Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2551-2558

Determination of Process Window of St12 Steel Sheet in Single Point Incremental Forming of a Truncated Pyramid by Experimental Method

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Panahi Liavoli R.[1] *MSc,*
Bakhshi Jooybari M.*[1] *PhD,*
Gorji H.1 PhD, Mirnia M.J.[1] *PhD*

How to cite this article
Panahi Liavoli R, Bakhshi Jooybari M, Gorji H, Mirnia M.J. Determination of Process Window of St12 Steel Sheet in Single Point Incremental Forming of a Truncated Pyramid by Experimental Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2551-2558.

ABSTRACT

Incremental forming is considered as one of the rapid prototyping methods and has a high degree of flexibility and cost-effectiveness at low production volume. Meanwhile, the lack of technical knowledge has challenged the use of this method in the industry. One of the things that can help the actual usage of this process is the suitable process window; a window used to determine maximum tearing depth of the sheet with respect to the material, thickness and wall angle. In this study, firstly, the formability of low-carbon steel sheet, St12, with the thicknesses of 1.25 and 1.50 mm in single point incremental forming of a truncated pyramid with different constant wall angles has been investigated experimentally. Then, it is compared with the formability of the truncated pyramid with variable wall angles under two different wall geometries. Based on the experimental results, the process windows are presented in terms of the maximum depth and wall angle and compared to each other under different circumstances. The results showed that the critical wall angle for St12 sheet in incremental forming of a truncated pyramid with a fixed wall angle differs from the pyramid with variable wall angle, but doesn't depend on the size of the pyramid base. The critical wall angle for the fixed and variable wall angle pyramids was obtained 67^0 and 75^0, respectively. For a pyramid with a fixed wall angle, the thickness distribution of the wall is almost constant, while for a pyramid with a variable wall, it varies along the path.

Keywords Single Point Incremental Forming; Formability; Process Window; Low-Carbon Steel Sheet

[1]Mechanical Engineering Depatment, Advanced Material Forming Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Depatment, Advanced Material Forming Research Center, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Phone: +98 (11) 13234205
Fax: +98 (11) 32334201
bakhshi@nit.ac.ir

Article History
Received: May 6, 2018
Accepted: March 4, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

[1] Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool-a study of a numerical control forming system II [2] Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process [3] The formability of aluminum sheet in incremental forming [4] Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal [5] Forming limit curves in single point incremental forming [6] A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming [7] Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals [8] Suppression of necking in incremental sheet forming [9] Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming [10] Experimental formability investigation of titanium alloy in hot incremental sheet forming process [11] Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming [12] Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion [13] Ductile damage and deformation mechanics in multistage single point incremental forming

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

تعیین پنجره شکل‌دهی ورق فولادی St12 در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص به روش تجربی

روح‌اله پناهی لیاولی MSc
گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
محمد بخشی جویباری* PhD
گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
حمید گرجی PhD
گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
محمدجواد میرنیا PhD
گروه مهندسی مکانیک، مرکز پژوهشی فرآیندهای نوین شکل‌دهی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده
شکل‌دهی تدریجی نوعی از روش‌های نمونه‌سازی سریع به شمار می‌آید و از انعطاف پذیری و صرفه اقتصادی بالایی در حجم تولید کم برخوردار است. با این وجود، کمبود دانش فنی استفاده از این روش را در صنعت دچار چالش نموده است. از جمله مواردی که می‌تواند کمک شایانی در به کارگیری عملی این فرآیند نماید، پنجره فرآیندی مناسب است؛ پنجره‌ای که با استفاده آن بتوان حداکثر عمق پارگی ورق را با توجه به جنس، ضخامت و زاویه جداره شکل‌دهی، استخراج نمود. در این پژوهش، ابتدا شکل‌پذیری ورق فولادی کم‌کربن از جنس St12 با ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵۰میلی‌متر در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تکنقطه‌ای یک هرم ناقص با زوایای جداره ثابت مختلف، به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، با شکل‌پذیری هرم ناقص با زاویه جداره متغیر، تحت دو هندسه جداره متفاوت مقایسه شده است. براساس نتایج تجربی، پنجره‌های فرآیندی برحسب بیشترین عمق قابل شکل‌دهی در زاویه جداره مختلف ارائه شده و تحت شرایط متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که زاویه جداره بحرانی ورق St12 در شکل‌دهی هرم با زاویه جداره ثابت، متفاوت از هرم با زاویه جداره متغیر است، ولی به ابعاد قاعده هرم مورد بررسی بستگی چندانی ندارد. زاویه جداره بحرانی برای هرم با زاویه ثابت و متغیر به ترتیب تقریباً برابر با ۶۷ و ۷۵درجه به‌دست آمد. برای هرم با زاویه جداره ثابت، توزیع ضخامت روی جداره تقریباً ثابت است در حالی که برای هرم با زاویه جداره متغیر، توزیع ضخامت در طول مسیر تغییر می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، شکل‌پذیری، پنجره فرآیندی، ورق فولادی کم‌کربن

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۳
*نویسنده مسئول: bakhshi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

شکل‌دهی تدریجی (Incremental Forming) ورق‌های فلزی، یک فرآیند تغییر شکل موضعی بدون نیاز به سنبه، ماتریس و یا دیگر ابزار مخصوص می‌باشد. این فرآیند اولین بار به عنوان تکنولوژی شکل‌دهی بدون قالب، توسط *ماتسوبارا* در اوایل سال ۱۹۹۰ در کشور ژاپن معرفی شد؛ هر چند ایده اولیه آن در سال ۱۹۷۶ توسط *لیزاک* در ایالات متحده به ثبت رسیده بود[1]. فرآیند شکل‌دهی تدریجی با توجه به نحوه تماس ورق با ابزار شکل‌دهی، به دو روش شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای تقسیم می‌شود که در این پژوهش شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF) مورد توجه قرار گرفته است. قسمت زیرین ورق در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای خالی بوده و ابزار فقط از سمت بالا با ورق در تماس است و نیرو وارد می‌کند. شکل ۱ شماتیک شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای یک هرم ناقص با زاویه جداره ثابت ψ را نشان می‌دهد. زاویه جداره، زاویه‌ای است که جداره قطعه با سطح افق می‌سازد. چنانچه جداره، یک خط راست باشد در آن صورت با زاویه جداره ثابت (Fixed Wall Angel) و در صورتی که دارای انحنا باشد با زاویه جداره متغیر (Variable Wall Angel) محسوب می‌شود. در این فرآیند، ابتدا ورق با ضخامت اولیه t_0، روی مجموعه تکیه‌گاهی قرار داده می‌شود. جهت جلوگیری از خمش اضافی و برگشت فنری معمولاً در زیر ورق از یک صفحه پشتیبان بهره گرفته می‌شود. سپس لبه‌های ورق توسط ورق‌گیر روی صفحه پشتیبان محکم فشرده می‌شود. با حرکت یک ابزار سرکروی در یک مسیر از پیش تعیین‌شده، ورق به طور موضعی و تدریجی به هندسه مورد نظر تغییر شکل می‌یابد[2].

شیم و *پارک*[3] با بررسی شکل‌پذیری ورق آلومینیوم آنیل‌شده در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای دریافتند که منحنی حد شکل‌دهی به‌دست‌آمده، متفاوت از سایر روش‌های سنتی بوده و به صورت یک خط مستقیم با شیب منفی می‌باشد. *کیم* و *پارک*[4] با مطالعه پارامترهای فرآیند بر شکل‌پذیری ورق آلومینیوم در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای نشان دادند که میزان شکل‌پذیری در این فرآیند از سایر روش‌های شکل‌دهی متداول، بالاتر می‌باشد. *هام وجسویت*[5] تأثیر جنس و ضخامت ورق، شکل و اندازه ابزار و گام عمودی بر بیشترین زاویه جداره، کرنش‌های کمینه و بیشینه و کرنش مؤثر جداره سه نوع آلومینیم به روش عددی پاسخ سطح را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جنس ورق بیشترین تأثیر را بر شکل‌پذیری دارد. *حسین* و همکاران[6] با به‌کارگیری یک مخروط ناقص با زاویه جداره متغیر، روشی برای آزمون حد نازک‌شدگی ورق آلومینیومی ارائه دادند. آنها در این روش از یک قوس دایره‌ای برای مدل‌کردن جداره مخروط با زاویه متغیر استفاده کردند و سپس نتایج حاصل را با نتایج مربوط به مخروط ناقص در چند زاویه جداره ثابت و همچنین با هرم ناقص در دو زاویه جداره ثابت ۶۶ و ۶۶/۵درجه مقایسه کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که حد نازک‌شدگی قطعات با زاویه جداره ثابت، کمتر از قطعات با زاویه جداره متغیر می‌باشد. روش ارائه‌شده در پژوهش بالا نمی‌تواند عمق شکست را در زوایای جداره مختلف تعیین کند. از این رو، برای رسیدن به پنجره فرآیندی برحسب بیشترین عمق قابل شکل‌دهی در زوایای جداره ثابت مختلف تحقیقات دیگری لازم است.

سیلوا و همکاران[7] در یک کار تجربی به بررسی مکانیزم شکست در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیوم AA1050-H111 پرداختند. در این بررسی، قطعه‌های مخروطی و هرم ناقص، هر دو با زاویه جداره متغیر با استفاده از ابزار با قطرهای مختلف شکل داده شدند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در حالت استفاده از ابزار با قطر کمتر از حدود ۱۰میلی‌متر، گلویی موضعی قبل از شکست وجود ندارد. *سئونگ* و همکاران[8] با شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی تدریجی یک هرم ناقص برای آلومینیم و استخراج منحنی‌های حد شکل‌دهی براساس تنش، نشان دادند که حالت تنش‌های اصلی کمینه و بیشینه در راستای ضخامت تغییر می‌یابد که این امر منجر به حذف پدیده گلویی‌شدن در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای می‌شود و از این طریق شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. *کورا* و *رگالا*[9] به صورت عددی و تجربی شکل‌پذیری ورق فولادی فوق کشش را در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی کردند. در تحقیق یادشده از مخروط با زاویه جداره متغیر، تشکیل‌شده از مولدهای دایره‌ای، سهموی، بیضوی و

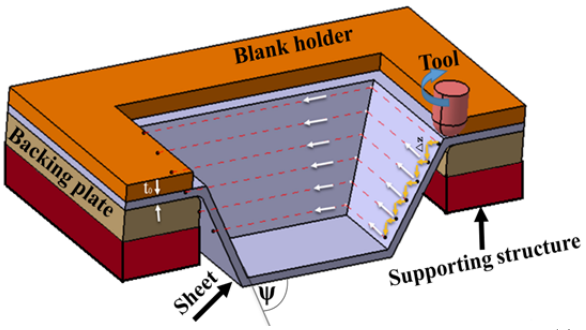
www.SID.ir

Archive of SID

توانی استفاده شده است. میانگین حداکثر زاویه جداره به‌دست‌آمده در این تحقیق ۷۵/۲۷درجه حداکثر انحراف زاویه شکست در استفاده از مولدهای مختلف ۴/۶درجه بوده است.

بارانی شولی و همکاران[10] به مطالعه تجربی حد شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیم در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گرم پرداختند و اثر پارامترهایی نظیر ضخامت اولیه، سرعت پیشروی و دورانی ابزار، گام عمودی و مقدار جریان عبوری را در شکل‌پذیری یک مخروط ناقص با زاویه جداره متغیر، مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با کاهش سرعت پیشروی، سرعت دورانی ابزار و گام عمودی و همچنین با افزایش ضخامت ورق، حداکثر زاویه شکل‌دهی ورق افزایش پیدا می‌کند. بررسی نازک‌شدگی در ناحیه جداره، یکی از روش‌هایی است که می‌تواند قابلیت شکل‌دهی ورق را در روش‌های تدریجی توصیف کند که بستگی به زاویه جداره دارد. *نیکدوز* و همکاران[11] شکل‌پذیری هرم ناقص آلومینیومی با زاویه جداره ۷۰درجه را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از استراتژی دو مرحله‌ای می‌توان ضخامت کمینه را به میزان دو برابر نسبت به حالت تک مرحله‌ای بهبود بخشید و از این طریق شکل‌پذیری ورق را افزایش داد. *میرنیا* و همکاران[12] با به‌کارگیری مدل اصلاح‌شده مور- کلمب به پیش بینی عددی شکست نرم در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق آلومینیوم AA6061-T6 پرداختند. در این بررسی هرم ناقص با زاویه جداره ثابت ۵۰درجه و همچنین زاویه جداره متغیر شکل‌دهی شد. نتایج نشان داد که حالت تنش و کرنش در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به شدت غیرخطی بوده که می‌تواند عاملی برای شکل‌پذیری بالا نسبت به روش‌های شکل‌دهی متداول باشد.

با توجه به مقالات مرورشده در بالا، منحنی حد شکل‌دهی در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای متفاوت از سایر فرآیندهای متداول می‌باشد. معمولاً شکل‌پذیری در این فرآیند برحسب بیشترین زاویه قابل شکل‌دهی و عمق شکست بیان می‌گردد و برای طراحی تعداد مراحل شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، بیشترین عمق قابل شکل‌دهی در یک زاویه جداره معین دارای اهمیت می‌باشد[13]. در مقاله حاضر، برای شکل‌دهی ورق در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص از فولاد St12 به روش زاویه جداره ثابت، از آنجایی که هندسه و زاویه جداره نسبت به آزمایش قبل از آن تغییر می‌کند، بررسی پنجره شکل‌دهی، امری ضروری به نظر می‌رسد. پنجره شکل‌دهی مذکور برای عمق پارگی در زوایای مختلف دیواره برای دو ضخامت و دو اندازه قاعده هرم به‌دست می‌آید. در تحقیقات گذشته، پنجره شکل‌دهی فرآیندی تعیین نشده است و تنها به تعیین زاویه حد شکل‌دهی با استفاده از قطعاتی با زاویه دیواره متغیر اکتفا شده است.



شکل ۱) شماتیک کلی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص

۲- مراحل تجربی

در این پژوهش، فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در تولید هرم ناقص با مقطع مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. این شکل از قطعه، می‌تواند به عنوان قالب مورد استفاده در صنایع غذایی، سینک ظرف‌شویی و قطعات فلزی چهارگوش دارای زاویه دیواره از صفر تا ۹۰درجه مورد استفاده قرار گیرد. شکل قطعه‌کار نمونه دارای ابعادی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای قاعده بزرگ هرم، دو اندازه L (۱۰۰ و ۱۳۰میلی‌متر) و برای قاعده کوچک آن ابعاد ۱۶×۱۶میلی‌متر مربع انتخاب شد. زاویه جداره ثابت قطعه‌کار نیز از ۶۰ تا ۷۱درجه متغیر در نظر گرفته شد. جنس ورق، فولاد کم‌کربن St12 و با ضخامت‌های اولیه ۱/۲۵ و۱/۵۰میلی‌متر می‌باشد. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی ورق‌ها، ورق با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر، مطابق با استاندارد ASTM E8M-04 تحت آزمایش کشش تک محوری قرار گرفت که نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. تجهیزات مورد نیاز در این پژوهش، شامل یک ابزار ساده سرکروی، مجموعه تکیه‌گاهی مخصوص نگهداری ورق و یک فرز سی‌ان‌سی سه محوره می‌باشد. شکل ۳، ابزار سرکروی را در حالت نصب‌شده روی ابزارگیر نشان می‌دهد. ابزار سرکروی مورد استفاده از جنس کاربید تنگستن و به قطر ۱۶میلی‌متر است. در شکل ۴، مجموعه تکیه‌گاهی، صفحه پشتیبان و ماشین فرز به‌کاررفته، نشان داده شده است. جهت انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، ابتدا ورق با ابعاد ۲۱۰×۲۱۰میلی‌متر مربع برش‌کاری می‌شود و روی صفحه پشتیبان قرار می‌گیرد. صفحه پشتیبان یک صفحه فولادی مربعی‌شکل به ابعاد ۲۱۰×۲۱۰میلی‌متر مربع و به ضخامت ۸میلی‌متر است که حفره مربعی‌شکل به ابعاد ۱۱۵×۱۱۵میلی‌متر مربع در داخل آن ایجاد شده است. جهت جلوگیری از پارگی ورق، همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، لبه‌های تیز محل تماس صفحه پشتیبان با ورق با شعاع ۳/۵میلی‌متر و همچنین گوشه‌های آن با شعاع ۸میلی‌متر گرد شده است. پس از آن، لبه‌های ورق توسط ورق‌گیر و با استفاده از ۸ عدد پیچ و با گشتاوری معادل ۳۵نیوتن متر به ازای هر پیچ محکم می‌شود. گشتاور یادشده با روش آزمون و خطا به‌دست آمد. چنانچه میزان گشتاور از این مقدار کمتر باشد، ورق دچار چروکیدگی می‌شود. در گشتاورهای بالاتر از این مقدار نیز، قطعه سالم به‌دست می‌آید که البته ضرورتی به انجام آن نیست. مجموعه نگهدارنده روی میز دستگاه فرز سی‌ان‌سی سه محوره مدل FP4MB ماشین‌سازی تبریز نصب می‌شود. برای کاهش اصطکاک بین ورق و ابزار در حین کار از روغن هیدرولیک ASE46 شرکت نفت بهران استفاده شده است. مسیر حرکت ابزار با استفاده از نرم‌افزار پاورمیل به صورت مارپیچ با گام عمودی ۰/۵میلی‌متر تهیه شده است. نرخ پیشروی ابزار ۱۲۰۰میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دوران اسپیندل ۳۰۰دور بر دقیقه تعیین گردید.

برای رسم پنجره فرآیندی (Process window)، آزمون‌های تجربی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با ابعاد قاعده مختلف L و با زاویه جداره ثابت Ψ انجام شده است. اندازه زاویه جداره ثابت از طریق تغییر در ارتفاع هرم قابل دسترسی است. در هر آزمون، شکل‌دهی تا لحظه پارگی ادامه یافت و عمق پارگی ثبت شد. برای اطمینان بیشتر به نتایج تحقیق، برای هر زاویه جداره، حداقل ۴ آزمایش انجام شده است. سپس شکل‌پذیری هرم ناقص با زاویه جداره متغیر مطابق شکل ۵ جهت مقایسه مورد بررسی قرار گرفت. این روش برای کم‌کردن تعداد آزمایشات در بررسی زاویه حد شکل‌پذیری در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای توصیه شده است[9]

www.SID.ir

Archive of SID

منحنی مولد (Generatrix) مورد استفاده در این بررسی از نوع دایره‌ای می‌باشد که انحنای جداره آن با توجه به ابعاد قاعده، دو دسته هرم ناقص با زاویه جداره ثابت، در نظر گرفته شده است. برای هرم با زاویه جداره متغیر، از شعاع دایره ۱۹۸میلی‌متر برای قاعده هرم ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع و از شعاع دایره ۲۶۷میلی‌متر برای قاعده هرم ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع استفاده گردید. با داشتن عمق پارگی و با استفاده از رابطه هندسی [5]۱، می‌توان زاویه شکست ψ_p را در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم با زاویه جداره متغیر به‌دست آورد.

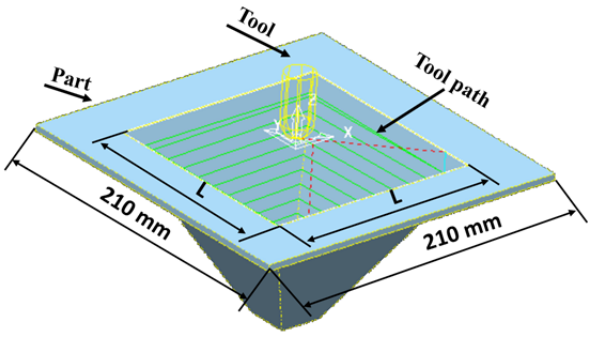
$$\psi_p = \cos^{-1}\left(\frac{Yp}{R}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{L-h}{R}\right) \quad (1)$$

در این رابطه Y_P فاصله عمودی نقطه شکست تا کف هرم، R شعاع قوس جداره هرم ناقص با زاویه جداره متغیر، h عمق شکست و L ارتفاع هرم ناقص است که در این جا به ترتیب در دو مدل ۱۲۲ و ۱۶۵میلی‌متر می‌باشد.

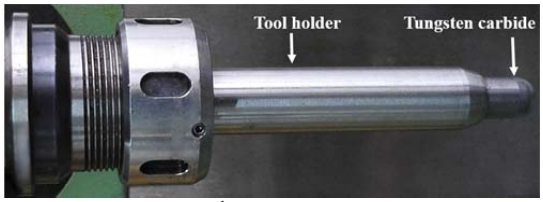
بعد از انجام آزمایشات تجربی، قطعات شکل داده شده، در مسیرهای مختلف ۴۵ و ۹۰درجه نسبت به محور تقارن قطعه کار با استفاده از وایرکات برش داده شده و ضخامت ورق در مقاطع برش‌خورده با استفاده از ضخامت‌سنج مکانیکی با دقت ۰/۰۱میلی‌متر اندازه گیری شد.

جدول ۱) خواص مکانیکی ورق St12 با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر

خاصیت	مقدار
چگالی (kg/m^3)	۲۸۳۰
مدول الاسیسیته (GPa)	۲۱۰
تنش تسلیم (MPa)	۱۸۵
ضریب پواسون	۰/۳۳
توان کرنش سختی n	۰/۲۹
ضریب استحکام K (MPa)	۵۹۹
تنش نهایی (MPa)	۴۵۰
درصد ازدیاد طول (%)	۴۰
خواص ناهمسانگردی	
$\bar{r}$	۱/۳۸
r_0	۱/۷۰
r_{90}	۱/۳۲
r_{45}	۱/۱۸

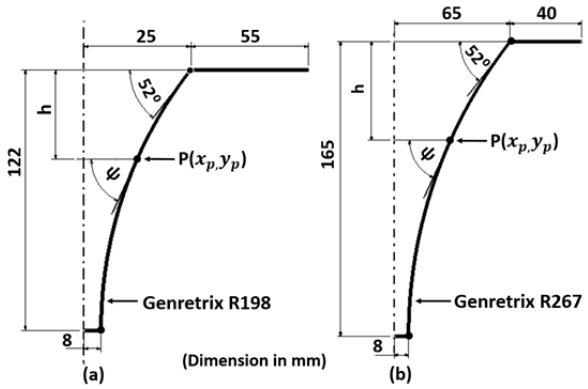


شکل ۲) شکل قطعه نهایی، ابزار و مسیر حرکت ابزار در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص



شکل ۳) ابزار سرکروی از جنس کاربید تنگستن، نصب شده بر روی ابزارگیر و اسپیندل دستگاه

شکل ۴) تجهیزات به‌کاررفته برای فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص شامل مجموعه تکیه‌گاهی، صفحه پشتیبان و ماشین فرز سی‌ان‌سی



شکل ۵) دو هرم ناقص با زاویه جداره متغیر با ابعاد مختلف به‌صورت نیم‌نما الف) قاعده هرم ۱۰۰×۱۰۰میلی‌مترمربع، شعاع قوس ۱۹۸میلی‌متر ب) قاعده هرم، ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع، شعاع قوس ۲۶۷میلی‌متر

۳ – نتایج و بحث

۳-۱- پنجره فرآیندی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره ثابت

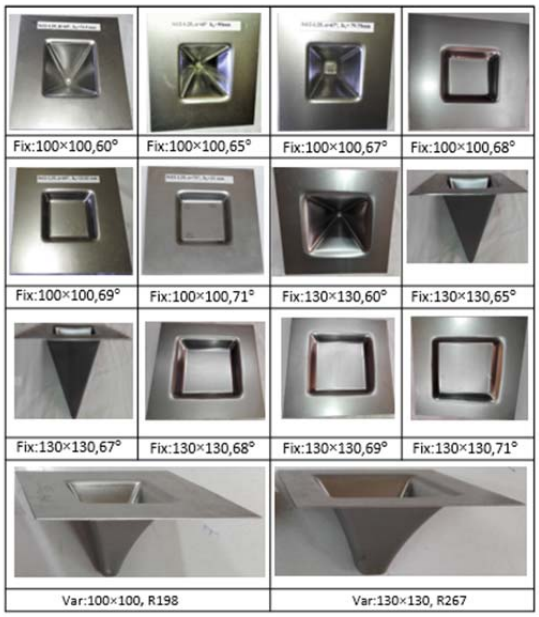
نمونه‌هایی از قطعات شکل‌داده‌شده هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع و ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع، ضخامت ورق ۱/۲۵میلی‌متر و با زاویه‌های جداره ثابت ۶۰، ۶۵، ۶۷، ۶۸، ۶۹ و ۷۱درجه در شکل ۶ نشان داده شده است. بیشترین عمق شکل‌دهی به‌دست‌آمده در نمونه‌ها، برای هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع مربوط به زاویه جداره ۶۷درجه و به عمق ۹۸/۵میلی‌متر و همچنین کمترین عمق، متعلق به زاویه جداره ۷۱درجه و به عمق ۱۸/۹میلی‌متر می‌باشد. عمق پارگی به‌دست‌آمده در هر زاویه جداره ثابت برای نمونه‌های با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع و ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع برای ۴ تکرار به صورت نمودار خطی به همراه میله خطا (Error Bar) به‌ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. از آن جایی که عمق شکست به‌دست‌آمده در ۴ تکرار به هم نزدیک هستند، میله خطا به جز در چند زاویه، در بقیه موارد کوتاه است. میانگین عمق پارگی ورق با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر نسبت به زاویه جداره برای دو دسته هرم ناقص با ابعاد قاعده مختلف در نمودار ۳ با هم مقایسه شده است. در هر دو نمودار یک روند مشترک وجود دارد؛ در زوایای کمتر از ۶۷درجه پارگی اتفاق نمی‌افتد، شکل‌دهی به‌طور کامل انجام می‌شود و عمق شکل‌دهی تابعی از هندسه قطعه است. حال چون در دسته دوم هندسه بزرگتر انتخاب شده است، عمق شکل‌دهی هم بیشتر می‌شود. بنابراین، منحنی مربوط به آن بالاتر قرار می‌گیرد،

www.SID.ir

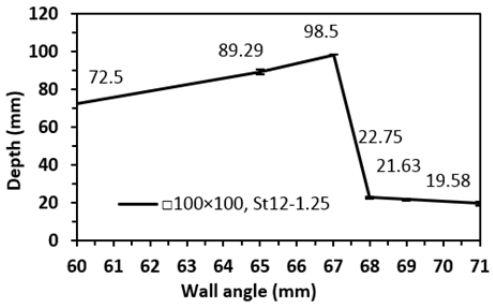
Archive of SID

ولی از ۶۷درجه به بعد، شکل‌دهی در عمق کمتری اتفاق می‌افتد. زاویه حد شکل‌دهی برای هر دو دسته هرم با ضخامت یکسان ولی ابعاد قاعده مختلف ۶۷درجه بوده و به ابعاد بستگی ندارد.

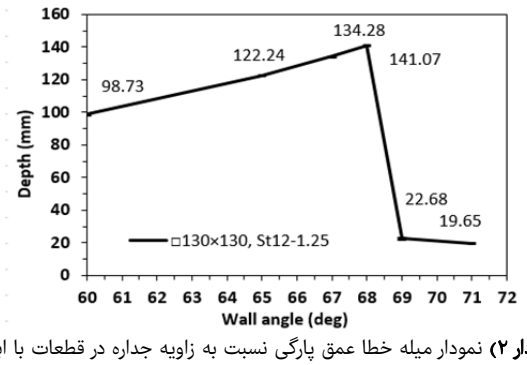
عمق پارگی هرم ناقص از ورق با ضخامت ۱/۵میلی‌متر و با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰ و ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع در زوایای جداره ثابت ولی مقادیر مختلف برای ۴ تکرار به صورت نمودار خطا در نمودارهای ۴ و ۵ نشان داده شده است و میانگین عمق پارگی برای این دو ابعاد قاعده مختلف هرم ناقص در نمودار ۶ با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای این ضخامت هم، زاویه حد شکل‌دهی ۶۷درجه می‌باشد و از آن به بعد، شکست در عمق کمتری اتفاق می‌افتد، به‌طوری که می‌توان گفت که تقریباً امکان شکل‌دهی با زاویه جداره ۹۰درجه در این روش وجود ندارد.



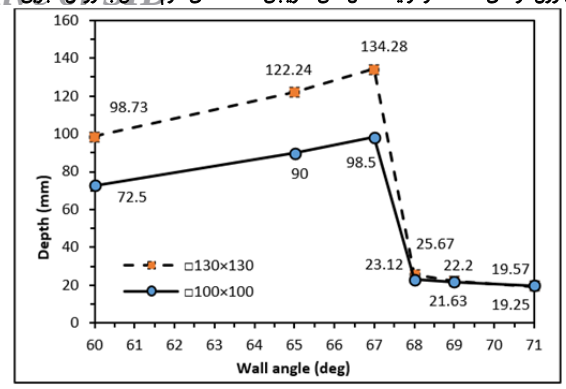
شکل ۶) نمونه‌های شکل‌داده‌شده هرم ناقص با زاویه جداره ثابت و متغیر



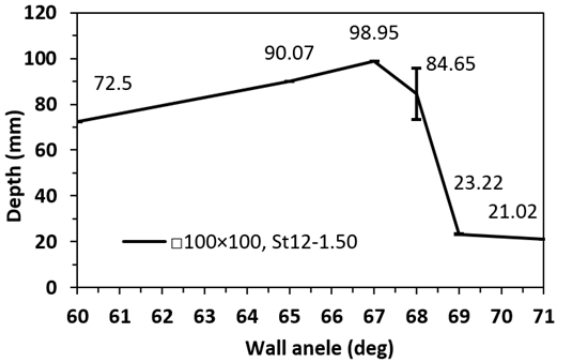
نمودار ۱) نمودار میله خطا عمق پارگی نسبت به زاویه جداره در قطعات با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع از جنس St12 با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر



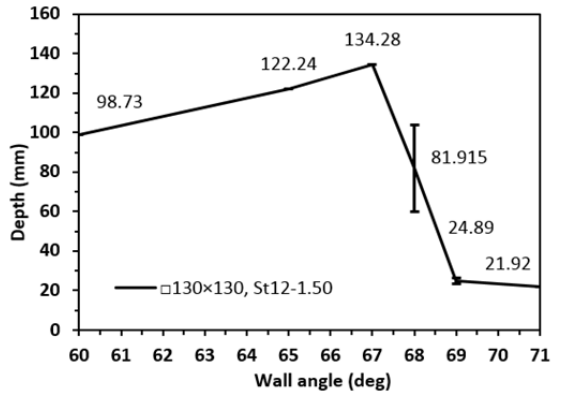
نمودار ۲) نمودار میله خطا عمق پارگی نسبت به زاویه جداره در قطعات با ابعاد قاعده ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع از جنس St12 با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر



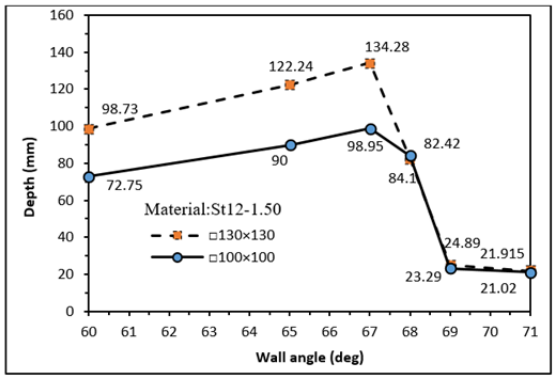
نمودار ۳) مقایسه میانگین عمق پارگی ورق St12 با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر نسبت به زاویه جداره ثابت در هرم ناقص با ابعاد قاعده مختلف ۱۰۰ و ۱۳۰میلی‌متر



نمودار ۴) نمودار میله خطا عمق پارگی نسبت به زاویه جداره در قطعات با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع از جنس St12 با ضخامت ۱/۵میلی‌متر



نمودار ۵) نمودار میله خطا عمق پارگی سبت به زاویه جداره در قطعات با ابعاد قاعده ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع از جنس St12 با ضخامت ۱/۵میلی‌متر



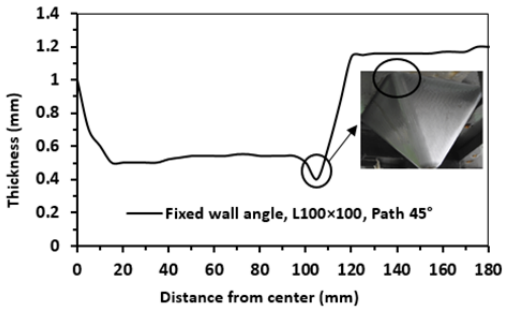
نمودار ۶) مقایسه میانگین عمق پارگی ورق St12 با ضخامت ۱/۵میلی‌متر نسبت به زاویه جداره ثابت در هرم ناقص با ابعاد قاعده مختلف ۱۰۰ و ۱۳۰میلی‌متر

www.SID.ir

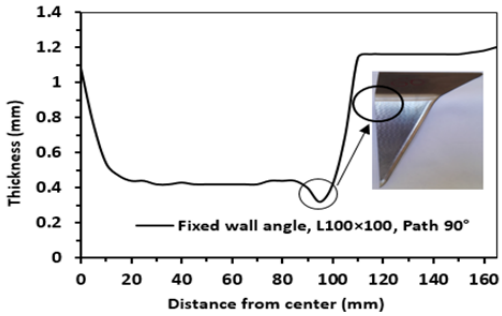
Archive of SID

نمودارهای توزیع ضخامت نمونه برش‌داده‌شده با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع و زاویه جداره ثابت، ۶۷درجه در نمودارهای ۷ و ۸ و به ترتیب برای راستاهای ۴۵ و ۹۰درجه نشان داده شده است. در این زاویه جداره، هرم ناقص به‌طور کامل شکل گرفته و در هر دو مسیر ذکر شده، ضخامت در کل جداره تقریباً یکسان و ثابت می‌باشد که محل حداکثر نازک‌شدگی قطعه در نمودارها مشخص شده است.

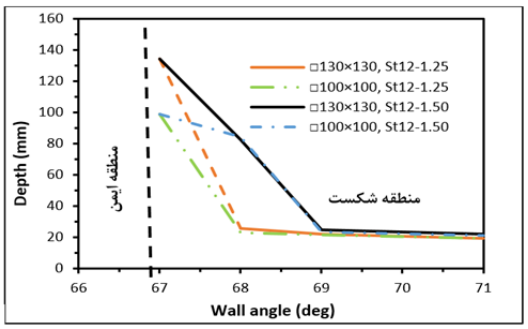
میانگین عمق شکل‌دهی برای زوایای جداره مختلف به‌دست‌آمده از این آزمایشات به صورت یک پنجره شکل‌دهی برای هر یک از مواد مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق در نمودار ۹ آورده شده است. با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده می‌توان گفت که زاویه حد شکل‌دهی برای ورق فولادی St12 با ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره ثابت، حدود ٦٧درجه می‌باشد. شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص تا محدوده زاویه حد شکل‌دهی به‌طور کامل انجام می‌گیرد و از آن به بعد در عمق کمتری نسبت به عمق طراحی‌شده صورت می‌گیرد. این محدوده در پنجره شکل‌دهی با یک خط منقطع تفکیک شده است. سمت چپ این خط به‌صورت ناحیه ایمن و همچنین سمت راست آن به‌صورت ناحیه شکست مشخص شده است.



نمودار ۷) توزیع ضخامت از هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع، زاویه جداره ثابت ۶۷درجه و جهت برش ۴۵درجه



نمودار ۸) توزیع ضخامت از هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع، زاویه جداره ثابت ۶۷درجه و جهت برش ۹۰درجه



نمودار ۹) شکل‌دهی فرآیندی تجربی ورق St12 در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره ثابت

۳-۲- پنجره فرآیندی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره متغیر

نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰ و ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع و با زاویه جداره متغیر در شکل ۶ نشان داده شده است. برای این دسته از قطعات، شکل‌دهی در راستای مسیر منحنی انجام شده است و برای هر ضخامت و ابعاد قاعده هرم، دو بار تکرار شده است. عمق پارگی در هر آزمایش (h1, h2)، میانگین عمق پارگی ($\overline{h}$) و زاویه حد شکست به‌دست‌آمده برای این دو ضخامت در جدول ۲ آورده شده است. زاویه حد شکست با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. زاویه حد شکست در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع در حالت استفاده از قوس با شعاع ۱۹۸میلی‌متر برای ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر، به ترتیب ۷۶/۲۰ و ۷۶/۳۰درجه و در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع در حالت استفاده از قوس با شعاع ۲۶۵میلی‌متر برای ضخامت ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر، به ترتیب ۷۵/۵۵ و ۷۵/۷۵درجه می‌باشد. در این روش، شکل‌دهی تا عمق متناسب با زاویه حد شکل‌دهی به‌طور معمول پیش می‌رود و بعد از پارگی ورق در این عمق، ادامه کار بررسی عمق شکست در زاویه جداره بزرگتر، در این روش مقدور نیست. این یک روش راحت، کم هزینه، سریع و حتی با یک تست تجربی قابل انجام است. ولی قادر به پیش‌بینی عمق شکست در زاویه بزرگتر از زاویه حد شکل‌دهی نیست؛ بنابراین، پنجره شکل‌دهی مانند روش جداره ثابت قابل دستیابی نیست.

جدول ۲) عمق پارگی نمونه‌های مختلف در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره متغیر و با ابعاد قاعده هرم ۱۰۰×۱۰۰ و ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع

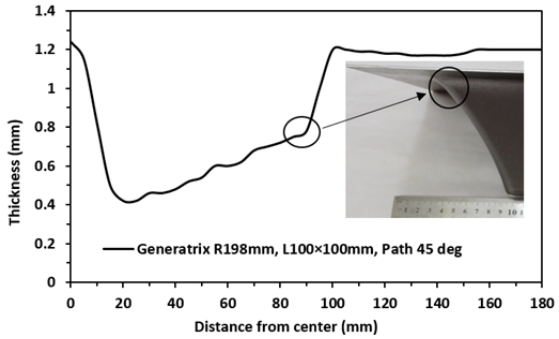
ابعاد قاعده (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	h1 (میلی‌متر)	h2 (میلی‌متر)	$\overline{h}$ (میلی‌متر)	زاویه جداره (درجه)
۱۰۰×۱۰۰	۱/۲۵	۷۳/۵۷	۷۵/۸۵	۷۴/۷۱	۷۶/۲۰
۱۰۰×۱۰۰	۱/۵۰	۷۵/۴۴	۷۴/۷۴	۷۵/۰۹	۷۶/۳۰
۱۳۰×۱۳۰	۱/۲۵	۹۸/۳۱	۹۸/۴۰	۹۸/۳۴	۷۵/۵۵
۱۳۰×۱۳۰	۱/۵۰	۹۸/۰۵	۱۰۰/۳۴	۹۹/۲۰	۷۵/۷۵

همان‌طور که در نتایج آمده است، ابعاد و شعاع انحنای جداره ظرف یا ضخامت ورق، تأثیر چندانی در اندازه زاویه شکست ندارد. نکته قابل توجه این است که در این روش زاویه حد شکست خیلی بیشتر از روش قبل است که علت آن می‌تواند خم‌های موجود در جداره باشد که می‌تواند به شکل‌دهی آن کمک کند.

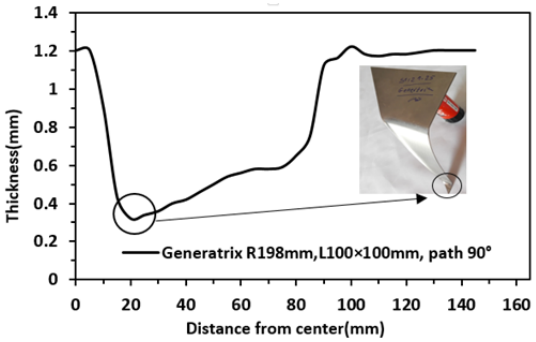
نمودار توزیع ضخامت از شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع، با زاویه جداره متغیر و با شعاع ۱۹۸میلی‌متر و ارتفاع هرم ۱۲۲میلی‌متر در راستای ۴۵ و ۹۰درجه در طول مسیر برش داده شده در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. توزیع ضخامت در حالت زاویه جداره متغیر، در هر دو راستای ۴۵ و ۹۰درجه نرمال‌تر و نسبت به زاویه جداره ثابت نمودارهای ۷ و ۸ از یک شیب ملایمی برخوردار است. ضخامت کمیته در راستای ۴۵ و ۹۰درجه به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۳۲میلی‌متر درحداکثر زاویه شکل‌دهی و در محلی است که پارگی در آن اتفاق می‌افتد. در حالی که توزیع ضخامت در حالت زاویه جداره ثابت، در هر دو راستای ۴۵ و ۹۰درجه تقریباً ثابت و مطابق با قانون سینوسی است. ضخامت کمیته در راستای ۴۵ و ۹۰درجه حالت جداره ثابت به ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۳۲میلی‌متر و در ابتدای جداره می‌باشد که در نمودارهای ۷ و ۸ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



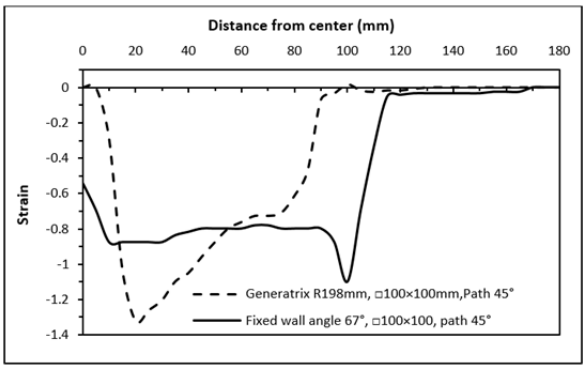
نمودار ۱۰) توزیع ضخامت از هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع، با زاویه جداره متغیر با شعاع ۱۹۸میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۲میلی‌متر و درجهت برش ۴۵درجه



نمودار ۱۱) توزیع ضخامت از هرم ناقص با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع، زاویه جداره متغیر با شعاع ۱۹۸میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۲میلی‌متر در جهت برش ۹۰درجه

۳-۳- مقایسه توزیع کرنش در شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای هرم ناقص با زاویه جداره ثابت با متغیر

کرنش‌های تجربی به‌دست‌آمده در راستای ضخامت ورق St12 با ضخامت ۱/۲۵میلی‌متر برای هرم ناقص شکل‌داده‌شده با ابعاد قاعده ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع در حالت زاویه جداره ثابت ۶۷درجه و زاویه جداره متغیر با شعاع جداره ۱۹۸میلی‌متر در راستای ۴۵درجه در نمودار ۱۲ با هم مقایسه شده است. در واقع، وقتی که از جداره با زاویه متغیر استفاده می‌شود، کرنش‌های در راستای ضخامت در طول مسیر یکنواخت‌تر و از یک شیب ملایم برخوردار هستند که همین علت می‌تواند عامل مهمی در شکل‌دهی بهتر قطعه در روش زاویه جداره متغیر باشد.



نمودار ۱۲) مقایسه توزیع کرنش تجربی به‌دست آمده در هرم ناقص با زاویه جداره ثابت و متغیر در راستای ۴۵ درجه

٤- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر شکل‌پذیری ورق فولادی کم‌کربن از جنس St12 با ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در قطعاتی به فرم هرم ناقص با زوایای جداره ثابت مختلف به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت و با شکل‌پذیری هرم ناقص با زاویه جداره متغیر، تحت دو هندسه جداره متفاوت مقایسه شد. همچنین پنجره فرآیندی شکل‌دهی براساس مقدار عمق پارگی ورق در زاویه جداره ثابت مختلف در ناحیه شکست تعیین شد.

خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱- زاویه حد شکل‌دهی به‌دست‌آمده برای شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق St12 در قطعاتی به فرم هرم ناقص با زاویه جداره ثابت و با ابعاد قاعده بزرگ ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع برای ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر، به ترتیب ۶۶ و ۶۷درجه و در قطعاتی به فرم هرم ناقص با ابعاد قاعده بزرگ ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع برای ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر، به ترتیب ۶۶/۵ و ۶۸درجه می‌باشد.

۲- زاویه حد شکل‌دهی به‌دست‌آمده برای شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق St12 در قطعاتی به فرم هرم ناقص با زاویه جداره متغیر با ابعاد قاعده بزرگ ۱۰۰×۱۰۰میلی‌متر مربع برای ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر به ترتیب، ۷۶/۲۰ و ۷۶/۳۱درجه در قطعاتی به فرم هرم ناقص با ابعاد قاعده بزرگ ۱۳۰×۱۳۰میلی‌متر مربع برای ضخامت‌های ۱/۲۵ و ۱/۵میلی‌متر، به ترتیب ۷۵/۵ و ۷۵/۷۳درجه می‌باشد که اختلاف آن با حالت جداره ثابت حدود ۱۰% است.

۳- روش محاسبه زاویه حد شکل‌دهی با روش زاویه جداره ثابت نسبت به زاویه جداره متغیر، از دقت بیشتری برخوردار است. هر چند که این روش نیاز به زمان، هزینه و تعداد قطعات بیشتری دارد.

٤- در هر دو روش زاویه جداره ثابت و متغیر، ابعاد قاعده هرم تأثیر خیلی زیادی روی زاویه حد شکست ندارد. همچنین، ابعاد و شعاع انحنای منحنی جداره قطعه در روش زاویه جداره متغیر، تأثیر چندانی در اندازه زاویه شکست ندارند.

۵- در صورت استفاده از هرم با زاویه جداره متغیر، توزیع کرنش در راستای ضخامت یکنواخت‌تر خواهد شد، لذا در صورت نداشتن محدودیت زاویه جداره ظرف، کاربرد قطعاتی به فرم هرم ناقص با زاویه جداره متغیر در صنعت پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تاییدیه اخلاقی: این نتایج حاصل پژوهش نویسندگان بوده و تاکنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانس دیگری چاپ نشده است و در دست بررسی نیز نیست.
تعارض منافع: در این مقاله تعارض منافع با هیچ شخصیت حقوقی و حقیقی وجود ندارد.
سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Matsubara S. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool-a study of a numerical control forming system II. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. 1994;35(406):1311-1316.
2- Kim TJ, Yang DY. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. International Journal of Mechanical Sciences. 2000;42(7):1271-1286.
3- Shim MS, Park JJ. The formability of aluminum sheet in

www.SID.ir

Archive of SID

incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. 2001;113(1-3):654-658.
4- Kim YH, Park JJ. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:42-46.
5- Ham M, Jeswiet J. Forming limit curves in single point incremental forming. CIRP Annals. 2007;56(1):277-280.
6- Hussain G, Gao L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007;47(3-4):419-435.
7- 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(9-12):893-903.
8- 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.
9- Kurra S, Regalla SP. Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming. Journal of Materials Research and Technology. 2014;3(2):158-171.
10- Barani Shooli A, Amini Najafabadi S, Farzin M. Experimental formability investigation of titanium alloy in hot incremental sheet forming process. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(6):107-114. [Persian]
11- Nikdooz AH, Mirnia MJ, Baseri H. Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(5):210-220. [Persian]
12- 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.
13- 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.

www.SID.ir