Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 881-884
DOI: 10.22060/mej.2020.18321.6797

Experimental and numerical investigation of the plastic deformation of metallic bipolar plates with serpentine flow filed

H. Talebi-Ghadikolaee[a], M. M. Barzegari[b *]

A. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
B. Northern Research Center for Science and Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this study, plastic deformation of the metallic bipolar plate with serpentine flow field was investigated during stamping process. Strain path and thickness distribution in 304 stainless steel bipolar plate with the thickness of 0.1 mm were determined. To this aim, the process was simulated by the commercial finite element code. The validity of the result was evaluated by comparing the experimental and numerical thickness distribution and force-displacement curve which represent 4.76 and 3.85% prediction error, respectively. According to the results, flow of the material has significant effect on the thickness distribution of the central and lateral channels, and the thickness reduction percentage of the central channel in longitudinal, diagonal and transverse direction is much more than that of lateral one. Maximum thickness reduction (critical area) in central channels is placed in longitudinal direction (33% at channel side) while the diagonal direction is considered as critical direction for lateral channels. Due to the existence of the equibiaxial tension strain path in diagonal direction, significant thickness reduction is observed in both the side and the rib zone of the channels.

Review History:

Received: Apr. 25, 2020
Revised: Aug. 01, 2020
Accepted: Oct. 25, 2020
Available Online: Nov. 07, 2020

Keywords:

Fuel cell
Metallic bipolar plate
Metal forming
Thickness distribution
Strain path.

1- Introduction

Clean and renewable energy sources are one of the main alternatives to fossil fuels in various industries. Fuel cells are one of the types of clean and renewable electrochemical energy sources that convert energy from chemical reactions directly into electrical energy.

Due to the higher efficiency and lower pollution of fuel cells compared to internal combustion engines, they have been widely used in the transportation industry [1]. They are composed of various components such as Gas Diffusion Layer (GDL), catalyst layer, Bipolar Plate (BP), and end plates [1-3]. Since bipolar plates make up a significant percentage of the weight and marginal cost of fuel cell [4], considerable research has been carried out on the selection of the material and the appropriate process for the production of bipolar plates. Due to their desirable mechanical properties and high electrical conductivity, Metallic Bipolar Plate (MBP) have received more attention than most of the other types of BPs [5]. Various methods have been used for manufacturing MBPs. Among these methods, stamping process has received much attention due to its process simplicity, high production speed.

In the present study, the stamping process of SS304 bipolar plates with a parallel-serpentine pattern is investigated. Due to the variation of deformation mechanics in different location of the MBPs with serpentine flow field, this study aimed to explore the effect of number of micro-channels on the trend of thickness distribution in different directions. The strain path in the critical areas and its effect on the thickness distribution were determined.

2- Methodology

In the present study, the plasticity behavior of the stainless SS304 sheet with a thickness of 0.1 mm was identified using uniaxial tensile tests. In order to obtain a reliable stress-strain relationship beyond necking, the swift law was adopted. The results are shown in Fig. 1.

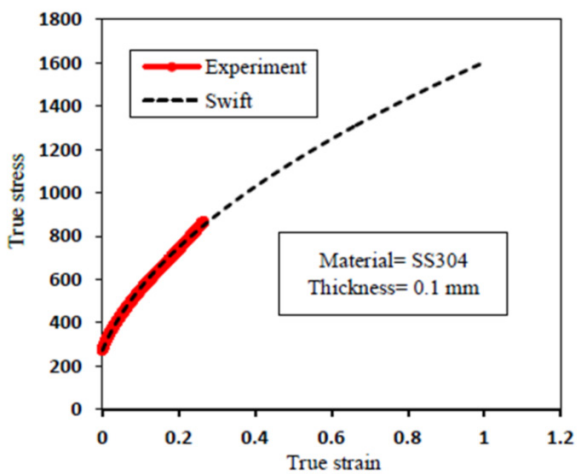


Fig. 1. True stress-strain curve and calibrated swift law results

*Corresponding author's email: barzegari@mut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

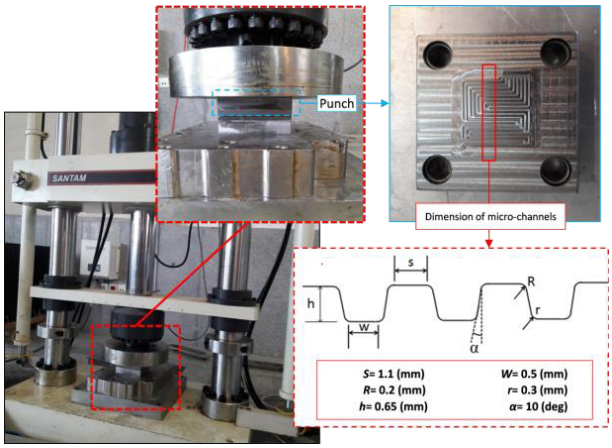


Fig. 2. Dimension of the metallic bipolar plates' micro channel together with experimental equipment.

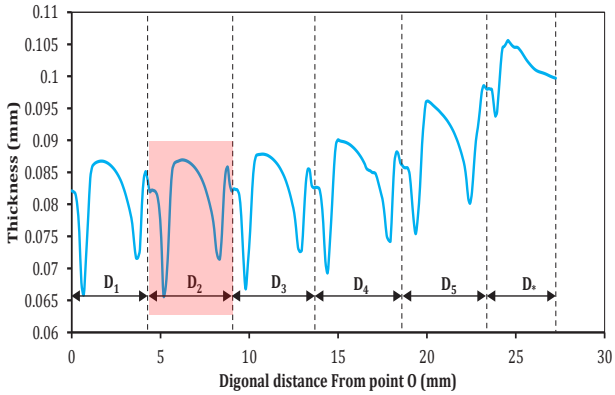


Fig. 4. Thickness distribution in diagonal direction

The stamping process was used to form a 0.1mm-thick steel sheet and produce SS304 MBPs. The micro-channels with rib and channel widths of 1.1 and 0.5 mm, respectively, were investigated in this study. Parameters such as inner radius (r) and outer corner radius (R) were equal to 0.3 and 0.2 mm, respectively, and draft angles were equal to 10°. The die, press, and dimensions of the micro-channels are shown in Fig. 2. Moreover, ABAQUS finite element commercial code was used to simulate the process. Punch and die were rigidly modeled. The sheet was modeled shell-like and deformable. The displacement boundary condition was applied to the punch while the die was bound in all directions. Surface-to-surface contact conditions were used to define the interaction between the punch, die, and sheet metal.

The die, press, and dimensions of the micro-channels are shown in Fig. 2. Moreover, ABAQUS finite element commercial code was used to simulate the process. Punch and die were rigidly modeled. The sheet was modeled shell-like and deformable. The displacement boundary condition was applied to the punch while the die was bound in all directions. Surface-to-surface contact conditions were used to define the interaction between the punch, die, and sheet metal.

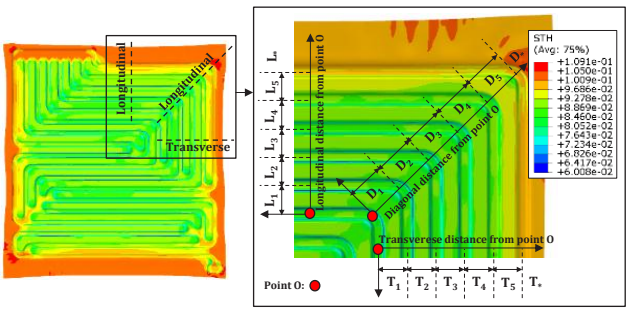


Fig. 3. Longitudinal, diagonal, and transverse direction together with divided area

3- Results and Discussion

In this research, since the MBP forming with serpentine flow field pattern has been thoroughly investigated, it is important to determine the metal flow in different regions (lateral and middle regions). For this purpose, the thickness distribution in different channels along longitudinal, transversal, and diagonal directions was investigated. The position of the investigated channels is shown in Fig. 3.

The thickness variations in different channels in the diagonal direction are shown in Fig. 4. In this case, the thickness reduction in the lateral channels (D5) is also less than the middle channels (D1). Under these conditions, feeding sheet metal from the non-critical areas (D*) toward the lateral channels also improves the thickness distribution. The effect of sheet flow from the outer regions on the thickness distribution in the diagonal direction only affects the three initial channels (D5 to D3), and in the subsequent channels, the maximum thinning percentage and thickness changes will be the same. Furthermore, the thickness distribution non-uniformity in each channel is greater in the diagonal direction than in the longitudinal direction. To quantitatively evaluate the thickness reduction in different directions and to determine the critical direction, the thinning percentage based on the minimum thickness created in each area is calculated and shown in Fig. 5.

According to the results, the thinning percentage increases in all directions as it moves from the external channels to the internal channels. The thinning percentage in the outer channels in the diagonal, longitudinal, and transversal directions is 6.2, 3.9, and 2.3%, respectively. In the middle channels in the directions above, these are 34.1%, 36%, and 38.6%, respectively. In the lateral regions, due to the strain caused by the corner radius (serpentine (helix) curvature), the amount of thinning in the diagonal direction (critical area in the lateral channels) is greater than in the other two directions.

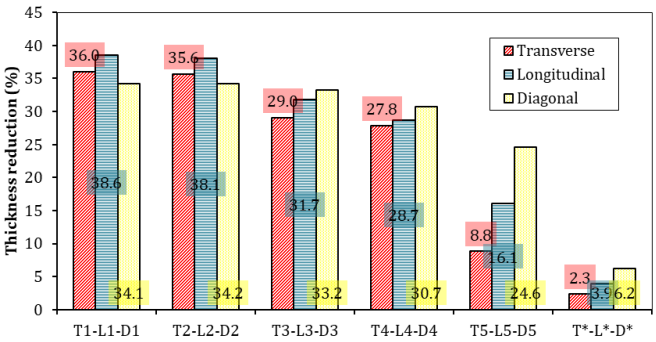


Fig. 5. Maximum thinning percentage in various directions

4- Conclusions

The results of this study showed that thickness of the specimen increase in the lateral area. The effect of sheet flow on the thickness distribution is visible in the three lateral channels and will not have a significant effect on the other channels. The thinning percentage in diagonal, transversal and longitudinal directions in plates formed to 0.65mm depth is 34.1%, 36%, and 38.6%, respectively. The highest thinning percentage occurs in SS304 MBPs in the longitudinal direction. Also, the use of a lubricant improves thickness distribution in SS304 bipolar plates

References

[1] K. Yao, K. Karan, K. McAuley, P. Oosthuizen, B. Peppley, T. Xie, A review of mathematical models for hydrogen and direct methanol polymer electrolyte membrane fuel cells, Fuel cells, 4(1-2) (2004) 3-29.

[2] M.M. Barzegari, M. Dardel, E. Alizadeh, A. Ramiar, Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H2/O2 PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator, Applied energy, 177 (2016) 298-308.

[3] E. Alizadeh, M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S. Saadat, Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack, International Journal of Hydrogen Energy, 41(4) (2016) 3062-3071.

[4] R. Silva, D. Franchi, A. Leone, L. Pilloni, A. Masci, A. Pozio, Surface conductivity and stability of metallic bipolar plate materials for polymer electrolyte fuel cells, Electrochimica Acta, 51(17) (2006) 3592-3598.

[5] J.-C. Hung, T.-C. Yang, K.-c. Li, Studies on the fabrication of metallic bipolar plates—Using micro electrical discharge machining milling, Journal of Power Sources, 196(4) (2011) 2070-2074.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Talebi-Ghadikolaee, M. M. Barzegari, Experimental and numerical investigation of the plastic deformation of metallic bipolar plates with serpentine flow filed, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(6) (2021) 881-884.

DOI: 10.22060/mej.2020.18321.6797

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۷۱۷ تا ۳۷۳۲
DOI: 10.22060/mej.2020.18321.6797

بررسی تجربی و شبیه‌سازی تغییر شکل مومسان صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار موازی مارپیچ

حسین طالبی قادیکلایی[۱]، محمد مهدی برزگری[۲*]

۱ – گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲– پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

خلاصه: در این پژوهش، تغییر شکل مومسان صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار مارپیچ در فرایند مهرزنی مورد بررسی قرار گرفت. مسیر کرنش و توزیع ضخامت در صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر تعیین شدند. بدین منظور، شبیه‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار اجزای محدود انجام شد. صحت نتایج به کمک مقایسه منحنی توزیع ضخامت و نیرو–جابجایی تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب بیانگر ۴/۷۶ و ۳/۸۵ درصد خطا می‌باشند. با توجه نتایج بدست‌آمده، جریان ورق تاثیر متفاوتی بر توزیع ضخامت در کانال‌های داخلی و بیرونی خواهد داشت و درصد نازک‌شدگی کانال‌های میانی در راستاهای طولی، قطری و عرضی، بیشتر از کانال‌های کناری می‌باشد. بیشترین درصد نازک‌شدگی (ناحیه بحرانی) در کانال‌های میانی واقع بر راستای طولی (۳۳ درصد در دیواره کانال) ایجاد می‌شود در حالی که راستای قطری، راستای بحرانی برای کانال‌های کناری می‌باشد. به دلیل ایجاد مسیر کرنش کشش دومحوره در راستای قطری، برخلاف سایر راستاها کاهش ضخامت قابل توجهی هم در دیواره کانال و هم در کف کانال صفحات دوقطبی فلزی مشاهده می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی:
پیل سوختی
صفحات دوقطبی فلزی
شکل‌دهی فلزات
توزیع ضخامت
مسیر کرنش.

۱– مقدمه

منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر یکی از جایگزین‌های اصلی سوخت‌های فسیلی در صنایع مختلف می‌باشند. پیل‌های سوختی یکی از انواع مبدل‌های الکتروشیمیایی می‌باشند که انرژی حاصل از واکنش‌های الکتروشیمیایی را مستقیما به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. به دلیل بازده بیشتر و آلودگی کمتر پیل‌های سوختی نسبت به موتورهای احتراق داخلی، کاربرد وسیعی در صنعت حمل و نقل پیدا کرده‌اند [۱]. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی پلیمری به دلیل بازده بیشتر، چگالی جریان بالاتر و دمای کاری پایین‌تر، بیش از سایر انواع پیل‌های سوختی مورد توجه قرار گرفته است [۲, ۳].

پیل‌های سوختی پلیمری از اجزای مختلفی همچون لایه نفوذ گاز، کاتالیست، صفحات دوقطبی و صفحات انتهایی تشکیل شده‌اند [۴]. یکی از مهم‌ترین اجزای پیل‌سوختی صفحات دوقطبی می‌باشد که درصد قابل توجهی از وزن و هزینه نهایی پیل‌های سوختی پلیمری را تشکیل می‌دهند [۵]. این صفحات به عنوان آند (قطب منفی) و کاتد (قطب مثبت) پیل‌های سوختی عمل می‌نمایند. از این‌رو، از این صفحات به صفحات دوقطبی نام برده می‌شود. صفحات دوقطبی شامل میدان شارش گازهای واکنشگر و میدان خنک‌کاری در دو سمت خود می‌باشد. به منظور کنترل جریان سوخت و خروجی حاصل از واکنش ها بر روی لایه‌های کاتالیست، صفحات دوقطبی فلزی دارای مسیر جریان با الگوهای مختلفی همچون پینی، موازی، مارپیچ، موازی مارپیچ، شعاعی و ... می‌باشند [۶]. شکل و هندسه الگوهای جریان یکی از مشخصه‌های مهم در طراحی پیل‌سوختی پلیمری می‌باشد که هدف از آن توزیع یکنواخت واکنشگرها روی لایه کاتالیست، خروج آب تولیدی از کانال و هدایت آن به خارج از پیل‌سوختی و در نهایت ایجاد افت فشار حداقل می‌باشد. میدان جریان ایده‌آل در پیل‌سوختی باید به گونه‌ای انتقال جرم واکنشگرها به لایه کاتالیست را فراهم نماید که گازهای واکنشگر به طور یکنواخت و به میزان مورد نیاز به آن برسد [۷].

با توجه به تاثیر قابل توجه صفحات دوقطبی در چگالی توان پیل‌های سوختی، تحقیقات قابل توجهی در زمینه انتخاب جنس و فرایند مناسب برای تولید صفحات دوقطبی انجام شده است. صفحات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir*

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

دوقطبی پیل سوختی از لحاظ جنس به سه گروه صفحات گرافیتی [۸]، کامپوزیتی [۹]، و فلزی [۱۰] تقسیم‌بندی می‌شوند. صفحات دوقطبی فلزی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و رسانایی الکتریکی بالا، بیش از سایر انواع صفحات دوقطبی مورد توجه قرار گرفته [۱۱] و آلیاژهای آلومینیوم [۱۲]، تیتانیوم [۱۳] و فولاد زنگ‌نزن [۱۴] به منظور تولید صفحات مذکور مورد استفاده قرار گرفتند. در میان روش‌های ساخت صفحات دوقطبی فلزی، روش شکل‌دهی فلزات به دلیل سادگی فرایند، کاهش هزینه تولید، سرعت تولید بالا و کیفیت سطح مناسب، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۱, ۱۵]. فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، فرآیندهای ساخت بدون تغییر در حجم می‌باشند که در آن‌ها فلز اولیه توسط ابزار شکل‌دهی تحت تغییر شکل مومسان قرار می‌گیرد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که میدان شارش گازهای واکنشگر و میدان خنک‌کاری در صفحات دوقطبی فلزی شکل‌داده‌شده از هم مستقل نمی‌باشند. از این‌رو، طراحی صفحات دوقطبی فلزی نسبت به صفحات دوقطبی کامپوزیتی و گرافیتی دارای پیچیدگی‌های بیشتری می‌باشد. برخی از پژوهش‌هایی که به منظور تعیین نحوه اثرگذاری پارامترهای فرایند و افزایش کیفیت صفحات دوقطبی فلزی انجام گرفته است در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

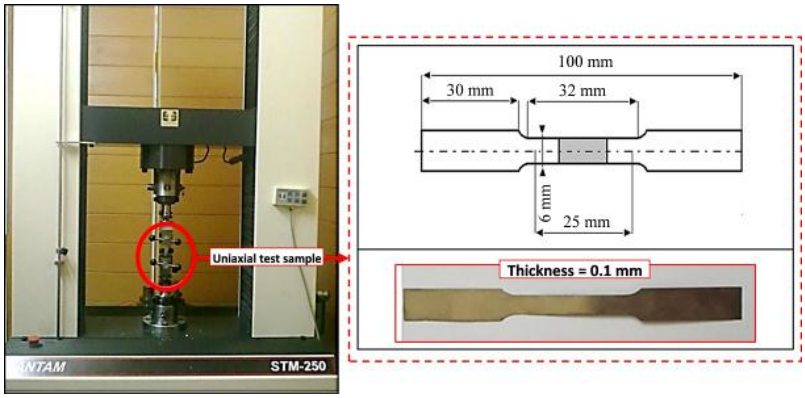
شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی به کمک فرایند هیدروفرمینگ توسط محمدتبار و همکاران [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفت. آنان اثر پارامترهای فرایند و هندسه قالب را بر توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل مورد بررسی قرار دادند. مطابق با نتایج ارائه‌شده، افزایش فشار شکل‌دهی موجب افزایش پرشدگی قالب (افزایش نسبت کشش) و افزایش درصدنازک شدگی می‌شود.

الیاسی و همکاران [۱۷] تولید صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار مارپیچ را به کمک فرایند شکل‌دهی لاستیکی مورد بررسی قرار دادند. آنان روشی نوین از طریق اصلاح شکل لایه لاستیکی، به منظور افزایش کیفیت صفحات دوقطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی ارائه کردند. نتایج بیانگر بهبود در میزان پرشدگی، نازک شدگی و یکنواختی عمق کانال در صفحات دوقطبی فلزی می‌باشند. طالبی قادیکلایی و همکاران [۱۸] به بررسی تاثیر نیروی سنبه، ضخامت و سختی لایه لاستیکی در شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی و وقوع شکست در میکروکانال‌ها، پرداختند. مطابق با نتایج، بیشترین درصد پرشدگی (پیش از وقوع شکست) برابر با ۷۶ درصد می‌باشد که توسط لایه لاستیکی با سختی شور A۴۰ و ضخامت ۳۰ میلی‌متر قابل دست‌یابی است.

آبیراتنا و همکاران [۱۹] از فرایند شکل‌دهی غلتکی به منظور تولید صفحات دوقطبی فلزی استفاده کردند. با توجه به کشش کمتر ورق در این فرایند نسبت به فرایندهای هیدروفرمینگ و شکل‌دهی لاستیکی، شرایط برای افزایش عمق کانال و کاهش نازک‌شدگی فراهم می‌شود. مطابق با مطالب ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین، فرایندهای مختلفی همچون، شکل‌دهی لاستیکی، هیدروفرمینگ و شکل‌دهی غلتکی، قابلیت تولید صفحات دوقطبی را خواهند داشت. علاوه فرایندهای مذکور، فرایند مهرزنی به دلیل سادگی فرایند، سرعت تولید بالا و کاهش هزینه‌های تولید، به عنوان یکی از فرایندهای مناسب برای تولید صفحات دوقطبی مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

هو و همکاران [۲۰] فرایند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی را به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنان تاثیر متغیرهایی همچون ابعاد کانال، سرعت سنبه، شعاع سنبه و زاویه دیواره را مورد بررسی قرار داده و از منحنی حد شکل‌دهی به منظور تعیین ناحیه ایمن استفاده کردند. انطباق نتایج تجربی و شبیه‌سازی در این پژوهش بیانگر این موضوع می‌باشد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود، می‌تواند به عنوان ابزاری به منظور انتخاب بهینه متغیرهای فرایند (جلوگیری از وقوع عیب) به کار گرفته شود. بونگ و همکاران [۲۱] به منظور افزایش عمق کانال و کمینه‌سازی درصد نازک‌شدگی، فرایند مهرزنی چند مرحله‌ای صفحات دوقطبی فلزی را مورد بررسی قرار دادند. مطابق با نتایج، روش ارائه‌شده توسط آنان، تاثیر قابل توجهی بر بهبود کیفیت صفحات دوقطبی فلزی خواهد داشت. همچنین، توسط شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند دو مرحله‌ای، مقادیر بهینه شعاع سنبه و عمق کانال را در مرحله اول تغییر شکل ارائه کردند.

ترکیب فرایند مهرزنی به همراه عملیات حرارتی به منظور افزایش شکل‌پذیری صفحات دوقطبی فلزی، توسط چوی و همکاران [۲۲] بررسی شد. فرایند پیشنهادی آنان از سه مرحله (شکل‌دهی اولیه، عملیات حرارتی و شکل‌دهی نهایی) تشکل شده است که موجب افزایش ۳۱ درصدی شکل‌پذیری در مقایسه با فرایند یک مرحله‌ای مهرزنی می‌شود. استفاده از بارگذاری دینامیکی به منظور کاهش عیوب



شکل ۱. آزمون کشش تک‌محوری به همراه نمونه آزمون

Fig. 1. Uniaxial tensile test together with the sample

شکل‌دهی در فرایند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی، توسط جین و همکاران [۲۳] مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج، استفاده از روش بارگذاری دینامیکی در مقایسه با روش‌های رایج (بارگذاری مستقیم)، موجب افزایش چگالی جریان صفحات دوقطبی فلزی می‌شود که این موضوع ناشی از ایجاد کانال‌های عمیق‌تر و یکنواخت‌تر می‌باشد.

تاکنون پژوهش‌های ارزشمندی توسط محققان در زمینه شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی توسط فرایندهای مختلف و تاثیر پارامترهای فرایند بر عمق کانال و توزیع ضخامت مورد بررسی قرار گرفته است. اما تاثیر تعداد کانال‌ها (صفحه دوقطبی کامل) و میزان جریان ورق حین تغییر شکل مومسان، بر کیفیت نمونه در راستاهای مختلفِ صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار مارپیچ مورد بررسی قرارنگرفته است. این موضوع، با توجه به وجود مکانیک تغییر شکل (مسیر کرنش) متفاوت در نواحی مختلف صفحات دوقطبی فلزی با الگوی مارپیچ، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در واقع، با توجه به تاثیر نوع الگوی جریان و ابعاد آن (الگوی کامل) در مکانیک تغییر شکل صفحات دوقطبی فلزی، بررسی تغییر شکل صفحات در الگوی مورد نظر از اهیمت بسزایی برخوردار است و می‌بایست از نظر تغییر شکل مومسان در راستاهای مختلف، تعیین نواحی بحرانی و تاثیر تعداد کانال‌های درنظرگرفته‌شده در صفحه دوقطبی (مدل‌سازی کامل و بدون اعمال تقارن و سایر شرایط ساده‌کننده) برتغییر شکل، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، با توجه به اهمیت افزایش نسبت عمق به پهنای کانال صفحات دوقطبی فلزی در عملکرد پیل سوختی پلیمری، شناخت صحیح جریان ورق (درراستاهای مختلف) و مسیر کرنش در فرایند مهرزنی می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده در زمینه انتخاب صحیح معیارهای شکست، اصلاح فرایند و شرایط روانکاری قرار گیرد که در پژوهش‌های پیشین مد نظر قرار نگرفته است.

بر این اساس، در پژوهش حاضر فرایند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با الگوی شیار موازی مارپیچ با ابعاد حقیقی (بدون در نظر گرفتن مقیاس و تقارن) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف پژوهش حاضر، تعیین تاثیر تعداد میکروکانال‌ها بر روند تغییرات توزیع ضخامت در راستاهای مختلف، تعیین مسیر کرنش در نواحی بحرانی و تاثیر آن بر توزیع ضخامت، تعیین راستا و نواحی بحرانی در شرایط مختلف فرایند می‌باشد. به منظور دست‌یابی به اهداف فوق، آزمون‌های تجربی (مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی) به کمک قالب‌های سنبه-ماتریس انجام شدند. همچنین، مدل‌سازی اجزای محدود به منظور تحلیل فرایند و تعیین مسیرکرنش به کارگرفته شد.

۲- مراحل آزمایشگاهی

۲-۱- تعیین خواص مکانیکی

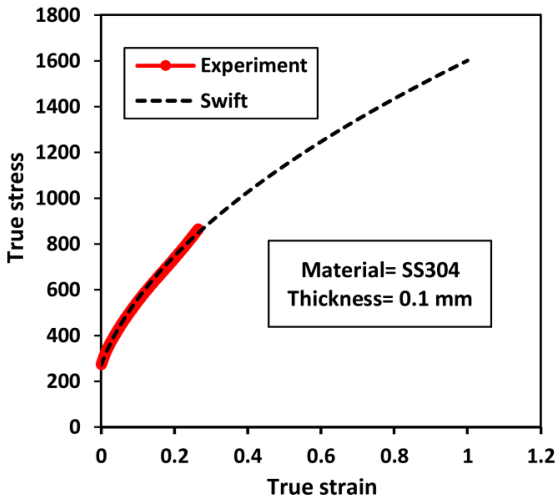
ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴[1] با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر در آزمون‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین خواص مکانیکی یکی از بخش‌های مهم و تاثیرگذار در مدل‌سازی فرایند می‌باشد. به همین منظور، از نتایج آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد برای

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

Table 1. Mechanical properties of SS304

پارامترها	واحد	مقدار
ضریب کشسانی (E)	GPa	۲۰۰
تنش تسلیم (σ_y)	MPa	۲۷۱
ضریب استحکام (K)	MPa	۱۵۷۶
توان کرنش سختی (n)	----	۰/۵۱
ε_0	----	۰/۰۳۱۵

1 Stainless steel 304 (SS304)



شکل ۲. منحنی تنش-کرنش ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

Fig. 2. True stress-strain curve and calibrated swift law results

تعیین خواص مکانیکی ورق استفاده شده است. نمونه‌های آزمون کشش تک محوری توسط دستگاه برش سیمی تهیه شدند. پس از آماده‌سازی نمونه آزمون، فرایند کشش توسط دستگاه کشش سنتام[1] انجام گرفت. نمونه آزمون کشش تک محوری، ابعاد آن و دستگاه آزمون کشش در شکل ۱ نشان داده شده است.

مقادیر تنش-کرنش حقیقی مطابق با نتایج حاصل از آزمون تجربی کشش تک محوری در راستای نورد، محاسبه شدند. از معادله سویفت (معادله ۱) به منظور تخمین رفتار مومسان ورق در کرنش‌های فراتر از مقادیر تجربی آزمون کشش تک محوری، استفاده شده است.

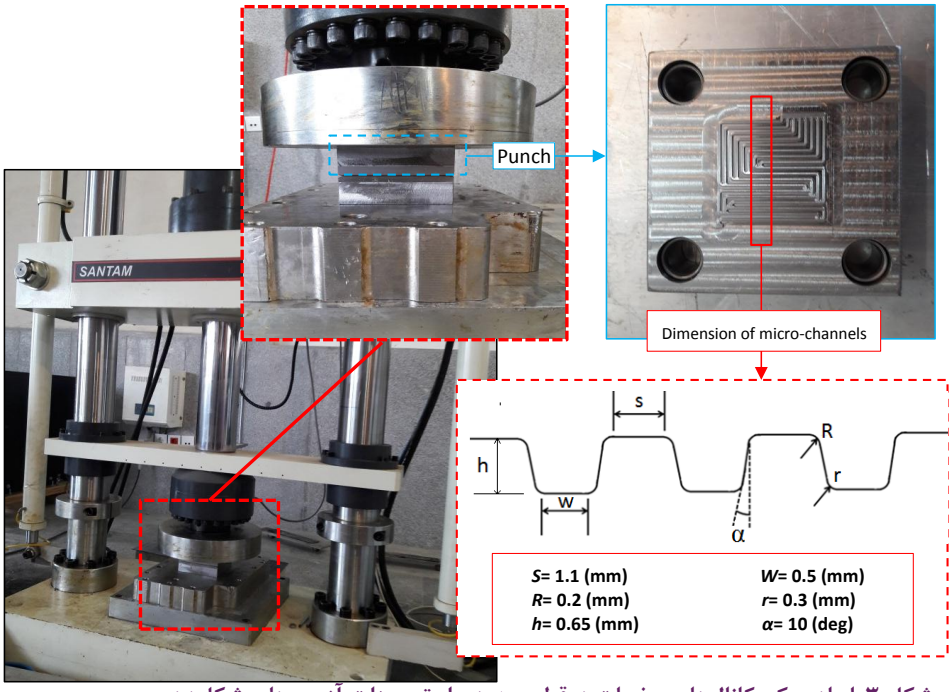
$$\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \qquad (۱)$$

ε_0 و k و n ترتیب برابر با ضریب استحکام، کرنش اولیه و نمای کرنش سختی می‌باشند. سه پارامتر مذکور، از طریق انطباق مقادیر تنش-کرنش حاصل از معادله سوئیفت بر داده‌های تجربی، محاسبه شدند. مقادیر تعیین‌شده برای پارامترهای موجود در معادله ۱ و سایر خواص مکانیکی، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

شکل ۲ نشان‌دهنده منحنی تجربی تنش-کرنش حقیقی و منحنی تنش-کرنش به کمک معادله کارسختی (ضرایب ارائه‌شده در جدول ۱) می‌باشد.

۲-۲- شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی

در این پژوهش، فرایند مهرزنی[2] به منظور شکل‌دهی ورق فولادی با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و تولید صفحات دوقطبی فلزی SS۳۰۴، مورد استفاده قرار گرفت. قالب مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی متشکل از سنبه و ماتریس می‌باشد که میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی بر روی آن ماشینکاری شدند. میکروکانال‌هایی با پهنای دیواره و عرض کانال ۱/۱ و ۰/۵ میلی‌متر در این پژوهش مورد بررسی قرار

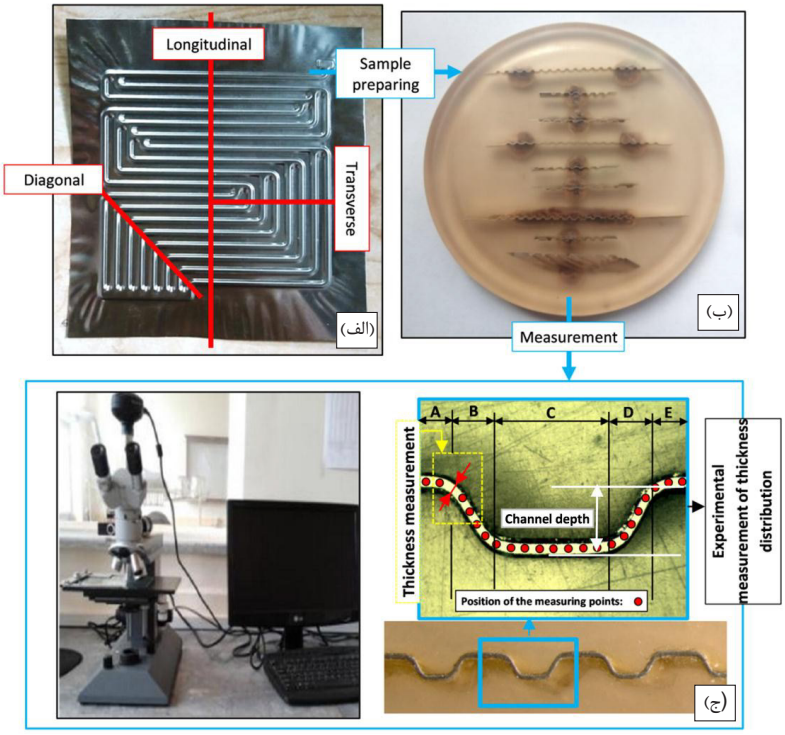


شکل ۳. ابعاد میکروکانال‌های صفحات دوقطبی به همراه تجهیزات آزمون‌های شکل‌دهی

Fig. 3. Dimension of the metallic bipolar plate micro channels together with experimental equipment

1 SANTAM

2 Stamping



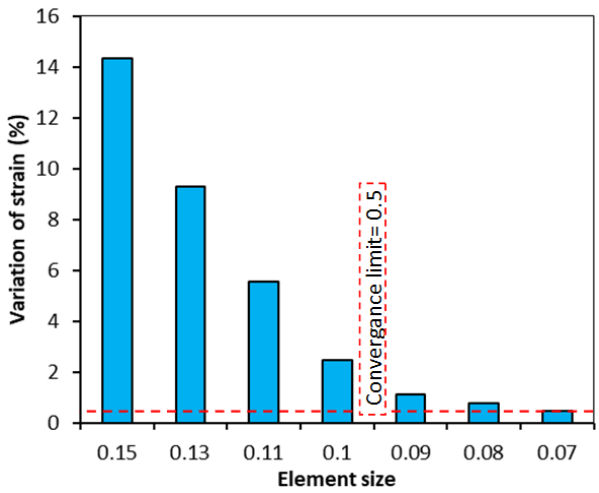
شکل ۴. آماده‌سازی نمونه به منظور اندازه‌گیری، الف) راستاهای برش، ب) قالب‌گیری و آماده‌سازی نمونه‌های برش‌داده‌شده، ج) تصویربرداری از سطح مقطع نمونه و شماتیکی از نحوه اندازه‌گیری ضخامت وعمق کانال

Fig. 4. Sample preparation for measuring process, a) cutting direction, b) mounting and preparation of the cutted sample, c) imaging from cross section of sample and schematic of thickness and channel depth measurement

گرفتند. پارامترهایی همچون شعاع گوشه داخلی و خارجی (r و R) و زاویه دیواره به ترتیب برابر با ۰/۳ میلی‌متر، ۰/۱ میلی‌متر و ۱۰ درجه در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که مجموعه درنظرگرفته‌شده از کانال‌ها با الگوی موازی مارپیچ، صفحه دو قطبی فلزی با ابعاد ۵۰×۵۵ میلی‌متر مربع (ابعاد کلی ناحیه شکل دهی) را ایجاد می‌نمایند. به منظور ایجاد الگوی مطلوب از مسیر جریان بر صفحات دوقطبی فلزی، شیارهایی در جهت عکس یکدیگر (محدب و مقعر) در دو سمت قالب (سنبه و ماتریس) با کمک دستگاه فرز کنترل عددی ماشینکاری شدند. لازم به ذکر است که شیارهای قالب‌های محدب و مقعر بر مبنای ابعاد میکروکانال‌ها (شکل ۳) و با درنظرگرفتن لقی برابر با ۰/۱۲ میلی‌متر، ایجاد شدند.

از پرس ۶۰ تن به منظور بارگذاری استفاده شد. تصویر قالب، پرس و ابعاد میکروکانال‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این فرایند، ورق بین سنبه و ماتریس (بر روی سطح فوقانی ماتریس) قرار گرفته و حرکت سنبه به سمت پایین موجب جریان ورق به داخل محفظه ماتریس و اعمال تغییر شکل مومسان می‌شود. لازم به ذکر است که منحنی نیرو-جابجایی از آزمون تجربی استخراج شده و به منظور بررسی صحت رفتار مومسان در شبیه‌سازی اجزای محدود، مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور بررسی توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده، صفحات دوقطبی فلزی پس از اتمام عملیات شکل‌دهی، به کمک دستگاه برش سیمی در راستاهای طولی، عرضی و قطری (مطابق با شکل ۴)، برش داده شدند. سطح مقطع نمونه‌ها پس از برش، کیفیت لازم به منظور انجام اندازه‌گیری‌های دقیق را دارا نمی‌باشد و وجود پلیسه و برآمدگی‌ها در لبه برش موجب کاهش دقت اندازه‌گیری خواهد شد. از این رو عملیاتی برای آماده‌سازی سطح مقطع نمونه‌ها به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری انجام شد. برای افزایش کیفیت سطوح برش داده شده، نمونه‌ها توسط رزین اپوکسی قالب‌گیری شده و سپس، عملیات سنباده‌زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در نهایت، نمونه‌های نهایی در زیر میکروسکوپ نوری قرار داده شده و پس از تهیه تصاویر میکروسکوپی از سطح مقطع کانال‌ها، عمق کانال و ضخامت در نواحی مختلف میکروکانال‌ها به کمک نرم‌افزار آنالیز تصاویر و اندازه‌گیری، تعیین شد. در شکل ۴ مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، تصویر سطح مقطع صفحات و شماتیک تعیین ضخامت در نقاط مختلف میکروکانال و عمق کانال، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به عدم به کارگیری ورق‌گیر در پژوهش



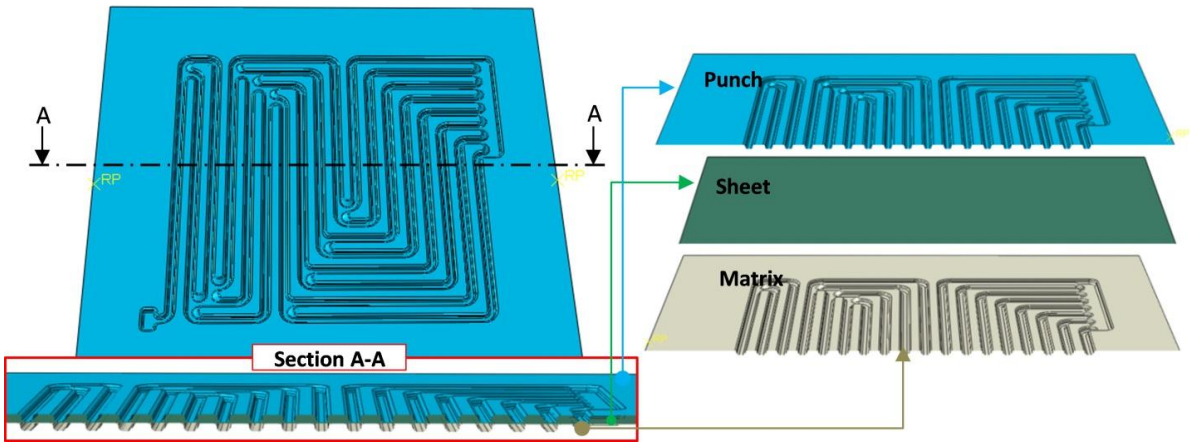
شکل ۵. تغییرات مقدار کرنش به ازای ابعاد المان

Fig. 5. Variation of strain with respect to element dimension

حاضر، صفحات تولیدشده دارای چروکیدگی در قسمت‌های کناری می‌باشند که با درنظرگرفتن ورق‌گیر قابلیت اصلاح خواهند داشت که این موضوع در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار نگرفته است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

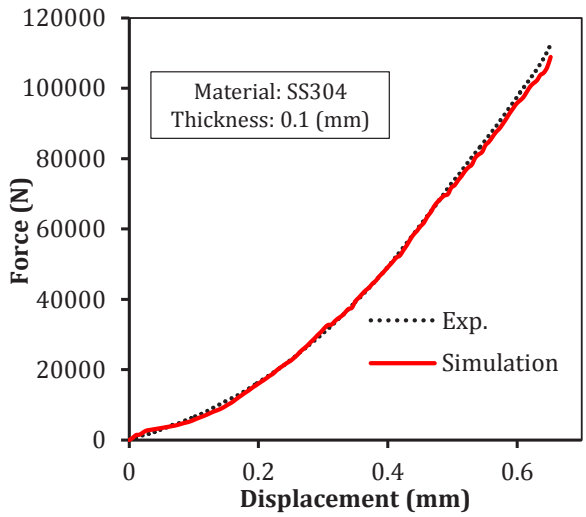
برای شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار المان محدود اباکوس[1] استفاده شد. سنبه و ماتریس به صورت صلب مدل‌سازی شدند. ورق به صورت پوسته‌ای[2] و شکل‌پذیر[3] مدل‌سازی شده و المان‌هایی با ابعاد ۰/۰۶۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر، به ترتیب برای شبکه‌بندی هندسه ورق و قالب به کارگرفته شدند. ابعاد المان ورق بر اساس روش همگرایی مش و بررسی تغییرات کرنش معادل بیشینه در انتهای فرایند، تعیین شد. بدین منظور، محدوده تغییرات ۰/۵ درصد (تغییر مقدار کرنش) به منظور حد همگرایی در نظر گرفته شد. نمودار همگرایی مش در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، کاهش ابعاد المان‌های ورق به کمتر از ۰/۰۷ باعث دستیابی به حد همگرایی می‌شود. بر این اساس، ابعاد المان ورق در پژوهش حاضر ۰/۰۶۵ میلی‌متر درنظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با توجه به صلب درنظرگرفتن سنبه و ماتریس، ابعاد المان‌های آن‌ها تاثیری بر نتایج شبیه‌سازی نخواهد داشت و به منظور دست‌یابی به شبکه‌بندی یکنواخت، ابعاد ۰/۱۵ میلی‌متر برای شبکه بندی سنبه و ماتریس در نظر گرفته شد. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که تغییر ابعاد المان از ۰/۷ به ۰/۵ میلی‌متر و از ۰/۵ میلی‌متر به ۰/۴ میلی‌متر به ترتیب موجب ۱۴/۳۲ و ۹/۲۸ درصد تغییرات در مقدار کرنش معادل بیشینه می‌شود. روند تغییرات کرنش معادل بیانگر این موضوع می‌باشد که تغییر ابعاد المان‌ها در محدوده ۰/۲ تا ۰/۱ موجب می‌شود تا تغییرات کرنش معادل به کمتر از ۰/۵ درصد همگرا شود. بر این اساس، به منظور برقراری تعادل بین دقت نتایج و زمان حل، ابعاد المان‌های ورق برابر با ۰/۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. همچنین، ابعاد قالب به نحوی تعیین شد تا مقادیر کرنش و یکنواختی آن[4] تحت تاثیر شبکه‌بندی قالب قرار نگیرد. خصوصیات مکانیکی ورق مطابق با جدول ۱ در شبیه‌سازی اعمال شده است. به منظور اعمال نیرو بر ورق، شرط مرزی جابجایی به سنبه اعمال شد در حالی که ماتریس در تمام



شکل۶. مدل‌سازی فرایند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی

Fig. 6. Finite element modeling of the forming process

1 ABAQUS
2 Shell
3 Deformable
4 Smoothing



شکل ۷. منحنی نیرو-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی صفحه دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

Fig. 7. Experimental and numerical force-displacement curve of SS304 bipolar plates

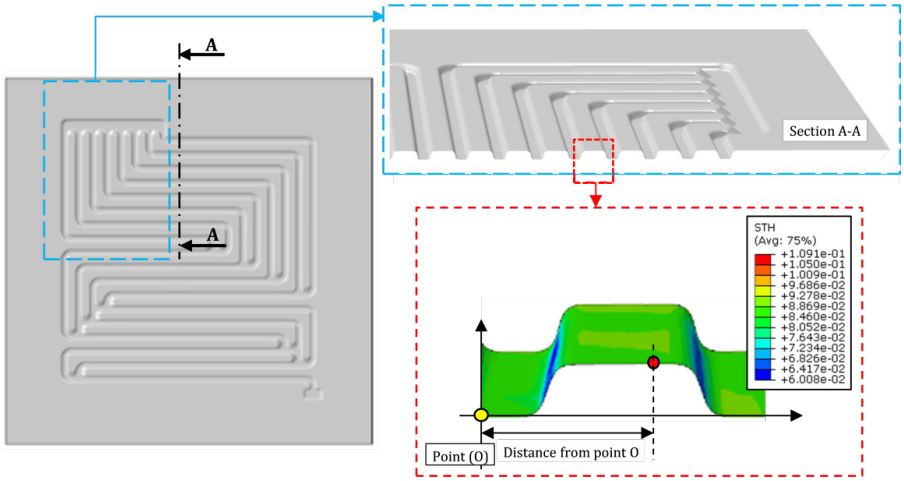
جهات مقید می‌باشد. شرایط تماسی بین سنبه، ماتریس و ورق از نوع سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۲ تعریف شد. همچنین، روش حل صریح[1] با درنظرگرفتن مقیاس زمانی[2]، به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی فرایند به کارگرفته شد و زمان حل مسئله به نحوی تعیین شد که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در طول فرایند کمتر از ۱ درصد باشد تا طبیعت شبه‌استاتیک مسئله حفظ شود. تصویری از مدل‌سازی فرایند و موقعیت اجزای مختلف آن در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به تاثیر غیر قابل توجه برگشت فنری بر نتایج پژوهش حاضر، این موضوع در بررسی‌های اجزای محدود در نظر گرفته نشد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

به منظور بررسی صحت نتایجِ حاصل از شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار مومسان ورق، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمون‌های تجربی و بررسی‌های عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقدار نیرو به ازای جابجایی سنبه در حین فرایند از لحظه شروع تا پرشدگی کامل قالب (جابجایی سنبه به میزان ۰/۶۵ میلی‌متر)، در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق با نتایج بدست‌آمده، حداکثر اختلاف بین منحنی تجربی و عددیِ نیرو-جابجایی برابر با ۳/۸۵ درصد محاسبه شد که تاییدکننده صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در تعیین رفتار مومسان می‌باشد.

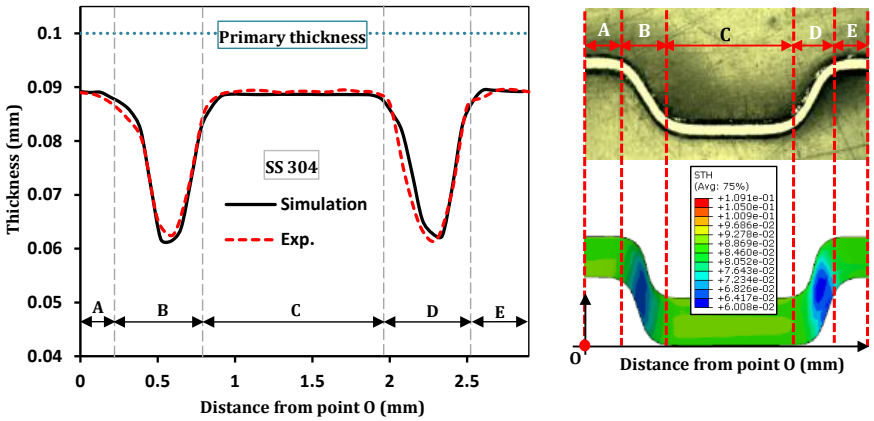
با توجه به اهمیت توزیع ضخامت در نمونه‌های نهایی، مقدار ضخامت در نواحی مختلف میکروکانال صفحات دوقطبی فلزی، از آزمون‌های تجربی استخراج‌شده (مطابق با توضیحات اشاره‌شده در بخش ۲) و با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی‌های المان محدود مقایسه شدند. به منظور ایجاد شرایط مشابه، نتایج تجربی و عددی از کانالی مشابه در راستای طولی استخراج شدند. موقعیت کانال مذکور به صورت شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۹ بیانگر ضخامت در نواحی مختلف میکروکانال به ازای فاصله از نقطه شروع اندازه‌گیری (نقطه O)، می‌باشد. مقایسه مقادیر توزیع ضخامت بیانگر دقت قابل



شکل ۸. موقعیت کانال انتخابی در بررسی‌های تجربی و عددی

Fig. 8. Position of the considered channel during numerical and experimental investigation

1 Explicit
2 Time scaling



شکل ۹. مقایسه توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی در شکل‌دهی صفحه دوقطبی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

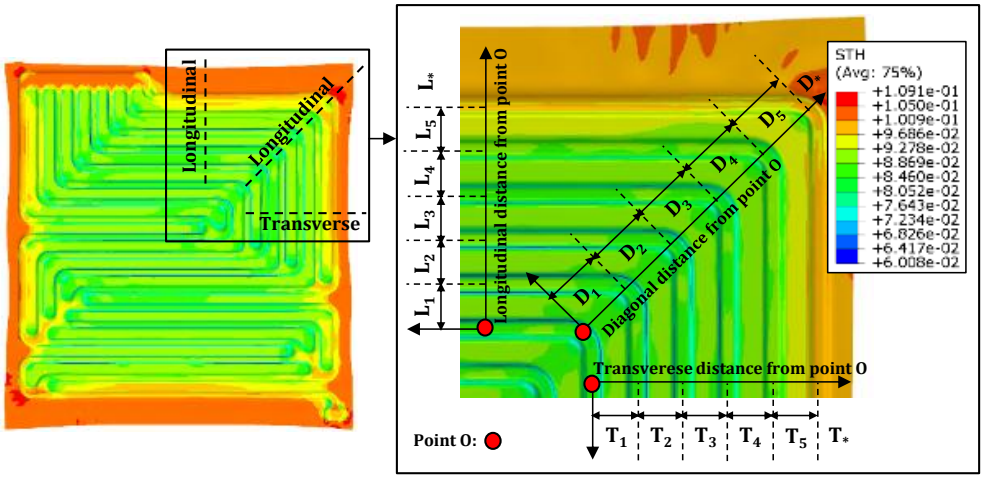
Fig. 9. Comparison of experimental and numerical thickness distribution during forming of SS304 bipolar plate

قبول نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود (حداکثر ۴/۷۶ درصد خطا در مقایسه با نتایج تجربی) و صحت مدل‌سازی خواص مکانیکی و تماسی در فرایند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد. لازم به ذکر است که تخمین خواص مومسان ورق به کمک معادله سویفت در کرنش‌هایی فراتر از آزمون کشش تک‌محوری (بخش ۲-۱) و همچنین تغییرات خواص سطحی (زبری) قالب سنبه-ماتریس در نواحی مختلف نسبت به شرایط ایده‌آل (فرض یکنواختی شرایط تماسی در شبیه‌سازی اجزای محدود)، دلایل اصلی اختلاف بین مقادیر تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود می‌باشند. همچنین، عدم یکنواختی جریان ورق در شکل‌دهی میکروکانال‌های موازی مارپیچ موجب عدم تقارن نمودار توزیع ضخامت در دو سمت میکروکانال می‌شود.

۴-۲- روند تغییر ضخامت در راستاهای گوناگون

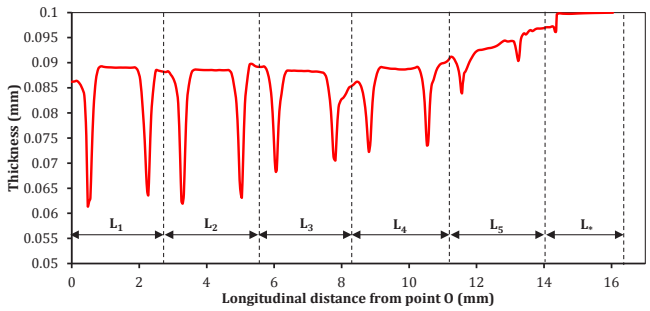
با توجه به اینکه در این پژوهش شکل‌دهی صفحه دوقطبی فلزی با الگوی شیار مارپیچ، به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است، تعیین جریان فلز در نواحی مختلف (نواحی کناری و میانی) از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. بدین منظور توزیع ضخامت در کانال‌های مختلف در راستاهای طولی، عرضی و قطری مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت کانال‌های مورد بررسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۰، بررسی‌ها در هر راستا در ۶ ناحیه مختلف شامل لبه ورق و ۵ کانال در امتداد آن (کانال‌های کناری تا پنجمین کانال میانی)، انجام شد.

با توجه به مقدار ضخامت در ناحیه بحرانی، درصد نازک شدگی بر مبنای ضخامت اولیه ورق (۰/۱ میلی‌متر) و ضخامت ورق پس از تغییر شکل (مطابق با معادله ۲) محاسبه شد.



شکل ۱۰. راستاهای طولی و قطری و عرضی و موقعیت نواحی مختلف در راستاهای مذکور

Fig. 10. Longitudinal, diagonal, and transverse direction together with divided area



شکل ۱۱. توزیع ضخامت در راستای طولی صفحه دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

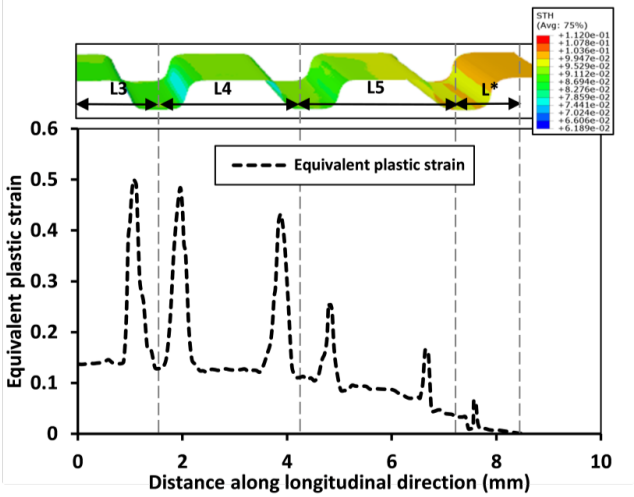
Fig. 11. Thickness distribution in longitudinal direction

t_r، t_0 و t_f ترتیب برابر با درصد نازک‌شدگی، ضخامت اولیه و

$$t_r = \left(\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right) \times 100 \qquad (۲)$$

ضخامت نهایی می‌باشند.

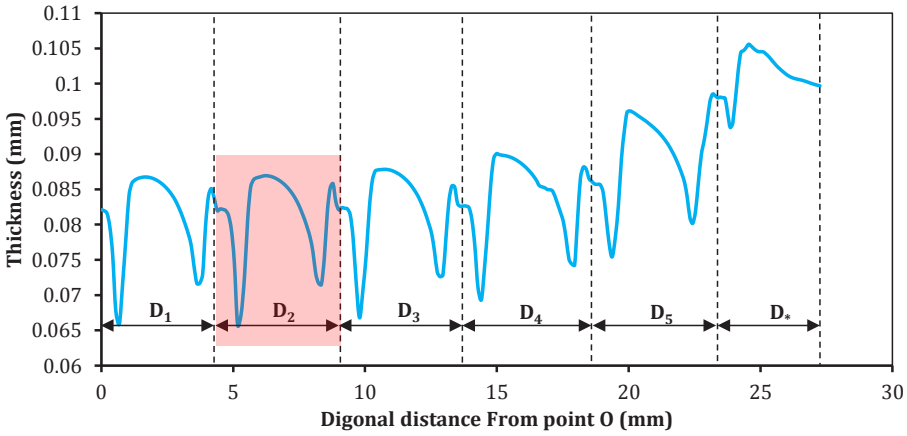
روند توزیع ضخامت در راستای طولی در محدوده L۱ تا L۵ به همراه L* در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق با نتایج بدست‌آمده در تمامی محدوده‌ها، کمینه ضخامت در ناحیه دیواره کانال ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، هر چه به کانال‌های کناری نزدیک می‌شویم (انتقال از L۱ تا L۵) میزان ضخامت در نمونه افزایش خواهد یافت. این موضوع ناشی از بهبود جریان ورق در کانال‌های کناری می‌باشد. در این کانال‌ها، تغذیه ورق از نواحی غیربحرانی شامل ناحیه L* و نواحی مرتبط با سطح کانال (نواحی مجاور دیواره کانال) به سمت نواحی بحرانی (دیواره کانال)، موجب ایجاد توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین، مطابق با نتایج بدست‌آمده، این اثر صرفا در سه کانال کناری (L۳ تا L۵) قابل مشاهده می‌باشد و در کانال‌های میانی



شکل ۱۲. مقادیر کرنش مومسان معادل در کانال‌های کناری

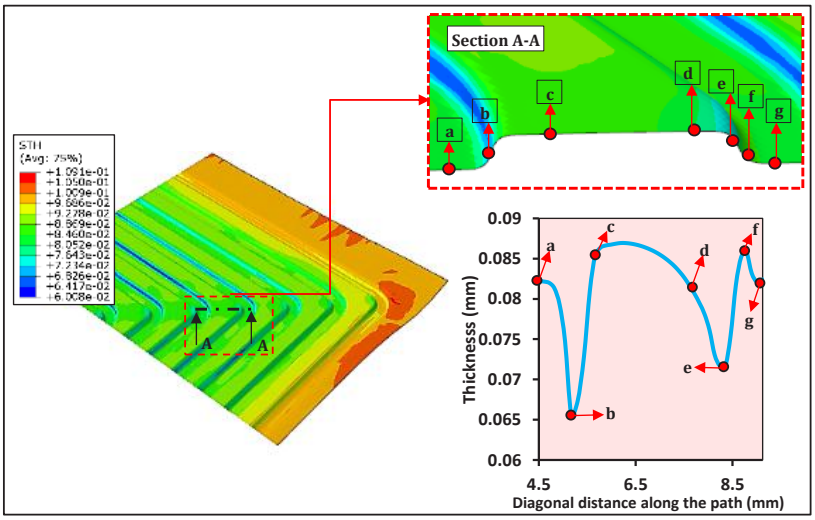
Fig. 12. Equivalent strain in lateral channels

(نواحی L۱ و L۲) درصد نازک‌شدگی به مقدار مشخصی همگرا می‌شود. در نواحی L۱ و L۲، تغییرات ضخامت در نواحی مختلف کانال متاثر از تغذیه ورق از نواحی کناری نمی‌باشد. در نتیجه، کمینه ضخامت ایجادشده در محدوده مذکور یکسان خواهد شد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، مقادیر کرنش معادل در سه کانال کناری مورد بررسی قرارگرفت (شکل ۱۲). مطابق با نتایج، جریان ورق از نواحی کناری موجب می‌گردد تا مقدار کرنش معادل در کانال‌های کناری کاهش یابد. این موضوع موجب می‌گردد تا شدت کاهش ضخامت در این نواحی کاهش یابد. در واقع، مقادیر کرنش بیانگر این موضوع می‌باشند که در نواحی کناری حالت تغییر شکل نزدیکی بیشتری به فرایند خم خالص داشته و با نزدیکی به نواحی میانی فرایند به صورت ترکیبی از خم و کشش خواهد بود که موجب نازک‌شدگی بیشتری در این نواحی می‌شود.



شکل ۱۳. توزیع ضخامت در راستای قطری صفحه دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

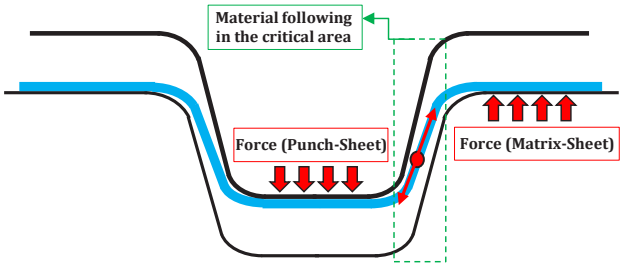
Fig. 13. Thickness distribution in diagonal direction



شکل ۱۴. نقاط مختلف در ناحیه D2 و توزیع ضخامت متناظر با نواحی مذکور

Fig. 14. Various locations in D2 area and related thickness value

تغییرات ضخامت در کانال‌های مختلف در راستای قطری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشابه با راستای طولی، در این حالت نیز کاهش ضخامت در کانال‌های کناری (D۵) کمتر از کانال‌های میانی (D۱) می‌باشد. در این شرایط نیز تغذیه ورق از نواحی غیربحرانی (D*) به سمت کانال‌های کناری، موجب بهبود روند توزیع ضخامت می‌شود. تاثیر جریان ورق از نواحی بیرونی بر توزیع ضخامت در راستای قطری صرفا بر سه کانال ابتدایی (D۵ تا D۳) موثر می‌باشد و در کانال‌های بعدی حداکثر درصد نازک شدگی و روند تغییرات ضخامت یکسان خواهد شد. همچنین، عدم یکنواختی توزیع ضخامت در هر کانال در راستای قطری نسبت به راستای طولی بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که در بعضی نقاط در ناحیه D*, مقدار ضخامت از مقدار اولیه افزایش یافته است که بیانگر وقوع چروکیدگی در این ناحیه می‌باشد و آزمون‌های تجربی نیز تاییدکننده وقوع این پدیده می‌باشند (شکل ۴). به منظور بررسی دقیق‌تر، روند تغییرات توزیع ضخامت در ناحیه D۲ (شکل ۱۳) به صورت جزئی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نقاط مختلفی در ناحیه D۲ انتخاب شدند. انتخاب نقاط به نحوی



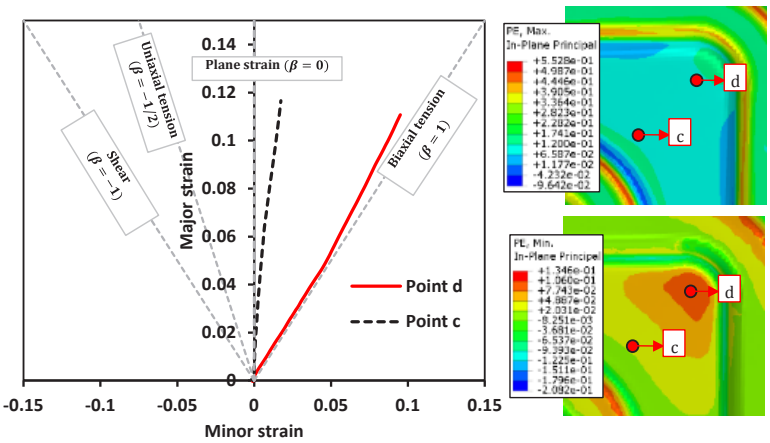
شکل ۱۵: شماتیک نحوه جریان ورق در دیواره کانال

Fig. 15. Schematic of material flow in draft area

انجام شد که پراکندگی مناسبی در قسمت‌های مختلف کانال (کف کانال، شعاع گوشه، دیواره و ...) ایجاد شود. نقاط مذکور و نمودار توزیع ضخامت متناظر با ناحیه D۲ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج بدست‌آمده، مقدار ضخامت از ۰/۰۸۳ میلی‌متر در نقطه a به ۰/۰۶۶ میلی‌متر در نقطه b که واقع بر دیواره کانال (در ناحیه شعاع انحنای داخلی مارپیچ) کاهش می‌یابد.

نقاط a، c، d و سایر نقاط مشابه با آنها، در ناحیه‌هایی قرار دارند که ورق در تماس با سطح سنبه-ماتریس می‌باشد. نیروی اصطکاک بین ورق و ماتریس موجب کاهش جریان ورق از این نواحی به سایر نقاط می‌شود. در این شرایط، نواحی واقع در دیواره کانال که در فضای بین سنبه-ماتریس قرار می‌گیرند (لقی) آزادی بیشتری داشته و با توجه به مقیدبودن سایر نواحی، عمده تغییر شکل در این ناحیه (نقطه b) متمرکز می‌گردد. این موضوع، در نهایت منجر به کاهش قابل توجه ضخامت در این ناحیه می‌گردد که ناشی از موارد ذکرشده و کشیدگی بیشتر ورق در این ناحیه نسبت به سایر نواحی (در تماس با سطح سنبه و ماتریس) است. در نتیجه، بیشترین کاهش ضخامت در محدوده‌های مرتبط با دیواره کانال ایجاد شده و این مقدار در سایر نواحی کمتر می‌باشد. شماتیک این موضوع در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

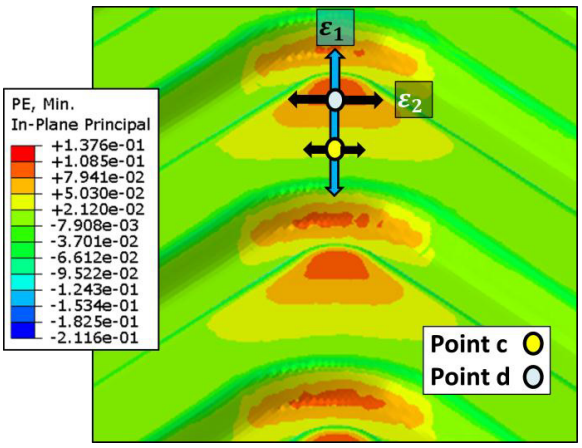
به علاوه، مطابق با نتایج، ضخامت نمونه با جابجایی از نقطه c به d کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از تغییر مسیر کرنش از حالت کرنش صفحه‌ای (در دیواره کانال) به سمت کشش دو محوری باشد. به منظور بررسی این موضوع، مسیر کرنش در المان‌های واقع



شکل ۱۶. تغییر مسیر کرنش در راستای قطری

Fig. 16. Variation of strain path in diagonal direction

بر نقاط c و d استخراج شده و در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، مسیر کرنش در نقطه c نزدیک به حالت کشش کرنش صفحه‌ای می‌باشد. جابجایی از نقطه c به سمت d، موجب می‌شود تا مسیر کرنش مشابه با حالت کشش دو محوری شود ($\beta = 1$). با توجه به تشابه کرنش اصلی در هر دو نقطه، تغییر حالت از کشش کرنش صفحه‌ای به کشش دو محوری، موجب افزایش کرنش معادل و کاهش ضخامت در نقطه d نسبت به c می‌شود. از سوی دیگر همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، مسیر کرنش در نقاط مختلف یکنواخت نمی‌باشد و در طول تغییر شکل از مقادیر تئوری کشش دو محوری($\beta = 1$ کشش کرنش صفحه‌ای $\beta = 0$) فاصله خواهند گرفت. در واقع، در این نواحی، ورق در ابتدا در تماس مستقیم با سطح کانال بر روی ماتریس می‌باشد که با جابجایی سنبه به سمت پایین، ناحیه مذکور بر روی سطح ماتریس فشرده خواهد شد. ادامه



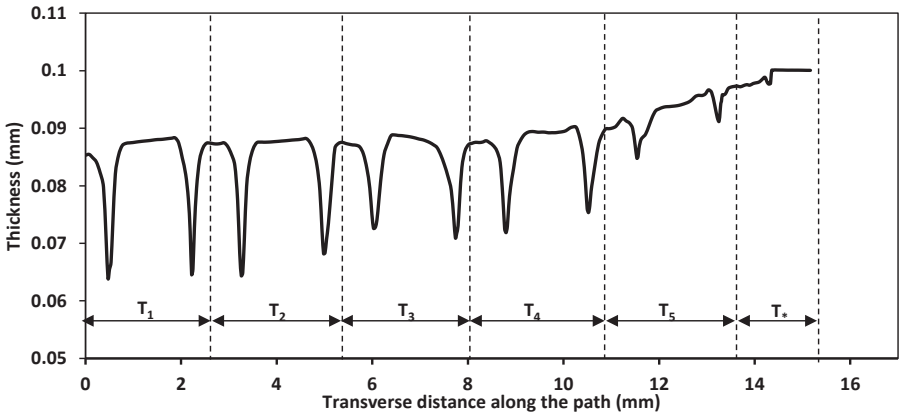
شکل ۱۷. کرنش‌های اصلی در راستای قطری

Fig. 17. Principal strain in diagonal direction

فرایند موجب می‌گردد تا ورق در این ناحیه به طرفین کانال کشیده شده و این جریان فلز موجب می‌گردد تا مسیر تغییر شکل به سمت حالت کشش دو محوری متمایل گردد. در این نواحی، ورق علاوه بر تغییر شکل در راستای کرنش اصلی بیشینه ($\varepsilon 1$) در راستای $\varepsilon 2$ نیز تغییر شکل می‌یابد (شکل ۱۷). این موضوع موجب می‌گردد تا حالت تغییر شکل در این ناحیه از حالت کشش کرنش صفحه‌ای فاصله گرفته و به حالت کشش دو محوره متمایل گردد. لازم به ذکر است که، المان واقع در نقطه d، به دلیل انحنای کانال در این ناحیه، مقدار کرنش بیشتری را در راستای $\varepsilon 2$ تجربه خواهد نمود (افزایش نسبت $\varepsilon 1$ به $\varepsilon 2$). این موضوع موجب می‌گردد تا مکانیک تغییر شکل در نقطه d بیش از هر ناحیه دیگری به حالت کشش دو محوره نزدیک گردد.

این موضوع در شرایط استفاده از روانکار اهمیت دوچندان خواهد یافت. زیرا در این شرایط، جریان ورق از این نواحی به سایر نقاط افزایش خواهد یافت و در واقع نقاط بحرانی (آغازگر شکست) نقاطی خواهند بود که مسیر بارگذاری غیریکنواختی را تجربه خواهند کرد. لذا، در این شرایط منحنی‌های حد شکل‌دهی بر مبنای کرنش‌های حدی که با فرض بارگذاری ثابت تعیین می‌شوند، عملکرد مناسبی به منظور پیش‌بینی وقوع ناپایداری نخواهند داشت و ضرورت تا معیارهای شکست نرم متناسب با مسیر بارگذاری در فرایند کالیبره شوند [۲۴, ۲۵].

در نهایت، توزیع ضخامت در کانال‌های واقع بر راستای عرضی در صفحات دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پس از شکل‌دهی توسط فرایند مهرزنی (سنبه-ماتریس)، مورد بررسی قرارگرفت. توزیع

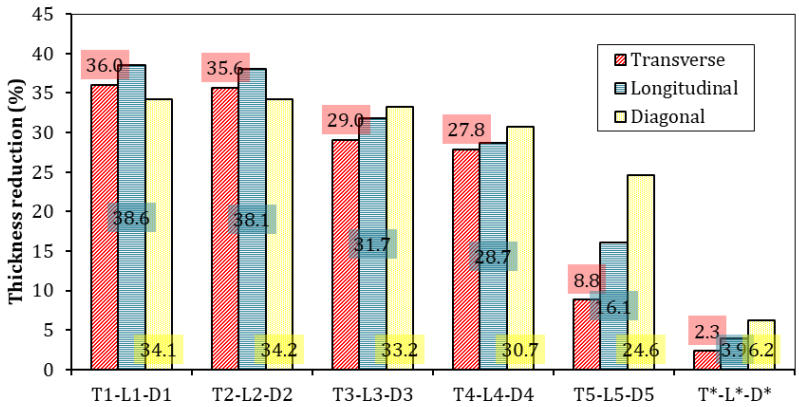


شکل ۱۸. توزیع ضخامت در راستای عرضی صفحه دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

Fig. 18. Thickness distribution in transverse direction of SS304 bipolar plate

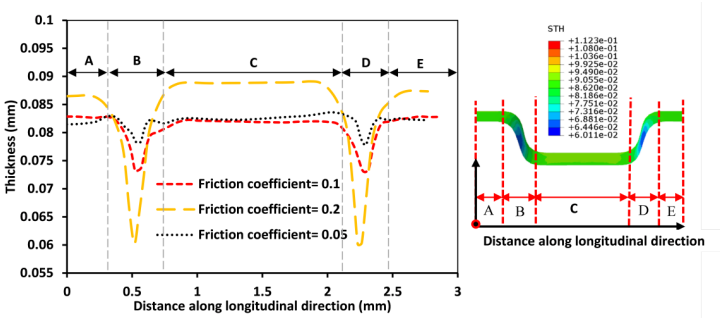
ضخامت در نواحی T۱ تا T۵ (شکل ۱۰) از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود استخراج شده و در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این حالت نیز مشابه با سایر راستاها، ضخامت ورق (پس از شکل‌دهی) در کانال‌های کناری بیشتر از کانال‌های میانی می‌باشد. به دلیل تغذیه ورق از نواحی کناری، کاهش ضخامت در محدوده T۵ قابل توجه نمی‌باشد اما با پیش‌روی به سمت ناحیه T۱، حداقل ضخامت ایجادشده در قطعه کار کاهش می‌یابد. همچنین، در تمام نواحی (T۱ تا T۵)، بیشترین کاهش ضخامت در قسمت دیواره کانال ایجاد می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که در تمامی راستاها، نقاط واقع بر دیواره کانال، نواحی بحرانی حین تغییر شکل بوده و در مواردی که میزان تغییر شکل از حدود شکل‌دهی فراتر باشد وقوع شکست از این ناحیه آغاز گردد.

به منظور بررسی کمّی شدت کاهش ضخامت در راستاهای مختلف و تعیین راستای بحرانی، میزان درصد نازک شدگی بر مبنای کمینه ضخامت ایجادشده در هر ناحیه محاسبه شده و در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مطابق با نتایج بدست‌آمده، درصد نازک‌شدگی در تمامی راستاها، با حرکت از کانال‌های خارجی به سمت کانال‌های داخلی افزایش می‌یابد. درصد نازک‌شدگی در کانال‌های بیرونی در راستاهای قطری، طولی و عرضی به ترتیب برابر با ۶/۲، ۳/۹ و ۲/۳ درصد می‌باشد که این مقدار در کانال‌های میانی در راستاهای مذکور، به ترتیب به ۳۴/۱، ۳۶ و ۳۸/۶ درصد افزایش می‌یابد. در نواحی کناری، به دلیل کرنش ناشی از شعاع گوشه (انحنای مارپیچ)، مقدار نازک‌شدگی در راستای قطری (راستای بحرانی در کانال‌های کناری) نسبت به دو راستای دیگر بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر، با نزدیک‌شدن به کانال‌های میانی، بیشترین درصد نازک‌شدگی در کانال‌های واقع بر راستای طولی ایجاد می‌شود. در واقع، در نواحی میانی، کشیدگی ورق به منظور پرنمودن حفره قالب افزایش می‌یابد. از طرفی، طولانی‌ترین کانال‌ها در راستای مسیر طولی قرار داشته و به بیان دیگر، بیشترین



شکل ۱۹. حداکثر نازک‌شدگی در نواحی مختلف در راستاهای طولی، عرضی و قطری

Fig. 19. Maximum thinning percentage in different area of the longitudinal, transverse, and diagonal directions



شکل ۲۰. تاثیر ضریب اصطکاک بر توزیع ضخامت

Fig. 20. Effect of friction coefficient on thickness distribution

سطح تماس با قالب (شیارهای سنبه-ماتریس) در کانال‌های واقع بر راستای مذکور ایجاد می‌شود. افزایش سطح تماس و تاثیر آن بر نحوه جریان مواد (افزایش اصطکاک و کاهش جریان فلز) علت اصلی افزایش نازک‌شدگی در این راستا نسبت به دو راستای دیگر می‌باشد. در نهایت می‌توان اشاره نمود که دیواره کانال‌های میانی در راستای طولی بحرانی‌ترین نقاط در شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار موازی مارپیچ می‌باشند. لذا، به منظور تولید صفحات دوقطبی فلزی سالم (بدون شکست) و با نسبت عمق به پهنای کانال بیشتر، می‌بایست فرایند را به نحوی طراحی نمود تا با کنترل جریان ورق در نواحی مختلف میزان تغییر شکل در این ناحیه (دیواره کانال‌های میانی) از محدوده مجاز فراتر نرود. همچنین، نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که صرفا مدل‌سازی چند کانال نمی‌تواند بیانگر توصیف دقیقی از جریان فلز در الگوهای پیچیده ارائه نماید.

با توجه به تاثیر قابل توجه اصطکاک بر مقادیر نازک‌شدگی و همچنین، با توجه به اینکه مطابق با نتایج، کانال‌های میانی در راستای طولی بحرانی‌ترین نواحی در شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار موازی مارپیچ می‌باشند، در ادامه تاثیر ضریب اصطکاک بر توزیع ضخامت در کانال میانی در راستای طولی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲۰). مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲به منظور بررسی اثر اصطکاک و روانکار در نظر گرفته شدند. مطابق با نتایج بدست‌آمده، استفاده از روانکار موجب بهبود روند توزیع ضخامت در کانال بحرانی واقع بر راستای طولی می‌گردد. همچنان بیشترین درصد نازک شدگی در نواحی B و D (دیواره کانال) در راستای طولی ایجاد می‌گردد. حداقل ضخامت ایجادشده در راستای طولی از ۰/۰۶۱ میلی‌متر در شرایط بدون روانکار به ۰/۰۷۷ میلی‌متر در نمونه‌های شکل‌یافته به کمک روانکار، افزایش می‌یابد. مطابق با نتایج، استفاده از روانکار می‌تواند با کاهش درصد نازک‌شدگی در راستای بحرانی منجر به دست‌یابی به نسبت عمق به پهنای کانال بیشتر گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک فرایند مهرزنی (سنبه-ماتریس) مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به منظور آگاهی از روند توزیع ضخامت و مسیرکرنش در راستاها و نواحی گوناگون صفحه دوقطبی مورد استفاده قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصل از پژوهش حاضر، در ادامه بیان شده است:

- بررسی توزیع ضخامت در کانال‌های کناری و میانی بیانگر تاثیر تعداد کانال‌ها بر جریان ورق و درصد نازک‌شدگی در نواحی مختلف می‌باشد. مطابق با نتایج بدست‌آمده، تاثیر جریان ورق بر توزیع ضخامت در سه کانال کناری قابل مشاهده می‌باشد و تاثیر قابل توجهی بر سایر کانال‌های صفحات دوقطبی نخواهد داشت و کمینه ضخامت ایجادشده در کانال‌های میانی تقریبا یکسان می‌باشد. مطابق با نتایج، کمینه ضخامت در تمامی راستاها در ناحیه دیواره کانال ایجاد می‌شود. اما در راستای قطری، علاوه بر دیواره کانال، نواحی واقع بر شعاع انحنای مارپیچ نیز شاهد نازک‌شدگی قابل توجهی می‌باشند که ناشی از تغییر مسیر کرنش از حالت کرنش صفحه‌ای به سمت کشش دو محوری می‌باشد.

- بیشترین درصد نازک‌شدگی در صفحات دوقطبی فلزی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در راستای طولی (نسبت به سایر راستاها) ایجاد می‌شود. مقادیر درصد نازک‌شدگی در راستاهای قطری، عرضی و طولی در صفحات شکل‌یافته تا عمق ۰/۶۵ میلی‌متر، به ترتیب برابر با ۳۴/۱، ۳۶ و ۳۸/۶% می‌باشند.

-استفاده از روانکار موجب بهبود روند توزیع ضخامت در کانال بحرانی واقع بر راستای طولی می‌گردد. حداقل ضخامت ایجادشده در راستای

طولی از ۰/۰۶۱ میلی‌متر در شرایط بدون روانکار به ۰/۰۷۷ میلی‌متر در نمونه‌های شکل‌یافته به کمک روانکار، افزایش می‌یابد.

- بر مبنای نتایج حاصل از پژوهش حاضر و اهمیت بهبود جریان ورق در نواحی میانی به منظور تولید صفحاتی با نسبت عمق به پهنای کانال بیشتر، در پژوهش‌های آتی اصلاح فرایند و شرایط روانکاری متغیر به منظور تولید صفحات دوقطبی فلزی با نسبت عمق به پهنای کانال بیشتر و عدم وقوع ناپایداری در ناحیه میانی، توسط نویسندگان مورد بررسی قرار خواهندگرفت. همچنین، نتایج حاصل از پژوهش حاضر بیانگر تغییرات جریان ورق و مسیر کرنش (مکانیک تغییر شکل) در نواحی مختلف صفحات دوقطبی فلزی با الگوی موازی مارپیچ می‌باشد. با توجه به اینکه این موضوع وقوع شکست را تحت تاثیر قرار می‌دهد، انتخاب معیارهای شکست نرم و مدل‌سازی شکست متناسب با نوع بارگذاری در فرایند به عنوان پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا بتوان به نسبت عمق به پهنای کانال بیشتر دست یافت.

۶- مراجع

[1] S. Chubbock, R. Clague, Comparative analysis of internal combustion engine and fuel cell range extender, SAE International Journal of Alternative Powertrains, 5(1) (2016) 175-182.

[2] I. Bar-On, R. Kirchain, R. Roth, Technical cost analysis for PEM fuel cells, Journal of Power Sources, 109(1) (2002) 71-75.

[3] P. Costamagna, S. Srinivasan, Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II. Engineering, technology development and application aspects, Journal of power sources, 102(1-2) (2001) 253-269.

[4] K. Yao, K. Karan, K. McAuley, P. Oosthuizen, B. Peppley, T. Xie, A review of mathematical models for hydrogen and direct methanol polymer electrolyte membrane fuel cells, Fuel cells, 4(1-2) (2004) 3-29.

[5] R. Silva, D. Franchi, A. Leone, L. Pilloni, A. Masci, A. Pozio, Surface conductivity and stability of metallic bipolar plate materials for polymer electrolyte fuel cells, Electrochimica Acta, 51(17) (2006) 3592-3598.

[6] H. Kahraman, M.F. Orhan, Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling, Energy Conversion and Management, 133 (2017) 363-384.

[7] X. Li, I. Sabir, Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs, International journal of hydrogen energy, 30(4) (2005) 359-371.

[8] X. Yan, M. Hou, H. Zhang, F. Jing, P. Ming, B. Yi, Performance of PEMFC stack using expanded graphite bipolar plates, Journal of Power Sources, 160(1) (2006) 252-257.

[9] C. Minke, T. Hickmann, A.R. dos Santos, U. Kunz, T. Turek, Cost and performance prospects for composite bipolar plates in fuel cells and redox flow batteries, Journal of Power Sources, 305 (2016) 182-190.

[10] J.-C. Hung, D.-H. Chang, Y. Chuang, The fabrication of high-aspect-ratio micro-flow channels on metallic bipolar plates using die-sinking micro-electrical discharge machining, Journal of Power Sources, 198 (2012) 158-163.

[11] J.-C. Hung, T.-C. Yang, K.-c. Li, Studies on the fabrication of metallic bipolar plates—Using micro electrical discharge machining milling, Journal of Power Sources, 196(4) (2011) 2070-2074.

[12] S. Lim, Y. Kim, C. Kang, Fabrication of aluminum 1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65(1-4) (2013) 231-238.

[13] S.-H. Wang, J. Peng, W.-B. Lui, J.-S. Zhang, Performance of the gold-plated titanium bipolar plates for the light weight PEM fuel cells, Journal of Power Sources, 162(1) (2006) 486-491.

[14] S.-J. Lee, J.-J. Lai, C.-H. Huang, Stainless steel bipolar plates, Journal of Power Sources, 145(2) (2005) 362-368.

[15] S. Karimi, N. Fraser, B. Roberts, F.R. Foulkes, A review of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: materials and fabrication methods, Advances

in Materials Science and Engineering, 2012 (2012).

[16] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A. Gorji, Study of effective parameters inhydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, Modares Mechanical Engineering, 14(8) (2014).

[17] M. Elyasi, H. Talebi Ghadikolaee, M. Hosseinzadeh, Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(1-4) (2017) 765-776.

[18] H. Talebi Ghadikolaee, M. Elyasi, F.A. Khatir, M. Hosseinzadeh, Experimental investigation of Fracture in rubber pad forming of bipolar plate's micro channels, Procedia engineering, 207 (2017) 1647-1652.

[19] B. Abeyrathna, P. Zhang, M.P. Pereira, D. Wilkosz, M. Weiss, Micro-roll forming of stainless steel bipolar plates for fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, 44(7) (2019) 3861-3875.

[20] Q. Hu, D. Zhang, H. Fu, K. Huang, Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell—Numerical simulation and experiments, International Journal of Hydrogen Energy, 39(25) (2014) 13770-13776.

[21] H.J. Bong, J. Lee, J.-H. Kim, F. Barlat, M.-G. Lee, Two-stage forming approach for manufacturing ferritic stainless steel bipolar plates in PEM fuel cell: Experiments and numerical simulations, International Journal of Hydrogen Energy, 42(10) (2017) 6965-6977.

[22] S.-W. Choi, S.H. Park, H.-S. Jeong, J. Cho, S. Park, M.Y. Ha, Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process, Journal of mechanical science and technology, 26(8) (2012) 2397-2403.

[23] C.K. Jin, J.Y. Koo, C.G. Kang, Fabrication of stainless steel bipolar plates for fuel cells using dynamic loads for the stamping process and performance evaluation of a single cell, International Journal of Hydrogen Energy, 39(36) (2014) 21461-21469.

[24] H. Talebi-Ghadikolaee, H.M. Naeini, M.J. Mirnia, M.A. Mirzai, H. Gorji, S. Alexandrov, Fracture analysis on U-bending of AA6061 aluminum alloy sheet using phenomenological ductile fracture criteria, Thin-Walled Structures, 148 (2020) 106566.

[25] H. Talebi-Ghadikolaee, H.M. Naeini, M.J. Mirnia, M.A. Mirzai, S. Alexandrov, H. Gorji, Experimental and numerical investigation of failure during bending of AA6061 aluminum alloy sheet using the modified Mohr-Coulomb fracture criterion, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105(12) (2019) 5217-5237.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Talebi-Ghadikolaee, M. M. Barzegari. Experimental and numerical investigation of the plastic deformation of metallic bipolar plates with serpentine flow filed ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53 (6) (2021) 3717-3732.

DOI: 10.22060/mej.2020.18321.6797

This page intentionally left blank