شد. با توجه به پژوهش‌های قیصریان و هنریپیشه [21] و لیو و لی [23] از ضریب اصطکاک 0.12 بین ورق و ابزار استفاده شد.

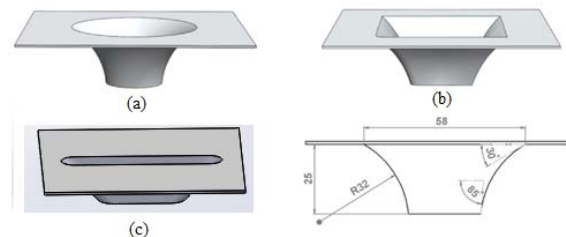
همان‌طور که اشاره شد، از هندسه‌های مختلفی در این پژوهش استفاده شده است. هر هندسه، مسیر حرکت ابزار خاص خود را دارد که از نرم‌افزار اینونتر جهت تعیین این مسیرهای ابزار استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار اکسل نقاط (X, Y, Z) به ابزار معرفی شد تا مسیر ابزار طی‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی به یک صورت باشد. برای مثال در شکل ۳ اجزای مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی تدریجی با صفحه پشتیبان دایره‌ای جهت شکل‌دهی مخروط ناقص نشان داده شده است.

معیار آسیب

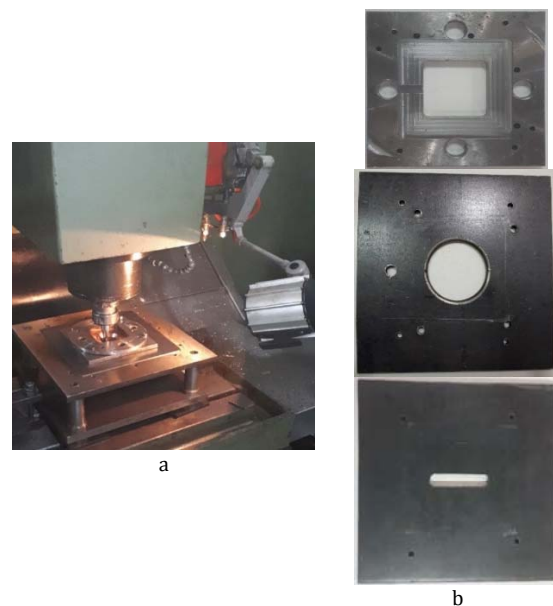
در این پژوهش از معیار آسیب ژو-ویرزیکی [26] استفاده شده است. در این معیار نامتغیرهای تنش و نیز کرنش پلاستیک معادل در هر نقطه بررسی ماده در فرمولاسیون شکست در نظر گرفته شده است و لذا می‌تواند در فرآیندهایی که مکانیزم‌های تغییر شکل متنوعی وجود دارد، کاربردی‌تر باشد. در فرمولاسیون این معیار، پارامتر آسیب

بررسی شکل‌پذیری و شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی مورد استفاده قرار گرفتند.

با توجه به انعطاف‌پذیری بالا برای تولید هندسه‌های پیچیده و نیز زمان کم لازم جهت این کار، در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق برخلاف فرآیندهایی نظیر کشش عمیق، نیازی به استفاده از ماتریس نیست و جهت کمک به شروع فرآیند از صفحه پشتیبان که ورق بر روی آن قرار می‌گیرد استفاده می‌شود. به این ترتیب برای هندسه‌های اشاره‌شده در شکل ۲، از صفحات پشتیبان خاص آنها استفاده شد. در شکل ۳ راه‌اندازی انجام آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی و صفحات پشتیبان مورد استفاده، نشان داده شده است. به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه سی‌ان‌سی سه‌محوره استفاده شد و مسیر حرکت ابزار با استفاده از نرم‌افزار اینونتر با اندازه گام عمودی 0.5 میلی‌متر و به‌صورت مارپیچ استخراج شده و وارد کنترلر دستگاه سی‌ان‌سی شد. همچنین به‌منظور شکل‌دهی از ابزار سر کروی به قطر 10 میلی‌متر و با سرعت حرکت 1000 میلی‌متر بر دقیقه و بدون چرخش حول محور خود استفاده شد. جنس ابزار، فولاد SAE 4140 است که دارای سختی بالای 20 راکول سی است. با این وجود جهت جلوگیری از سایش ابزار و بهبود شرایط شکل‌دهی و همچنین جهت تشخیص پارگی از روغن مناسب روانکاری استفاده شد.



شکل ۲) هندسه‌های مورد استفاده در شکل‌دهی تدریجی ورق؛ (a) مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر، (b) هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر، (c) شیار مستقیم



شکل ۳) تجهیز انجام آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی، (b) صفحات پشتیبان مورد استفاده

از مدل آسیب m, β, k_p و σ_{f0} ثابت‌های مدل آسیب هستند که با استفاده از نتایج آزمون‌های اتساع سر کروی و شبیه‌سازی‌های عددی به دست می‌آیند.

کالیبراسیون معیار آسیب

به منظور کالیبراسیون ثابت‌های مدل آسیب، از منحنی نیرو-جابجایی آزمایش‌های اتساع با سنبه سر کروی بر روی ورق‌های تک‌لایه آلومینیوم و مس استفاده شد که به تشریح در مطالعه زاهدی و همکاران [27] ارایه شده است. از طرفی، براساس تحقیقات میرزیا و همکاران [14, 28]، رشد آسیب در فرآیندهای شکل‌دهی با بارگذاری خطی متفاوت از فرآیندهایی نظیر شکل‌دهی تدریجی است که در آنها نسبت تنش و کرنش‌های اعمالی غیرخطی است و از این رو لازم است ثابت m در قانون توانی رشد آسیب (رابطه ۴) برای این فرآیند مجدداً کالیبره شود. بر این اساس، با استفاده از شبیه‌سازی هندسه شیار مستقیم و مقایسه ارتفاع شکست پیش‌بینی با نتایج آزمایش‌های تجربی، ثابت m به دست آمد. مقدار کالیبره‌شده این ثابت و ثابت‌های دیگر مربوط به معیار آسیب ژو-ویرزبکی در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱) ثابت‌های کالیبره‌شده معیار آسیب ژو-ویرزبکی

ماده	آلومینیوم	مس
σ_{f0} (MPa)	۱۵۹/۷۳	۳۰۱/۶۰
K_p (Mpa ⁻¹)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳
m	۲/۱۵	۱/۹۹
β	۲/۱	۲/۴

نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل FE

با توجه به اینکه قبل از بروز شکست در ورق فلزی، ضخامت آن کاهش می‌یابد و از طرفی ضخامت ورق عملکرد نمونه‌های حاصل از فرآیند شکل‌دهی تدریجی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، بررسی تغییرات ضخامت ورق در این فرآیند شکل‌دهی حایز اهمیت است. در کنار این مطلب به منظور صحت‌سنجی مدل المان محدود از بررسی تغییرات ضخامت ورق شکل‌دهی شده استفاده شده است. برای این منظور از شکل‌دهی هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره ثابت ۵۰ درجه که تا انتها بدون مشاهده شکست شکل‌دهی شد، بهره گرفته شده است. به منظور اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌های تغییر شکل‌یافته، راستای مناسبی از نمونه‌ها انتخاب شد و با وایرکات نمونه برش‌خورده به دست آمد و اندازه‌گیری ضخامت به کمک میکروسکوپ داینو لایت انجام شد (شکل ۵). در نمودار ۲ توزیع ضخامت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات ضخامت به خوبی توسط مدل المان محدود پیش‌بینی شده است.

D که در واقع نماینده‌ای از وضعیت تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده در ماده است، براساس تغییرات کرنش پلاستیک و کرنش شکست ماده مدل شده است. همچنین در این معیار آسیب از تابع تسلیم کوپل با آسیب ماده استفاده شده که به صورت رابطه ۲ است:

$$\varphi = \sigma_{eq} - w(D)\sigma_M \quad (2)$$

در این رابطه، σ_{eq} تنش معادل وون-میسز و σ_M ماتریس استحکام ماده است. در شروع تغییر شکل پلاستیک مقدار تابع پتانسیل تسلیم Φ ، برابر صفر است و در این زمان تابع کاهش $w(D) = 1 - D^\beta$ وارد رابطه می‌شود که β فاکتور کاهش و ثابتی نامنفی است. در این پژوهش به منظور اعمال رفتار پلاستیک ورق‌ها در شبیه‌سازی‌های عددی، از قانون سخت‌شوندگی سویفت استفاده شده است. طبق این قانون، ارتباط بین تنش و کرنش پلاستیک معادل به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$\sigma_M = \sigma_{y0} \left(1 + \frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_0}\right)^n \quad (3)$$

در این رابطه، n توان کرنش سختی، ε_0 کرنش اولیه، ε_{eq} کرنش پلاستیک معادل انباشته‌شده و σ_{y0} تنش تسلیم اولیه است که با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوری این ثابت‌ها به دست می‌آیند که در نمودار ۱ منحنی‌های تنش کرنش پیش‌بینی‌شده توسط این قانون سخت‌شوندگی ارایه شد. به منظور در نظر گرفتن مسیرهای بارگذاری غیرخطی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی از قانون توانی رشد آسیب استفاده شد. در این حالت، برای یک مقدار مشخص از کرنش شکست ε_f ، فرم نمودار قانون خرابی برای کاربرد در شبیه‌سازی‌های عددی به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$dD = m \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_f}\right)^{m-1} \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

در این رابطه ε_f کرنش شکست مؤثر و m ثابت ماده است. به منظور تعیین کرنش شکست، روابط متعددی ارایه شده است که در اینجا از روابط براساس تنش استفاده شده است. در این حالت، اثر متغیرهای فشار هیدرواستاتیک و زاویه لود به صورت مستقل از هم در نظر گرفته می‌شود. چنانچه کرنش شکست در ابتدا به صورت پوش تنش شکست σ_{Mf} بیان شود، می‌توان رابطه ۵ را نوشت:

$$\sigma_f = \sigma_{y0} \left(1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_0}\right)^n = \sigma_{f0} (1 + k_p p) \frac{\sqrt{3}}{2 \cos \theta_L} \quad (5)$$

که در این رابطه k_p ثابت ماده و σ_{f0} تنش شکست مرجع، p فشار هیدرواستاتیک و θ_L زاویه لود است. در این روابط p از رابطه $p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ و θ_L از رابطه $\theta_L = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{27 J_3}{2 \sigma_{eq}^3} \right)$ تعیین می‌شود. در این صورت کرنش شکست مرجع از رابطه ۶ به دست می‌آید:

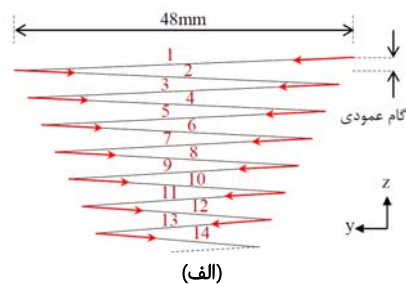
$$\varepsilon_f(p, \theta_L) = \varepsilon_0 \left\{ \left(\frac{\sigma_{f0}}{\sigma_{y0}} \right)^{(1/n)} \left[(1 + k_p p) \frac{\sqrt{3}}{2 \cos \theta_L} \right]^{(1/n)} - 1 \right\} \quad (6)$$

در نتیجه، در مدل آسیب ژو-ویرزبکی اصلاح‌شده، تجمع آسیب علاوه بر کرنش پلاستیک، به وضعیت فعلی تنش‌های هیدرواستاتیک و تنش‌های انحرافی وابسته است که این دو از طریق کرنش شکست در معادله آسیب معرفی می‌شوند. در این فرم

تحلیل وضعیت تنش و کرنش ورق دو لایه در فرآیند شکل‌دهی

تدریجی شیار مستقیم

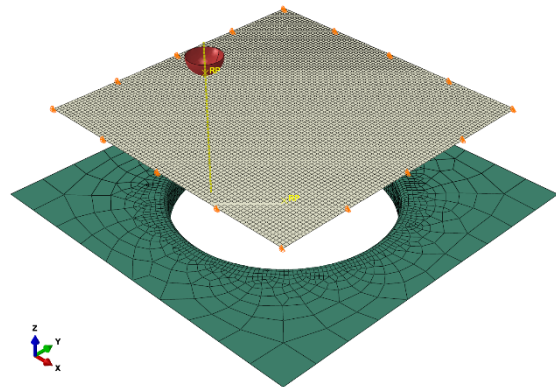
پیش‌بینی عمق پارگی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان محدود به همراه مدل آسیب، زمینه خوبی را برای تحلیل تغییر شکل و شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی مهیا می‌کند. برای این منظور و تحلیل شرایط تنش و کرنش در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، ابتدا شکل‌دهی شیار مستقیم به‌عنوان یک هندسه ساده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های شکل‌دهی برای سه نمونه انجام شده که نمونه‌های شکل‌دهی‌شده در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل‌دهی تا بروز شکست در ورق ادامه پیدا کرد و با مشاهده ترک و نشن روغن، عملیات قطع شد. میانگین ارتفاع شکل‌دهی هندسه شیار مستقیم برابر ۶/۴ میلی‌متر است. با توجه به اینکه لایه آلومینیومی در تماس با ابزار بوده و لایه مسی لایه بیرونی است، قبل از شروع شکست، پوست پرتغالی شدن در لایه مسی مشهود است و در مواردی در بیش از یک موقعیت، ترک در لایه مسی رخ داده است. بعد از وقوع شکست در لایه مسی، شکست به تدریج در راستای ضخامت پیش رفته و بعد از لایه میانی، لایه درونی آلومینیومی نیز دچار شکست می‌شود.



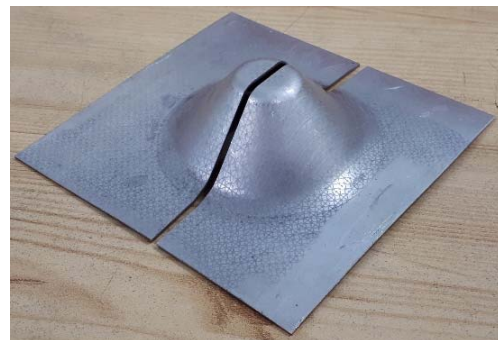
(ب)

شکل ۶ (الف) مسیر ابزار، (ب) نمونه‌های شکل‌دهی‌شده در فرآیند شکل‌دهی تدریجی هندسه شیار مستقیم

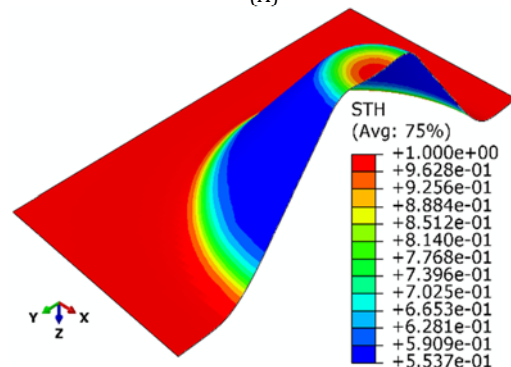
با توجه به شکل ۶-الف و اینکه ورق دو لایه در ارتفاع ۶/۴ میلی‌متر دچار شکست شده است، مسیرهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سه مسیر کامل انتهایی ابزار شکل‌دهی خواهند بود. نمودار ۳ توزیع کرنش پلاستیک معادل را در لایه پایینی مس در سه مسیر انتهایی نشان می‌دهد. در این شکل فلش ترسیم‌شده، نشان‌دهنده جهت حرکت ابزار شکل‌دهی است، با توجه به این شکل، توزیع کرنش پلاستیک نسبت به محور طولی هندسه، متقارن است همچنین همان طور که دیده می‌شود، در هر فریم ثبت‌شده، المانی که دارای بیشترین اندازه کرنش پلاستیک است اغلب در زیر ابزار شکل‌دهی و به دنبال آن است و لذا موقعیت آن بر روی محور تقارن طولی پیوسته تغییر می‌کند. با



شکل ۴ مدل تعریف‌شده برای شبیه‌سازی آزمایش شکل‌دهی تدریجی ورق هندسه مخروط ناقص در نرم‌افزار آباکوس

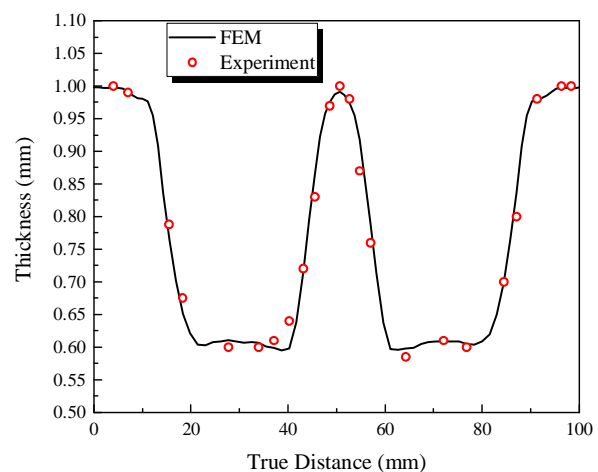


(A)



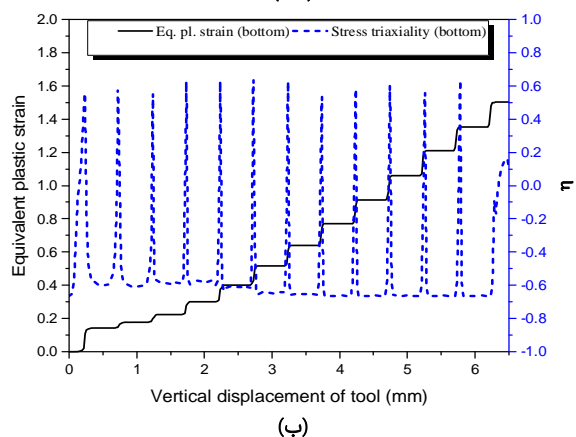
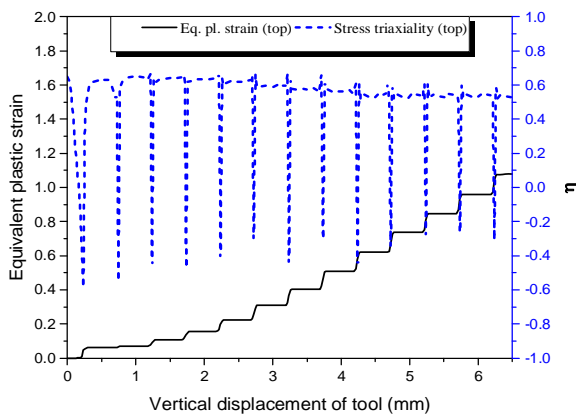
(B)

شکل ۵ (a) نمونه برش‌یافته هندسه مخروط ناقص، (b) کانتور توزیع ضخامت



نمودار ۲ توزیع ضخامت تجربی و عددی در شکل‌دهی تدریجی هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره ۵۰ درجه

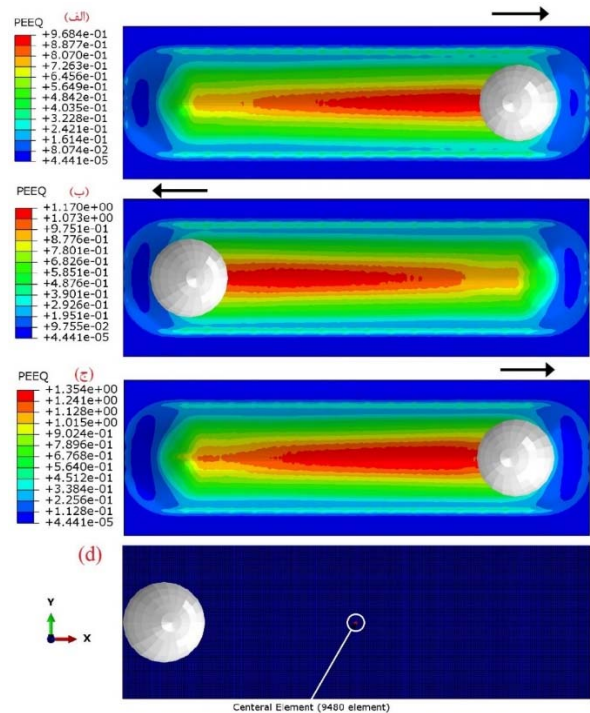
المان دور است، مقدار تنش سه محوری نیز مانند کرنش پلاستیک معادل ثابت است و تغییر نمی‌کند. همچنین در حالتی که کرنش پلاستیک تغییر می‌کند و به پله بالاتر صعود می‌کند، تغییر ناگهانی در مقدار تنش سه محوری در هر دو سطح بیرونی و درونی رخ می‌دهد. نکته قابل توجه مقادیر متفاوت و مخالف (مثبت و منفی) هم تنش سه محوره در این دو سطح است که نشان‌دهنده وجود گرادیان تنش در راستای ضخامت ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی است. با توجه به بررسی سطح کرنش‌های پلاستیک و نیز تغییرات تنش سه محوری، در راستای ضخامت ورق گرادیان تنش و کرنش قابل توجهی وجود دارد که نشان‌دهنده خمش موضعی در این فرآیند است.



نمودار ۴ تغییرات کرنش پلاستیک معادل و تنش سه محوره برای لایه‌های بالا و پایین ورق دو لایه آلومینیوم/مس

خمش موضعی ورق از مکانیزم‌های تغییر شکل در این فرآیند شناخته شده است [29] که با توجه به شرایط تغییر شکل ورق، از بروز گلوبی شدن ورق جلوگیری می‌کند و یا وقوع آن را به تاخیر می‌اندازد. در نتیجه حرکت‌های پیوسته ابزار در راستای مسیر مستقیم و رفت و برگشت آن، در المان‌های ورق و همچنین المان مورد بررسی، خمش و خمگشایی اتفاق می‌افتد. خمش و خمگشایی بارگذاری سیکی را در ورق ایجاد می‌کند که ایمنز و فن دن بوگارد [3] به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های غالب تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق از آن یاد کرده است.

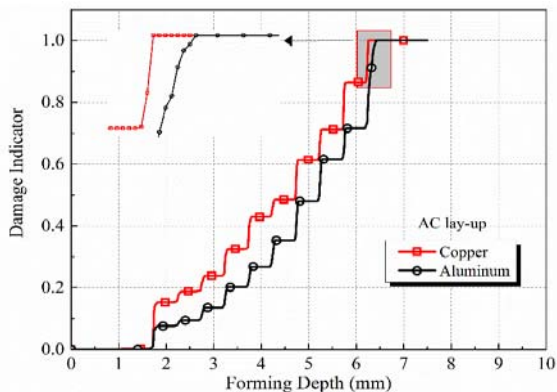
توجه به ارتباط مستقیم پارامتر آسیب و کرنش پلاستیک معادل، در المانی که دارای بیشترین کرنش پلاستیک معادل است احتمال می‌رود که شکست شروع شود. با توجه به متغیر بودن موقعیت این المان، برای المان مرکزی شیار مستقیم که در نمودار ۳ مشخص شده است، تغییرات تنش سه محوری و کرنش پلاستیک معادل با توجه به تغییرات عمق شکل‌دهی در نمودار ۴ نشان داده شده است.



نمودار ۳ توزیع کرنش پلاستیک معادل در سه مسیر انتهایی شکل‌دهی تدریجی شیار مستقیم

با توجه به نمودار ۴ کرنش پلاستیک معادل به‌صورت پله‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به تغییر شکل موضعی ورق، بعد از عبور ابزار از محل المان مشخص‌شده، سطح کرنش پلاستیک با دور شدن ابزار، ثابت می‌ماند و با عبور ابزار از محل این المان، سطح این کرنش به‌صورت پله‌ای افزایش می‌یابد. با بررسی منحنی‌های ترسیم‌شده در دو سطح درونی (نمودار ۴-الف) و بیرونی (نمودار ۴-ب) ورق، مشاهده می‌شود که سطح کرنش‌های پلاستیک، عموماً در سطح بیرونی بالاتر از سطح درونی است و این اختلاف با پیشرفت فرآیند از مسیر ۱ تا مسیر ۱۳ (شکل ۶-الف) به‌طور کلی بیشتر می‌شود. همچنین در رابطه با تغییرات کرنش پلاستیک معادل در یک سطح می‌توان گفت، با توجه به رفتار پلاستیک به‌دست‌آمده در آزمایش کشش تک‌محوری که در نمودار ۱ ارایه شد، با افزایش تنش و کرنش پلاستیک، شیب منحنی کمتر می‌شود که نشان‌دهنده به‌دست‌آمدن کرنش پلاستیک معادل با اعمال تنش کمتر است؛ به این ترتیب با پیشروی فرآیند و افزایش عمق شکل‌دهی، شیب افزایش کرنش پلاستیک معادل نیز بیشتر خواهد شد. با توجه به محور دوم عمودی در نمودار ۴ تغییرات تنش سه محوری نشان می‌دهد زمانی که کرنش پلاستیک دارای سطح ثابتی است و یا به عبارتی ابزار از محل

مقایسه نرخ رشد آسیب لایه‌های بیرونی مس و آلومینیوم حایز اهمیت است و با توجه به نمودار ۶ آسیب در لایه مسی با سرعت بیشتری پیشرفت می‌کند.



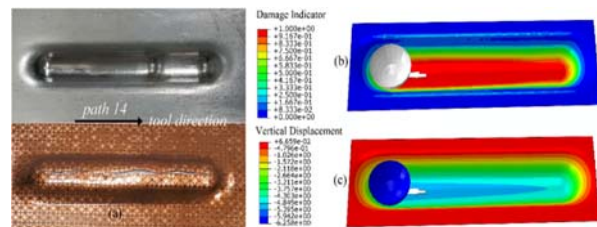
نمودار ۶) رشد آسیب با افزایش عمق شکل‌دهی در شکل‌دهی تدریجی شیار مستقیم ورق دو لایه آلومینیوم/مس

علاوه بر هندسه شیار مستقیم که در آن مسیر ابزار به صورت خطی است با استفاده از دو هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر (TCVW) و نیز هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر (TPVW)، شکل‌دهی تدریجی ورق دو لایه مورد بررسی قرار گرفت. در این دو هندسه، زاویه دیواره ورق با شروع از ۳۰ درجه به تدریج و به‌ازای هر ۵/۰ میلی‌متر پیشروی ابزار در عمق (اندازه گام عمودی)، ۱/۸ درجه زیاد می‌شود. به این ترتیب هر چقدر که شکل‌پذیری ورق بیشتر باشد، زاویه دیواره نیز بیشتر می‌شود و تا عمق بیشتری ورق شکل هندسه مورد نظر را به خود می‌گیرد. نمودار ۷ ارتفاع شکست هندسه‌های مختلف ورق‌های دولایه آلومینیوم/مس در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی را نشان می‌دهد، با توجه به نمودار ۷ دیده می‌شود که عمق شکست در هندسه‌های مختلف، متفاوت است، در حالت کلی علت این مطلب در مسیرهای کرنش متفاوتی است که در ورق اعمال می‌شود. جهت شکل‌دهی هر هندسه خاص، ابزار مسیر مربوط به آن هندسه را بر روی ورق طی می‌کند و شرایط تنش و کرنش مختص آن هندسه بر روی ورق پیش می‌آید، در واقع همان‌های ورق شرایط متفاوتی را از نظر تغییر شکلی طی می‌کنند که این امر منجر به تغییر در اندازه کرنش پلاستیک معادل و مقادیر مربوط به مولفه‌های تانسور تنش می‌شود که به نوبه خود بر روی فاکتورهای موثر بر روی کرنش شکست اثر می‌گذراند (رابطه ۶). در رابطه توانی ارایه‌شده برای رشد آسیب، مجموع این عوامل در نظر گرفته‌شده و در پارامتر آسیب (D) نمود پیدا می‌کند. حال هر چقدر D زودتر به مقدار بحرانی ۱ برسد، ارتفاع شکست نیز کمتر خواهد بود.

در کنار ارتفاع‌های شکست تجربی، مقادیر پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی به همراه درصد اختلاف آنها نیز در نمودار ۷ ارایه شده است. با توجه به اطلاعات ارایه‌شده، میانگین خطا در پیش‌بینی عمق شکست با استفاده از مدل آسیب توسعه‌داده‌شده

همان طور که در منحنی‌های ارایه‌شده در نمودار ۴ دیده می‌شود، بعد از آن که ابزار از محل تغییر شکل عبور می‌کند، کرنش پلاستیک معادل در همان مورد بررسی ثابت می‌ماند، در حالی که در سطح بیرونی تنش سه محوره منفی (شرایط تنش غالب فشاری) و در سطح درونی (در تماس با ابزار) تنش سه محوره مثبت (شرایط تنش غالب کششی) است. این امر بیانگر وجود خمش الاستیک بعد از عبور ابزار از محل تغییر شکل است؛ به عبارتی دیگر همان مورد بررسی در معرض خمش الاستیک قرار می‌گیرد به‌صورتی که سطح پایینی را محدب و سطح بالایی را مقعر می‌توان در نظر گرفت.

پیش‌بینی شکست در ورق دو لایه در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق
با استفاده از معیار آسیب ژو- ویرزبکی و با تکنیک حذف المان موقعیت شروع و رشد و گسترش شکست در آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی ورق دو لایه بررسی و پیش‌بینی شده است. کانتورهای توزیع آسیب و همچنین ارتفاع شکست (جابجایی عمودی ابزار) در چند فریم بعد از شروع شکست برای ورق دو لایه در نمودار ۵ نشان داده شده است. همچنین در این دو شکل، تصاویر مربوط به آزمایش شکل‌دهی تدریجی شیار مستقیم از هر دو سمت لایه درونی و لایه بیرونی ارایه شده است. در نتایج شبیه‌سازی FE مشاهده می‌شود ترک از زیر ابزار شروع به رشد کرده و در راستای حرکت ابزار گسترش می‌یابد. لذا ضمن پیش‌بینی ارتفاع شکست، محل شروع ترک و مسیر رشد آن نیز انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. در صورتی که لحظه مربوط به حذف اولین المان معادل با ارتفاع شکست ورق تلقی شود، ارتفاع پیش‌بینش شکست ورق ۶/۲۰ میلی‌متر است که با نتایج آزمایش‌های تجربی ۳/۱۲٪ اختلاف دارد.

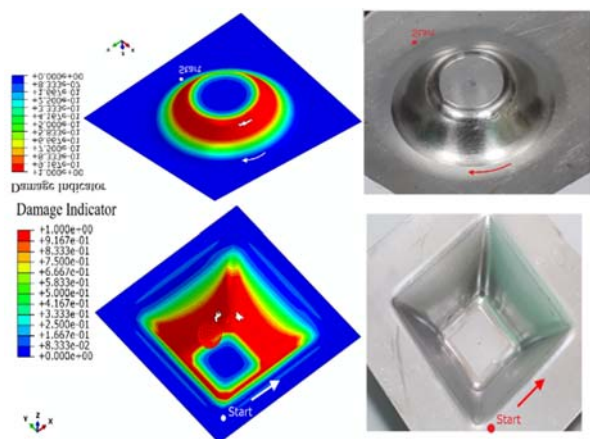


نمودار ۵) شکل‌دهی تدریجی شیار مستقیم: (a) شکست در آزمایش‌های تجربی ورق دو لایه آلومینیوم/مس، (b) کانتور توزیع آسیب، (c) کانتور جابجایی عمودی ابزار

رشد آسیب اولین المان محذوف از مدل FE هندسه شیار مستقیم نسبت به ارتفاع شکل‌دهی ترسیم شد. این تغییرات برای هر دو لایه درونی و بیرونی ورق دو لایه آلومینیوم/مس در نمودار ۶ ارایه شده است. با توجه به این شکل، در شکل‌دهی تدریجی هندسه شیار مستقیم، نرخ رشد آسیب در لایه بیرونی بالاتر است و مقدار آسیب D در لایه بیرونی، زودتر به مقدار بحرانی یک می‌رسد. در واقع، بعد از اینکه مقدار D در نقطه انتگرال‌گیری المان بیرونی به عدد ۱ رسید، نقطه انتگرال‌گیری در سطح بالایی نیز به حد بحرانی ۱ می‌رسد و در نهایت المان مورد نظر حذف می‌شود. این مطلب با مشاهدات تجربی که در آنها شکست ورق از لایه بیرونی شروع می‌شود همخوانی دارد.

ورق مسی دچار گلوپی و یا شکست می‌شود، در این شکل تصاویر مربوط به سطح داخلی ورق دو لایه (سطح آلومینیومی) نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۸-a، در هندسه TCVW، ابزار مسیر دایره‌ای را طی می‌کند و پیوسته شعاع این دایره کمتر و عمق شکل‌دهی بیشتر می‌شود. اگر نقطه شروع حرکت ابزار در محلی که کمترین فاصله با لبه ورق دارد در نظر گرفته شود، در قسمت‌هایی از ورق که کمان طی شده توسط ابزار، مضرب ۹۰ درجه است، تغییر شکل بیشتری را در مقایسه با سایر نقاط دارد. در شبیه‌سازی‌های عددی نیز المان‌های مربوط به این قسمت دارای کرنش اصلی ϵ_1 بیشینه هستند و در انتها نیز شکست در نزدیکی یکی از چهار موضع بحرانی در این هندسه اتفاق می‌افتد. همچنین لایه بیرونی مس ورق دو لایه، قبل از لایه آلومینیومی و در قسمت‌های مختلفی از سطح بیرونی ورق از جمله در این چهار موضع (۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه) دچار پوست‌پرتغالی شدن و یا حتی پارگی شده است.

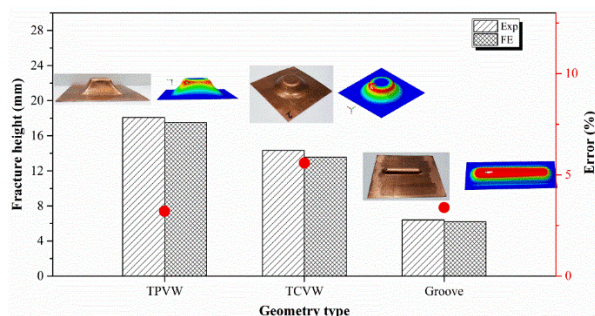
همچنین طبق نمودار ۸-b، در هندسه TPVW، حرکت ابزار بیشتر به صورت خطی و با شیبی به سمت کف قطعه است و به صورت تقریبی در هر ضلع، یک چهارم اندازه گام عمودی (۱۲۵/۰ میلی‌متر) عمق شکل‌دهی زیاد می‌شود. در آزمایش تجربی، محل پارگی بر روی یکی از این اضلاع رخ داده است. همچنین در شبیه‌سازی‌های عددی نیز محل شروع ترک نزدیک به گوشه‌های این هندسه ولی بر روی یکی از اضلاع پیش‌بینی شده است. با توجه به این موضوع، می‌توان گفت که پیش‌بینی محل شروع ترک در وضعیت مشابهی از کرنش‌ها انجام شده است.



نمودار ۸ شکست در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های دو لایه آلومینیوم/مس نمونه‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده با نمایش توزیع آسیب (فلش نشان‌دهنده مسیر حرکت ابزار است)

مسیر کرنش برای اولین المان حذف شده از مدل FE، در آزمایش‌های مختلف شکل‌دهی تدریجی، در نمودار ۹ رسم شده است. با توجه به تغییر شکل غیرخطی در این فرآیند، مسیر کرنش‌های ϵ_1 و ϵ_2 المان‌های مورد بررسی نیز به صورت غیرخطی هستند. مسیرهای کرنش نشان‌دهنده به نوعی بارگذاری سیکلی را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی نشان می‌دهد که /ایمنر و فن دن بوگارد [3] از آن

X-W برابر ۴/۰۶٪ است. همان طور که دیده می‌شود کمترین خطای پیش‌بینی مربوط به شکل‌دهی هندسه شیار مستقیم است. این اختلاف کم با توجه به اینکه کالیبره کردن ثابت ماده m با استفاده از این هندسه صورت گرفته است، قابل توجیه است. اختلاف در مقادیر خطا بین هندسه‌های مختلف نشان‌دهنده این است که کالیبره کردن مدل آسیب به وضعیت تنش و کرنش اعمال شده در قطعه وابسته است. از طرفی دیگر، کالیبره کردن ثابت m برای دو جنس مختلف آلومینیوم و مس با در نظر گرفتن کمترین خطا انجام شده است و همچنین ثابت‌های دیگر مدل آسیب با استفاده از آزمون‌های اتساع ورق‌های آلومینیوم و مس به دست آمده است. طبیعی است که هندسه‌ای که جهت کالیبره کردن مدل آسیب به کار گرفته شده، کمترین اختلاف را با نتایج تجربی داشته باشد. به نظر می‌رسد در صورتی که تعداد هندسه بیشتری برای کالیبره کردن استفاده شود، میانگین خطای پیش‌بینی شده کاهش پیدا کند، اما با توجه به مسیر ابزار و تغییر شکل غیرخطی و هندسه شکل‌دهی، زمان بسیار قابل توجهی جهت انجام شبیه‌سازی به صورت سعی و خطا و یافتن مقادیر بهینه برای ثابت مدل آسیب نیاز است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع نمونه پیش‌بینی شده پایین‌تر از ارتفاع شکست آزمایش‌های تجربی است که استفاده از این مدل آسیب را کاربردی‌تر می‌نماید.



نمودار ۹ ارتفاع شکست آزمایش‌های تجربی و پیش‌بینی‌شده در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق دو لایه آلومینیوم/مس

موقعیت شکست در آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی تدریجی ورق دو لایه آلومینیوم/مس در نمودار ۸ نشان داده می‌شود. همچنین در این شکل، پیش‌بینی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل المان محدود و اعمال معیار آسیب X-W توسعه داده شده نشان داده شده است. با توجه به اینکه فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق نامتقارن است، جهت حرکت ابزار در این شکل با استفاده از فلش نشان داده شده است؛ به عبارت دیگر، ساعتگرد یا پادساعتگرد بودن مسیر حرکت ابزار، موقعیت شروع ناپایداری و رشد ترک را تغییر می‌دهد. طبق این شکل، همانند آزمایش‌های تجربی، موقعیت شروع ترک در مجاورت کف قطعه، در ارتفاعی کمتر از شعاع ابزار از کف قطعه، برای تمام هندسه‌ها پیش‌بینی شده است. با توجه به اینکه قبل از بروز شکست در لایه درونی آلومینیومی، تغییر شکل زیاد در لایه بیرونی مسی اتفاق می‌افتد و در موقعیت‌های مختلف،

کمترین ضخامت است و ضخامت کف قطعه تقریباً ثابت و نزدیک امیلی‌متر است.

۲- سه هندسه شیار مستقیم، مخروط ناقص با زاویه دیواره متغیر و هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر دارای ارتفاع‌های شکل‌پذیری متفاوتی هستند که علت اصلی این مطلب مسیره‌های کرنش متفاوتی است که در ورق ایجاد می‌شود و نسبت‌های کرنش متفاوت و متغیری را رقم می‌زند. در هر صورت، میانگین ارتفاع شکل‌دهی برای سه هندسه بررسی شده ۱۲/۹۴ میلی‌متر و کمترین ارتفاع شکل‌دهی برای هندسه شیار مستقیم با اندازه ۶/۴ میلی‌متر است.

۳- نتایج مقایسه‌ای عددی و تجربی مربوط به شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های دو لایه نشان می‌دهد که با استفاده از هندسه شیار مستقیم، می‌توان ثابت مربوط به نرخ تغییرات کرنش پلاستیک معادل به کرنش شکست را جهت استفاده در شبیه‌سازی آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی کالیبره کرد.

۴- با توجه به مدل شکست و نتایج عددی، مشاهده می‌شود که کرنش پلاستیک معادل به‌صورت پله‌ای در ورق تحت شکل‌دهی افزایش می‌یابد و همچنین سطح تنش‌های سه محوری در لایه‌های بیرونی و درونی متفاوت از هم بوده است و در راستای ضخامت ورق، گرادیان تنش و کرنشی وجود دارد.

۵- با استفاده از مدل آسیب توسعه‌داده‌شده ژو- ویرزبکی، عمق و موقعیت شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های دولایه آلومینیوم/مس با هندسه‌های متفاوت با میانگین خطای ۴/۰۶٪ پیش‌بینی شد.

۶- ترسیم مسیره‌های کرنش در شکل‌دهی تدریجی هندسه‌های مختلف نشان داد که مسیر کرنش در این فرآیند غیرخطی بوده است و بارگذاری سیکلی در آن اتفاق می‌افتد که از مکانیزم‌های افزایش شکل‌پذیری در این فرآیند نیز محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تاییدیه اخلاقی: نتایج ارائه‌شده حاصل پژوهش نویسندگان است و تاکنون در نشریه دیگری چاپ نشده و در دست بررسی نیز نیست.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافی با هر گونه شخصیت حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

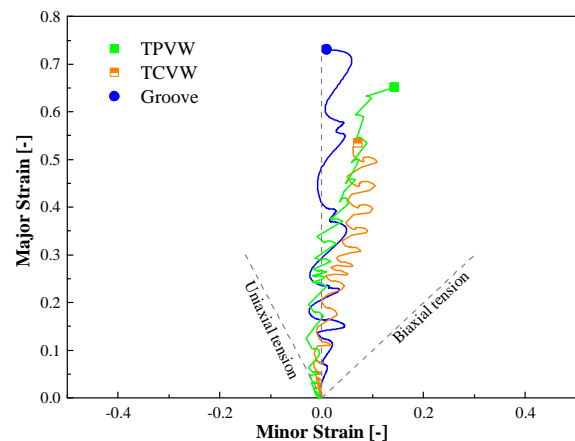
سهم نویسندگان در مقاله: علی زاهدی دیزج یکان (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی و نگارنده بحث (۶۰٪)؛ بیژن ملایی داریانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۲۰٪)؛ سید محمدجواد میرنیا (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

منابع

- 1- Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of material formability in incremental forming. CIRP Annals. 2002;51(1):199-202.
- 2- Huang Y, Wang YJ, Cao J, Li M. Prediction of forming limit in single point incremental forming with the ductile fracture criterion. International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2007;MSEC2007-31129.

به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های که منجر به افزایش شکل‌پذیری ورق در این فرآیند می‌شود یاد کرده است. با توجه به این شکل، وضعیت کرنش در سه هندسه مورد بررسی به شرایط کرنش صفحه‌ای نزدیک‌تر است و با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در این زمینه کرنش‌های شکست در حالت کرنش صفحه‌ای بالاتر از سایر وضعیت‌های کرنش قرار می‌گیرند [17]. از طرفی همان‌طور که زاهدی و همکاران [30] نشان داده‌اند، کرنش‌های حد شکست ورق بالاتر از کرنش‌های حد گلوبی آن قرار می‌گیرد. از این رو، حدود شکل‌دهی به‌دست‌آمده از هندسه‌های استفاده‌شده، بالاتر از کرنش‌های حد گلوبی این ورق‌ها خواهد بود. در هر صورت، به‌منظور تعیین خط حد شکل‌دهی براساس شکست که خطی با شیب منفی است، لازم است که هندسه‌هایی دیگری که وضعیت‌های کرنش متفاوتی را دارند نیز مورد بررسی قرار گیرند.



نمودار ۹) مسیر کرنش اولین المان حذف‌شده در طی شبیه‌سازی FE آزمایش‌های شکل‌دهی ورق دو لایه آلومینیوم/مس

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شکل‌پذیری ورق‌های دو لایه آلومینیوم/مس که به روش جوشکاری انفجاری تولید شده‌اند، در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هندسه‌های شیار مستقیم، مخروط ناقص با زاویه دیواره ثابت و متغیر و نیز هرم ناقص با زاویه دیواره متغیر با استفاده از شکل‌دهی تدریجی تا حداکثر ارتفاع مجاز شکل‌دهی شدند. به‌منظور تحلیل شکل‌دهی تدریجی از شبیه‌سازی این فرآیند در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد؛ با استفاده از آزمون‌های کشش تک‌محوری و نیز نتایج حاصل از آزمون‌های اتساع خواص پلاستیسیته و آسیب ورق به‌دست آمد و به نرم‌افزار معرفی شد. در بین هندسه‌های استفاده‌شده هندسه مخروط ناقص با زاویه دیواره ۵۰ درجه بدون بروز شکست تا ارتفاع نهایی ۲۵ میلی‌متر شکل‌دهی شد و هندسه‌های دیگر در ارتفاع‌های مختلفی دچار شکست شدند؛ نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت موارد زیر بیان کرد:

- ۱- با استفاده از هندسه شکل‌دهی شده مخروط ناقص با زاویه دیواره ۵۰ درجه و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، مدل المان محدود صحه‌گذاری شد. نتایج نشان می‌دهد که در شعاع خم ارتفاع ۲۵ میلی‌متر ورق دارای

- 18- Al-Ghamdi KA, Hussain G. On the comparison of formability of roll-bonded steel-Cu composite sheet metal in incremental forming and stamping processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87:267-278.
- 19- Sakhtemanian MR, Honarpisheh M, Amini S. Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental forming process of explosive-welded low-carbon steel/CP-titanium bimetal sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(9):3781-3796.
- 20- Honarpisheh M, Mohammadi Jobedar M, Alinaghian I. Multi-response optimization on single-point incremental forming of hyperbolic shape Al-1050/Cu bimetal using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96:3069-3080.
- 21- Gheysarian A, Honarpisheh M. Process parameters optimization of the explosive-welded Al/Cu bimetal in the incremental sheet metal forming process. *Iranian Journal of Science Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2019;43:945-956.
- 22- Honarpisheh M, Keimasi M, Alinaghian I. Numerical and experimental study on incremental forming process of Al/Cu bimetals: influence of process parameters on the forming force, dimensional accuracy and thickness variations. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2018;13(1):35-51.
- 23- Liu Z, Li G. Single point incremental forming of Cu-Al composite sheets: A comprehensive study on deformation behaviors. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019;19(2):484-502.
- 24- Alinaghian M, Alinaghian I, Honarpisheh M. Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2019;2(2):131-139.
- 25- Sakhtemanian MR, Honarpisheh M, Amini S. A novel material modeling technique in the single-point incremental forming assisted by the ultrasonic vibration of low carbon steel/commercially pure titanium bimetal sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;102:473-486.
- 26- Xue L. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *International Journal of Solids and Structures*. 2007;44(16):5163-5181.
- 27- Zahedi A, Mollaei Dariani B, Mirnia MJ. Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;153-154:341-358.
- 28- Mirnia MJ, Vahdani M, Shamsari M. Ductile damage and deformation mechanics in multistage single point incremental forming. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;136:396-412.
- 29- Seong DY, Haque MZ, Kim JB, Stoughton TB, Yoon JW. Suppression of necking in incremental sheet forming. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51(15-16):2840-2849.
- 30- Zahedi A, Mollaei-Darmani B, Mirnia M. Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of 2024 aluminum alloy sheet using damage criterion. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(9):361-371. Persian.
- 3- Emmens WC, van den Boogaard AH. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):3688-3695.
- 4- Silva MB, Nielsen PS, Bay N, Martins PAF. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;56:893-903.
- 5- Malhotra R, Xue L, Belytschko T, Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(7):1573-1590.
- 6- Centeno G, Bagudanch I, Martínez-Donaire AJ, García-Romeu ML, Vallellano C. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming. *Materials & Design*. 2014;63:20-29.
- 7- Isik K, Silva MB, Tekkaya AE, Martins PAF. Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(8):1557-1565.
- 8- Soeiro JMC, Silva CMA, Silva MB, Martins PAF. Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;217:184-192.
- 9- Fang Y, Lu B, Chen J, Xu DK, Ou H. Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(8):1503-1515.
- 10- Zahedi A, Mollaei-Darmani B, Morovvati MR. Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(14):1-8. Persian.
- 11- Al-Ghamdi KA, Hussain G. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015;88:82-94.
- 12- Jin K, Guo X, Tao J, Wang H, Kim N, Gu Y. A model of one-surface cyclic plasticity with Lemaitre damage criterion for plastic instability prediction in the incremental forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;114:88-97.
- 13- Ben Said L, Mars J, Wali M, Dammak F. Numerical prediction of the ductile damage in single point incremental forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;131-132:546-558.
- 14- Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;244:17-43.
- 15- Gatea S, Ou H, Lu B, McCartney G. Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;186:59-79.
- 16- Guzmán CF, Yuan S, Duchêne L, Saavedra Flores EI, Habraken AM. Damage prediction in single point incremental forming using an extended Gurson model. *International Journal of Solids and Structures*. 2018;151:45-56.
- 17- Basak S, Kumar Panda S. Failure strains of anisotropic thin sheet metals: Experimental evaluation and theoretical prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;151:356-374.