مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 179-186

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی الگوهای قالب فرایند شکل‌دهی لاستیکی در تولید صفحات دوقطبی فلزی

مجید الیاسی[1*]، فرزاد احمدی خطیر[2]، مرتضی حسین زاده[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، آمل
* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 25 اردیبهشت 1394
پذیرش: 27 تیر 1394
ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:
شکل‌دهی لاستیکی
الگوی قالب محدب و مقعر
صفحه دوقطبی فلزی
پیل سوختی

چکیده

در این پژوهش، ساخت صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 316 L به ضخامت 0/1 میلی‌متر، به کمک فرایند شکل‌دهی لاستیکی مطالعه شده است. برای ساخت کانال‌های صفحات دوقطبی از دو نوع قالب با سبک تغییر شکل محدب و مقعر استفاده گردید. در این تحقیق با انجام مراحل تجربی، تأثیر الگوهای شکل‌دهی محدب و مقعر بر نیروی شکل‌دهی و مقدار پرشدگی شیارهای بوجود آمده بررسی شد و شرایط استفاده مناسب برای هر دو سبک تغییر شکل بدست آمد. برای انجام مراحل تجربی، به منظور مقایسه صحیح، هر دو الگوی قالب با ابعاد و اندازه‌های کاملا یکسان ساخته شد و از یک پد لاستیکی با سختی شور 85 و به ضخامت 25 میلی‌متر جهت شکل‌دهی صفحات استفاده گردید. به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی از یک پرس هیدرولیکی با حداکثر ظرفیت 200 تن استفاده شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در یک نیروی یکسان، قالب محدب میزان عمق پرشدگی بیشتری نسبت به قالب مقعر از خود نشان می‌دهد. با افزایش نیروی شکل‌دهی تا یک مقدار ماکزیمم، میزان عمق پرشدگی در قالب مقعر ثابت مانده و افزایش بیشتر نیرو موجب تخریب لاستیک خواهد شد.

Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for production of metallic bipolar plates

Majid Elyasi[1*], Farzad Ahmadi Khatir[1], Morteza Hosseinzadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 May 2015
Accepted 18 July 2015
Available Online 15 August 2015

Keywords:
Rubber Pad Forming
Concave and Convex Die Patterns
Metallic Bipolar Plate
Fuel Cell

ABSTRACT

The present study investigates the manufacturing process of metallic bipolar plates made of SS316L with a thickness of 0.1 mm using rubber pad forming process. Two deformation types, convex or concave patterns, were used for producing channels in bipolar plates. The effect of concave and convex patterns on forming forces and slot filling will be created in the present study and then suitable condition for both patterns of deformation will be achieved. For carrying out the experimental examination, two dies, convex and concave pattern within equal dimensions were designed and manufactured. In order to accurately compare two die patterns, a rubber pad with hardness of Shore A 85 and thickness of 25 millimeters was used for forming of plates. A hydraulic press with capacity of 200 tons was used to produce force on die. The concluded results signify that in an equal magnitude of force, die with convex pattern shows more depth of filling than concave die. By increasing magnitude forming force up to maximum limit, depth of filling in concave die will be constant and further increases in magnitude of force will cause the rubber to be destroyed.

1- مقدمه

پیل‌های سوختی[1] فن‌آوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کنند. پیل‌های سوختی نسبت به موتورهای احتراق داخلی دارای مزیت‌هایی می‌باشند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به بازدهی بالاتر پیل‌های سوختی، سازگار بودن با محیط زیست به‌دلیل نداشتن آلودگی صوتی و قابلیت تولید هم‌زمان حرارت، الکتریسیته و بسیاری از موارد مهم دیگر اشاره کرد.

صفحات دوقطبی یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک پیل سوختی می‌باشند. این صفحات وسیله‌ای جهت توزیع جریان سوخت در سمت آند و اکسیژن یا هوا در سمت کاتد هستند. علاوه بر این، سیال خنک کننده در صفحات دو قطبی جریان پیدا می‌کند و توزیع گازهای واکنش دهنده توسط شیارهای ایجاد شده بر روی سطح این صفحات انجام می‌گیرد [1].

صفحات دوقطبی مجموعا حدود 75 درصد از وزن یک پیل سوختی و 11 تا 45 درصد از هزینه یک مجموعه پیل سوختی را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل انتخاب یک جنس و روش تولید مناسب برای صفحات پیل سوختی سهم بسزایی در بازده و طول عمر یک پیل سوختی و همچنین

1- Fuel Cell

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir, M. Hosseinzadeh, Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for production of metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 9, pp. 179-186, 2015 (In Persian)

هزینه تمام شده آن ایفا می‌کند [3،2].

صفحات دوقطبی بدلیل قرار گرفتن در محیط مرطوب و شدیداً اسیدی پیل سوختی پلیمری، باید در برابر خوردگی مقاومت بالایی داشته باشند. در غیر اینصورت، لایه پایدار ناشی از خوردگی روی سطح صفحه دوقطبی فلزی سبب مسمومیت غشای الکترولیت و کاهش رسانایی یونی آن شده که موجب افت توان نهایی پیل سوختی گردیده و طول عمر آن را کاهش می‌دهد. همچنین این صفحات باید دارای استحکام مکانیکی بالا، مقاومت بالا در برابر شوک و ضربه، رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب و تولید آسان داشته باشند. صفحات پیل سوختی به طور کلی از نظر نوع جنس شامل گرافیت غیر متخلخل، کامپوزیت‌ها و مواد فلزی هستند. همچنین کامپوزیت‌ها به دو دسته پلیمر- کربن و پلیمر- فلز و فلزات به دو دسته با پوشش و بدون پوشش تقسیم بندی می‌شوند [4-6].

گرافیت به‌دلیل مقاومت در برابر خوردگی بالا و رسانایی الکتریکی خوب، یک گزینه مناسب برای صفحات دوقطبی بشمار می‌رود. اما به علت استحکام مکانیکی کم و نیز هزینه زیاد ساخت این صفحات، توجه محققان را به استفاده از صفحات دو قطبی فلزی معطوف کرده است.

صفحات فلزی، هزینه پایین، خواص حرارتی و مکانیکی عالی و سهولت در ساخت دارند، اما بحث مقاوم بودن این صفحات در مقابل خوردگی و هزینه‌های شکل‌دهی آن باید کنترل شود. جهت محافظت در مقابل خوردگی این صفحات از انواع پوشش‌هایی با جنس‌های مختلف اعم از پایه کربنی، پلیمری، گرافیتی و پایه فلزی مانند پوشش طلا و قلع استفاده می‌شود. به منظور کاهش در هزینه‌های تولید این صفحات باید از یک روش کارآمد و کم هزینه برای شکل‌دهی این صفحات استفاده کرد.

روش‌های گوناگونی برای شکل دادن به صفحات دوقطبی فلزی از جمله فرایند الکترومگنت فرمینگ[1]، لیزر شوک فرمینگ[2]، هیدروفرمینگ[3]، گس فرمینگ[4]، استمپینگ[5] و شکل دهی لاستیکی وجود دارد [7].

یکی از رایج‌ترین روش‌ها در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، فرایند شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی می‌باشد. در این فرایند، لاستیک در داخل یک محفظه صلب قرار می‌گیرد و از اطراف توسط این محفظه محصور شده و فقط سطح بالایی لاستیک با ورق و قالب در تماس است. در واقع محفظه صلب تنها نقش نگاه دارنده لاستیک را بر عهده دارد. به عبارت دیگر، وظیفه این محفظه جلوگیری از تغییر شکل بیش از اندازه لاستیک به اطراف در هنگام اعمال نیرو و همچنین اتصال به بستر پرس است. لاستیک رفتاری الاستومری و تراکم ناپذیر از خود نشان می‌دهد و شکل‌دهی با استفاده از نیروی ایجاد شده توسط یک پرس هیدرولیکی به انجام می‌رسد که به دلیل خاصیت ارتجاعی لاستیک و بالا رفتن کیفیت سطحی، همیشه مورد توجه قرار می‌گیرد. برخی لاستیک‌ها دارای خواص مکانیکی مناسبی هستند که آن‌ها را به یک ابزار قابل تغییر شکل تبدیل کرده است. این موضوع به طراحان این اجازه را می‌دهد تا از انعطاف‌پذیری لاستیک و خواص مکانیکی آن در طراحی ابزار کمک بگیرند. انعطاف پذیر بودن لاستیک باعث می‌شود که حجم زیادی از عملیات ماشین‌کاری لازم برای ساخت ابزار حذف شود چرا که لاستیک با خواص شکل‌دهی مناسب جایگزین نیمی از ابزار (سنبه یا ماتریس) می‌شود و نیمه دیگر با استفاده از خاصیت انعطاف پذیری لاستیک، شکل مورد نظر را تحت بار اعمال شده به خود می‌گیرد.

در مقایسه با فرایند استمپینگ که به دو قالب بالا و پایین نیاز دارد، شکل‌دهی لاستیکی دارای هزینه ساخت قالب کم است. لاستیک استفاده شده در این روش تنها یک سطح صاف و بدون شکل خاص می‌باشد که ابعاد آن را می‌توان با توجه به ابعاد قطعه به راحتی تخمین زد. به این دلیل، این فرایند نسبت به سایر فرایندهای دیگر مانند هیدروفرمینگ دارای هزینه تجهیزات کمتری بوده و زمان آماده سازی این فرایند، بدلیل ساده بودن اجزای آن، کوتاه می‌باشد و برای تولید انبوه بسیار مناسب است [8].

در زمینه تولید صفحات دوقطبی فلزی پژوهش‌هایی صورت گرفته است که در ادامه مطالب به چند نمونه از آنها به اختصار اشاره شده است.

لیو و همکاران در سال 2010 به بررسی تأثیر الگوهای شکل‌دهی برای تولید صفحات دوقطبی فلزی در فرایند شکل دهی لاستیکی پرداخته‌اند. در این پژوهش دو قالب محدب و مقعر برای یک تک کانال از صفحات دوقطبی ساخته شده و تأثیر این دو الگو بر نیروی پرشدگی و توزیع ضخامت کانال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به کمک شبیه سازی دوبعدی نسبت عرض کانال (w) به عرض دنده (s) را مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت عرض کانال به عرض دنده بزرگتر از 1 باشد روش مقعر مناسب‌تر بوده و در غیر این صورت از الگوی محدب استفاده می شود [9].

یول سون و همکاران در سال 2012 به شکل‌دهی صفحات آلومینیومی به کمک فرایند شکل‌دهی لاستیکی[6] پرداخته‌اند. جهت بررسی پارامترهایی چون سرعت و فشار پانچ در میزان عمق پرشدگی کانال‌های جریان، از یک قالب با الگوی محدب و از لاستیک با سختی‌های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داده که با افزایش سرعت و فشار، میزان عمق پرشدگی بیشتری برای کانال‌های جریان بدست آمده است. ماکزیمم کاهش ضخامت ورق نیز با افزایش سرعت و فشار پانچ، افزایش می‌یابد [10].

اوصیا و همکاران دو روش هیدروفرمینگ محدب و مقعر را به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنان نشان داد که صفحات دوقطبی شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ محدب دارای عملکرد بهتر به دلیل پرشدگی بهتر پروفیل الگو و عمرکاری طولانی‌تری به دلیل توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌باشد. آنها همچنین اظهار داشتند که به دلیل عدم پرشدگی کامل پروفیل به کمک روش هیدروفرمینگ، انجام یک مرحله استمپینگ نهایی به منظور شکل‌دهی کامل پروفیل مورد نظر ضروری است [11].

محمد تبار و همکاران، شکل‌دهی بخشی از کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی با الگوی جریان مارپیچ را با روش هیدروفرمینگ بررسی کردند. به منظور انجام آزمایشات تجربی، دو اینسرت با هندسه‌های محدب و مقعر را ساختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت محدب، مقدار درصد پرشدگی برای فرایند دو مرحله‌ای (مرحله اول روی قالب مقعر و مرحله دوم روی قالب محدب)، 81/45% و برای فرایند سه مرحله‌ای (مرحله اول روی قالب مقعر، آنیل، مجددا روی قالب مقعر و سپس در قالب محدب)، 95/91% بدست آمده است [12].

یافتن یک روش مناسب که دارای سرعت بالا و کمترین هزینه باشد، به منظور سهولت در تجاری سازی صفحات پیل سوختی بسیار حائز اهمیت است. هرچقدر که تعداد کانال‌های جریان افزایش می‌یابد، به تبع آن سطح صفحات دوقطبی نیز بزرگتر می‌گردد که شکل دادن این کانال‌ها در روش

1- Electromagnet Forming
2- Laser Forming
3- Hydro Forming
4- Gas Forming
5- Stamping
6- Rubber Pad Forming

هیدروفرمینگ به فشار بسیار بالایی نیازمند است و به دنبال آن هزینه بسیار زیاد برای تهیه سیستم تامین فشار لازم است. همچنین مشکلات مربوط به آب بندی سیال در هیدروفرمینگ نیز با افزایش سطح تماس بیشتر می‌شود. اما در مقایسه با روش هیدروفرمینگ، روش شکل دهی لاستیکی هزینه بسیار پایینی دارد زیرا تنها به یک قالب و یک لاستیک به منظور شکل‌دهی صفحات نیاز دارد. همچنین این روش نسبت به سایر روش‌ها به زمان بسیار کوتاهی نیازمند است زیرا تنها با قرار دادن ورق بر روی لاستیک و اعمال یک کورس پرس، ورق فرم قالب را به خود می‌گیرد.

برای تولید یک صفحه دوقطبی فلزی هم می‌توان از قالب محدب که نقش سنبه را در فرایند استمپینگ دارد و هم از قالب مقعر که نقش ماتریس را بازی می‌کند، استفاده کرد. اما چون در فرایند شکل‌دهی لاستیکی، لاستیک جایگزین یکی از دو سمت قالب شده است، انتخاب سمت دیگر قالب که می‌تواند یکی از دو قالب محدب یا مقعر باشد، در تولید صفحه نهایی تأثیر می‌گذارد.

در زمینه بررسی تأثیر الگوهای شکل‌دهی محدب و مقعر در فرایند شکل‌دهی لاستیکی تنها مرجع [۹] پژوهشی را برای ساخت یک کانال از این صفحات انجام داده است. زمانیکه تعداد کانال‌های صفحات دوقطبی افزایش پیدا می‌کند نحوه شکل پذیری صفحات و همچنین جریان یافتن لاستیک به درون حفره‌های کانال متفاوت از یک تک کانال می‌شود که در نتیجه داده‌های یک تک کانال را نمی‌توان به یک صفحه دوقطبی کامل تعمیم داد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی پارامترهای متناسب با الگوهای شکل‌دهی محدب و مقعر در فرایند شکل‌دهی لاستیکی در تولید صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیاری مارپیچ موازی است که در آن بهترین یکنواختی عمق کانال حاصل شود و همچنین هندسه مورد نظر به خوبی شکل بگیرد. همانگونه که پیشتر بیان گردید به دلیل آنکه پژوهش‌های اندکی در مورد ساخت صفحات دوقطبی فلزی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی انجام شده است در این پژوهش، شکل‌دهی یک صفحه دوقطبی کامل بررسی شده است. همچنین، به دلیل اهمیت عمق و شکل میکروکانال در عملکرد صفحات پیل سوختی، عمق پرشدگی میکروکانال‌ها در نیروهای مختلف برای هر دو الگوی قالب بررسی شده و شرایط بهینه برای هر دو الگو بدست آمده است.

۲- مراحل تجربی

در این پژوهش از ورق فولاد ضد زنگ آستنیتی L ۳۱۶ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. علت استفاده از این جنس صفحه، مقامت در برابر خوردگی بالاتر و شکل پذیری بهتر در بین صفحات آستنیتی می‌باشد.

در این پژوهش از الگوی شیاری مارپیچ استفاده شده است. همچنین به جهت مقایسه‌ی دو الگوی محدب و مقعر تمامی ابعاد و اندازه‌ها (شعاع گوشه، عمق کانال) یکسان در نظر گرفته شده است. شکل ۱ طرح اولیه الگو و ابعاد و اندازه‌های این قالب‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به مراجع قبلی، بهترین ترکیب زاویه دیواره و شعاع گوشه به ترتیب ۱۰ درجه و ۰/۲ میلی‌متر به دست آمده بود که در این پژوهش نیز این مقادیر انتخاب شد. اما عمق کانال‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که با توجه به ضخامت اولیه ورق، فرایند شکل‌دهی لاستیکی در پیچیده‌ترین حالت نسبت به پژوهش‌های پیشین بررسی شود.

در شکل ۲، قالب محدب و مقعر ساخته شده از جنس فولاد SPK نشان داده شده است. شیارهای این قالب به کمک دستگاه کنترل عددی با دقت بالا ماشین‌کاری شده است. همان‌طور که ذکر شد از لایه لاستیک برای شکل دادن ورق استفاده گردید. بدین منظور از یک پد لاستیکی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر از جنس لاستیک پلی اورتان با عدد سختی شور[1] ۸۵ برای شکل‌دهی صفحات استفاده گردید.

شکل ۳ اجزای کلی قالب مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. به منظور اعمال نیرو به مجموعه قالب برای شکل‌دهی صفحات از یک پرس هیدرولیکی با دقت بالا و مجهز، با حداکثر ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شده است. نمایی از این پرس، در شکل ۴ نمایان است.

شکل ۱ طرح اولیه الگوی شیاری و ابعاد و اندازه‌های آن (میلی‌متر)

شکل ۲ الف- قالب محدب، ب- قالب مقعر

شکل ۳ اجزای کلی قالب

1- Shore A 85

شکل ۴ دستگاه پرس استفاده شده جهت اعمال نیرو به قالب

برای انجام تست‌های لازم، ورق در ابعاد مورد نظر بریده شده و درون قالب تنظیم گردیده است. سپس نمونه‌ها تحت نیروهای ۴۰ تن تا ۱۵۰ تن شکل داده شدند. کلیه مراحل تست، جهت انجام مقایسه صحیح، با شرایط کاملا یکسان برای هر دو قالب مقعر و محدب تست شده است و پارامتر مقدار پرشدگی در دو راستای برش برای این نمونه‌ها بررسی گردید.

به منظور بررسی پروفیل پرشدگی نمونه‌ها پس از پایان تست، نمونه‌ها به کمک دستگاه وایرکات[1] (برش سیمی) در دو راستای برش مطابق شکل ۵ برش داده شده و سپس بر روی نمونه‌های برش خورده، عملیات مانت کردن انجام گرفته است. جهت مشاهده دقیق پروفیل نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ، سنباده زنی و پولیش کاری سطح صورت گرفته است. در ابتدا پروفیل نمونه‌ها در دستگاه اندازه‌گیری تصویری- ویدیویی[2] با بزرگنمایی ۲۰ برابر مشاهده گردیدند. در ادامه به منظور اندازه‌گیری با دقت بالاتر لازم است تا پروفیل نمونه‌ها با بزرگنمایی بیشتر مشاهده گردند لذا از دستگاه میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰ برابر استفاده شد. جهت اندازه‌گیری عمق پرشدگی کانال‌ها از نرم افزار اندازه‌گیری[3] که بر روی سیستم کامپیوتر نصب بوده و سیستم کامپیوتر به میکروسکوپ متصل می‌باشد، اندازه‌گیری‌ها با دقت بالا انجام گرفته است. شکل ۵ خلاصه مراحل آماده سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

در انجام این پژوهش مشاهده شده است که روش شکل‌دهی لاستیکی برای تولید صفحات دو قطبی فلزی، به یک زمان کوتاه جهت نصب تجهیزات تست و آماده سازی صفحات نیاز دارد. مدت زمان اندازه‌گیری شده برای نصب تجهیزات کمتر از ۵ دقیقه بود که تنها در اولین بار نصب این زمان صرف شد. مدت زمان صرف شده برای قرار دادن پد لاستیکی و صفحه در محفظه حدودا ۱۰ ثانیه، زمان لازم برای وارد کردن نیرو به قالب، ۳۰ ثانیه و حداکثر زمان برداشتن صفحه دو قطبی و قرار دادن صفحه جدید ۱۰ ثانیه بود. به طور کلی زمان پروسه تولید یک صفحه دو قطبی با این فرایند از لحظه قرار دادن ورق اولیه تا قطعه نهایی، یک دقیقه بود.

۳- نتایج و بحث

رابطه (۱)، درصد پرشدگی کاناهای صفحات دوقطبی را نشان می‌دهد. در این رابطه D و d به ترتیب بیشترین عمق کانال قالب و بیشترین عمق کانال صفحه شکل گرفته را نشان می‌دهد.

$$\text{درصد پرشدگی} = D/d \times 100 \qquad (۱)$$

1- Wire Cut
2- VMM-VMS
3- Measurement

شکل ۵ مراحل آماده سازی نمونه‌های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و مشاهده پروفیل پرشدگی نمونه‌ها، ۱- برش ورق با دستگاه برش سیمی در دو راستای طولی و عرضی، ۲- مانت کردن نمونه‌های طولی و عرضی به منظور مشاهده مقطع در زیر میکروسکوپ، ۳- دستگاه دورانی مخصوص سنباده‌زنی و پولیش‌کاری نمونه‌های مانت شده، ۴- دستگاه اندازه‌گیری تصویری-ویدیویی برای مشاهده مقطع پروفیل مانت شده با بزرگنمایی ۲۰ برابر، ۵- میکروسکوپ برای مشاهده مقطع پروفیل مانت شده با بزرگنمایی ۴۰ برابر و همچنین اندازه‌گیری نمونه‌ها، ۶- تصویر با بزرگنمایی ۴۰ برابر، ۷- تصویر با بزرگنمایی ۲۰ برابر

۳-۱- تأثیر نیرو در میزان پرشدگی عمق کانال

شکل ۶ مقادیر پرشدگی میکروکانال‌ها را برای دو الگوی محدب و مقعر در برش طولی در مقادیر نیروهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش نیروی اعمالی پرس به قالب، عمق پرشدگی کانال‌ها برای هر دو الگو افزایش یافته است که این مقدار پرشدگی در قالب محدب بیشتر از قالب مقعر می‌باشد. حداکثر عمق پرشدگی در الگوی محدب در راستای طولی و در نیروی ۱۵۰ تن، ۰/۶۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که با توجه به رابطه (۱)، ۸۵٪ عمق پرشدگی برای این راستا بدست آمده است. در قالب مقعر، بیشترین عمق پرشدگی ۰/۴۸ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید که با محاسبه از رابطه (۱)، ۶۴٪ عمق پرشدگی در این الگو بدست آمده است. هر چه قدر که مقادیر نیرو افزایش پیدا می‌کند اختلاف در عمق کانال‌های جریان در دو الگو بیشتر می‌شود به طوری‌که با افزایش نیروی بیشتر از ۱۵۰ تن در قالب محدب پارگی در کانال‌های صفحه رخ می‌دهد در حالیکه در قالب مقعر مقدار پرشدگی در عمق کانال تقریبا ثابت می‌ماند و افزایش بیشتر نیرو موجب خرابی لاستیک خواهد شد. شکل ۷ پارگی کانال‌های صفحات دوقطبی در قالب محدب را نشان می‌دهد که در نیروی ۱۶۰ تن حاصل شده است.

بدلیل میزان لقی که بین قالب بالا و قالب پایین (لاستیک) وجود دارد، امکان جریان یافتن لاستیک به درون حفره‌های کانال مقعر سخت‌تر گردیده و لاستیک از این فاصله لقی به بیرون جریان می‌یابد که هرچقدر این میزان نیرو افزایش یابد به همان مراتب خرابی در لاستیک بیشتر می‌شود که این خرابی در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۹ مقادیر عمق پرشدگی کانال‌ها را در برش عرضی که تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای طولی بریده شده است را نشان می‌دهد. مقدار عمق پرشدگی میکروکانال‌ها در این راستا در هر دو الگوی محدب و مقعر نسبت به راستای طولی افزایش داشته است. حداکثر عمق پرشدگی در الگوی محدب در برش عرضی، ۰/۶۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که با توجه به رابطه (۱)، دارای ۹۰ ٪ عمق پرشدگی می‌باشد. به همین ترتیب در قالب

مقعر نیز بیشترین عمق پرشدگی ۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید که با احتساب رابطه (۱)، ۶۷٪ عمق پرشدگی برای این الگو بدست آمده است. علت افزایش بیشتر عمق پرشدگی کانال در این راستا نسبت به راستای طولی را می‌توان به پهنای بیشتر کانال در راستای عرضی مطابق شکل ۲ دانست که در واقع فضا برای سیلان یافتن لاستیک بیشتر است که باعث می‌شود لاستیک در این قسمت نسبت به راستای طولی راحت‌تر ورق را به درون این کانال‌ها هدایت کند، در نتیجه عمق کانال بیشتری نسبت به راستای طولی بدست می‌آید.

شکل ۶ عمق پرشدگی کانال در برش طولی در قالب محدب و مقعر

شکل ۷ پارگی در کانال‌های ورق

شکل ۸ تخریب لاستیک

شکل ۹ عمق پرشدگی کانال در برش عرضی در قالب محدب و مقعر

۳-۲- یکنواختی عمق کانال

داشتن عمق کانال‌های یکسان در یک صفحه دوقطبی یکی از مزایای شکل‌دهی صفحات دوقطبی است. یعنی تمامی کانال‌ها باید دارای یک عمق پرشدگی یکسان باشند. در غیر اینصورت عملکرد صفحه در داخل مجموعه پیل سوختی با مشکل مواجه می‌شود. زیرا فشار سیال در کانال‌هایی با عمق یکسان، یکنواخت بوده و در صفحاتی که دارای کانال‌هایی با عمق نایکسان هستند، موجب نایکنواختی فشار سیستم گردیده و در نتیجه بازده و طول عمر یک پیل سوختی را کاهش می‌دهد. شکل ۱۰ ورق شکل گرفته را نشان می‌دهد که در راستای طولی بریده شده و به منظور بررسی یکنواختی عمق کانال‌ها رسم شده است.

شکل ۱۱، یکنواختی عمق کانال‌های پرشده در راستای طولی را برای قالب محدب نشان می‌دهد. با ملاحظه این شکل دیده می‌شود که پس از شکل‌دهی، صفحه در راستای طولی برش خورده و جهت اندازه‌گیری یکنواختی عمق کانال‌ها، اندازه‌گیری‌ها در سه قسمت مجزا از هم انجام گرفته است که این سه قسمت شامل کانال‌های ابتدایی، کانال‌های وسط و کانال‌های انتهایی می‌باشد. همچنین به منظور افزایش بیشتر دقت، اندازه‌گیری در هر یک از این موقعیت‌ها در سه کانال انجام گرفته است که این موقعیت‌ها از کانال شماره ۱ تا کانال شماره ۹ را شامل می‌شود.

به منظور بدست آوردن خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال‌ها، از رابطه (۲) استفاده شده است. مقادیر درصد خطای هر کانال برای قالب محدب، در نیروهای مختلف در جدول ۱ خلاصه شده است.

$$\text{درصد خطا} = \frac{|\text{عمق کانال در هر موقعیت} - \text{میانگین عمق کانال‌های اندازه‌گیری شده}|}{\text{میانگین عمق کانال‌های اندازه‌گیری شده}} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

نتیجه حاصل شده از شکل ۱۱ و جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین خطای حاصل از یکنواختی در عمق پرشدگی کانال‌ها کمتر از ۲٪ بدست آمده است که البته این یکنواختی در نیروهای پایین‌تر محسوس‌تر می‌باشد اما با افزایش نیرو این اختلاف در پرشدگی کانال‌ها بیشتر می‌شود، زیرا همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد، افزایش بیشتر نیرو در قالب محدب موجب پارگی در کانال‌های صفحات شکل‌داده شده می‌شود و از این نتیجه می‌توان دریافت که سطح تماس لاستیک با ورق در کانال‌های میانی بیشتر از کانال‌های اطراف می‌باشد، به همین جهت در این موقعیت، کانال‌ها عمق بیشتری نسبت به کانال‌های گوشه دارند. همچنین، سایر عوامل دیگری که سبب این اختلاف در اندازه می‌شود را می‌توان به خطاهای موجود در نحوه آماده سازی و اندازه‌گیری این نمونه‌ها دانست، زیرا سنباده زدن و پولیش کردن سطح باید با دقت بالایی انجام گیرد و احتمال خطای اپراتوری در هنگام انجام این پروسه بالاست. به همین دلیل این اختلاف‌های موجود در عمق پرشدگی کانال را می‌توان مجاز شمرد.

شکل ۱۰ برش طولی به منظور بررسی یکنواختی عمق کانال

شکل ۱۱ عمق پرشدگی کانال‌های قالب محدب در برش طولی

جدول ۱ درصد خطای یکنواختی عمق کانال در قالب محدب در نیروهای مختلف (تن)

موقعیت کانال	۴۰	۵۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۵۰
۱	۰/۲۴	۰/۵۰	۰/۲۲	۱۰/۶۲	۱/۷۷	۲/۶۸
۲	۱/۹۲	۱/۲۶	۲/۸۸	۰/۲۷	۳/۲۴	۱/۸۶
۳	۴/۶۰	۰/۸۰	۱/۵۵	۰/۲۷	۰/۴	۱
۴	۴/۱۱	۱/۶۸	۲/۸۸	۱/۳۶	۱/۳۳	۲/۶۸
۵	۰/۰۸	۱/۰۹	۳/۱۰	۱/۹	۰/۹۶	۰/۶۳
۶	۱/۰۳	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۲۷	۱/۸۷	۰/۱۸
۷	۰/۵۳	۰/۷۸	۰/۸۸	۵/۷۲	۱/۷۷	۳/۴۵
۸	۰/۰۸	۱/۰۲	۴/۴۳	۴/۶۳	۰/۵۱	۱/۴۰
۹	۰/۹	۱/۳۴	۱/۱۰	۰/۵۵	۱/۳۱	۱/۸۱

در شکل ۱۲، عمق کانال‌های اندازه‌گیری شده به منظور بررسی یکنواختی در قالب مقعر نشان داده شده است. همانند صفحه شکل داده شده در قالب محدب، در این قالب نیز پس از شکل دادن، صفحه در راستای طولی برش خورده و برای ۹ کانال بررسی گردیده است. جدول ۲ میزان درصد خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال را در قالب مقعر در نیروهای مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که ذکر شد در قالب مقعر افزایش بیشتر نیرو، تأثیری چندانی در عمق پرشدگی کانال‌ها نخواهد داشت چرا که افزایش بیشتر نیرو موجب خرابی لاستیک می‌شود. به این دلیل، در نیروی ۸۰ تن و ۱۰۰ تن اختلاف چندانی در مقدار پرشدگی ملاحظه نمی‌شود.

میانگین خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال در قالب مقعر کمتر از ۴٪ اندازه‌گیری شده است. با مقایسه نتایج حاصل از جداول ۱ و ۲ می‌توان دریافت که قالب محدب نسبت به قالب مقعر از یکنواختی عمق کانال بیشتری برخوردار است.

اختلاف اندازه پرشدگی عمق کانال در قالب محدب، در دو برش طولی و عرضی در شکل ۱۳ نمایان است. جهت بررسی اختلاف در اندازه عمق کانال‌ها در دو راستای طولی و عرضی از مقادیر نیروی ۴۰ تن تا ۱۵۰ تن استفاده شد. لازم به ذکر است به دلیل آنکه در راستای طولی عمق کانال در نه موقعیت اندازه‌گیری شد. برای نشان دادن اختلاف عمق پر شدگی در دو راستای طولی و عرضی در نیروهای مختلف از مقدار میانگین این نه موقعیت در هر نیروها استفاده شده است.

میزان اختلاف در عمق کانال‌ها در دو راستای طولی و عرضی، در بیشترین حالت برای قالب محدب، ۳۰٪ بدست آمد. هرچقدر که نیروی وارد

شکل ۱۲ عمق پرشدگی کانال‌های قالب مقعر در برش طولی

جدول ۲ درصد خطای یکنواختی عمق کانال در قالب مقعر در نیروهای مختلف (تن)

موقعیت کانال	۴۰	۵۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
۱	۶/۲۹	۳/۱۸	۶/۱۹	۱/۶۴	۲/۸۹
۲	۱/۶۹	۳/۵۰	۶/۱۹	۰/۵۵	۲/۳۴
۳	۷/۴۴	۰/۹۴	۱/۵۲	۱/۰۹	۰/۴۱
۴	۷/۸۴	۵/۴۶	۲/۱۶	۰/۵۵	۳/۴۵
۵	۳/۶۴	۲/۵۸	۳/۱۴	۱/۰۹	۲/۳۴
۶	۲/۸۷	۶/۴۲	۳/۱۵	۲/۷۴	۵/۵۰
۷	۶/۰۱	۱/۱۲	۰/۴۸	۱/۶۴	۷/۵۸
۸	۰/۳۵	۴/۱۴	۰/۱۹	۳/۸۴	۹/۲۳
۹	۴/۵۸	۱/۵۵	۵/۱۵	۱/۰۹	۰/۶۹

شکل ۱۳ اختلاف در عمق پرشدگی کانال‌های صفحه تولید شده از قالب محدب در دو راستای طولی و عرضی

شده به قالب تا یک حد مجاز افزایش می‌یابد، به دلیل افزایش بیشتر سطح تماس لاستیک با ورق در کانال‌های طولی، عمق پرشدگی در راستای طولی افزایش می‌یابد که میزان اختلاف خود را با راستای عرضی کمتر می‌کند.

در مجموع در قالب محدب هنگامی که نیرو تا یک حد ماکزیمم افزایش پیدا کند اختلاف در عمق پرشدگی کانال در دو راستای طولی و عرضی کمتر می‌شود.

شکل ۱۴ میزان اختلاف در عمق پرشدگی کانال‌ها را برای قالب مقعر در دو راستای برش طولی و عرضی در نیروهای مختلف نشان می‌دهد. در این قالب نیز مشابه قالب محدب از مقادیر نیروی ۴۰ تن تا ۱۵۰ تن استفاده شد و از میانگین اندازه عمق کانال‌ها در برش طولی استفاده گردیده است.

شکل ۱۴ اختلاف در عمق پرشدگی کانال‌های صفحه تولید شده از قالب مقعر در دو راستای طولی و عرضی

همان‌طور که ذکر شد، افزایش نیروی بیشتر از ۱۰۰ تن فقط سبب خرابی لاستیک مطابق شکل ۸ می‌شود و بر عمق پرشدگی کانال‌ها تأثیر چندانی ندارد. بیشترین میزان اختلافی که از دو راستای برش بدست آمده است ۵٪ بوده است که نشان‌دهنده میزان اختلافی اندک بین دو راستای برش می‌باشد. همچنین این میزان اختلاف نسبت به قالب محدب کمتر می‌باشد که نشان‌دهنده یکنواخت‌تر پرشدن قالب مقعر نسبت به محدب می‌باشد.

۳-۳ صفحات تولید شده

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ صفحات تولید شده نهایی از قالب محدب و مقعر را نشان می‌دهد که در واقع دارای بیشترین درصد پرشدگی می‌باشند. همچنین جدول ۳ مشخصات هندسی اندازه‌گیری شده از صفحات را نشان می‌دهد.

با ملاحظه شکل ۱۵ دیده می‌شود که قطعه نهایی با الگوی محدب در نیروی ۱۵۰ تن به طور سالم و بدون پارگی شکل یافته است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که به طور میانگین درصد پرشدگی در راستای طولی، درصد پرشدگی در راستای عرضی، درصد خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال و درصد اختلاف عمق پرشدگی طولی و عرضی به ترتیب ۸۵٪، ۹۰٪، ۲٪ و ۳۰٪ به دست آمده است. این مقادیر برای قطعه سالم شکل یافته در قالب مقعر در شرایط یکسان به ترتیب ۶۴٪، ۶۷٪، ۴٪ و ۵٪ به دست آمده است.

با مقایسه مقادیر به دست آمده برای هر یک از این دو الگو می‌توان دریافت که در شرایط یکسان، عمق پرشدگی در قالب محدب نسبت به قالب مقعر بیشتر است. همچنین نتایج به دست آمده از درصد اختلاف عمق پرشدگی طولی و عرضی قالب مقعر نسبت به قالب محدب نشان می‌دهد که اختلاف عمق پرشدگی در راستای طولی و عرضی برای قطعه حاصل شده از قالب مقعر کمتر است.

۴-نتیجه‌گیری

این پژوهش، به شکل‌دهی صفحات دوقطبی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی پرداخته است. برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی، می‌توان از هر دو الگوی محدب و مقعر استفاده کرد. در این تحقیق، تأثیر الگوهای شکل‌دهی محدب و مقعر بر عمق پرشدگی کانال‌های صفحات دوقطبی و همچنین یکنواختی عمق کانال‌های پرشده بررسی گردیده است.

شکل ۱۵ صفحه تولید شده از قالب محدب

شکل ۱۶ صفحه تولید شده از قالب مقعر

جدول ۳ ابعاد هندسی صفحات تولید شده نهایی

پارامترهای هندسی	الگوی محدب	الگوی مقعر
درصد پرشدگی در راستای طولی	٪۸۵	٪۶۴
درصد پرشدگی در راستای عرضی	٪۹۰	٪۶۷
خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال	٪۲	٪۴
اختلاف عمق پرشدگی در راستای طولی و عرضی	٪۳۰	٪۵

نتایج بدست آمده از این پژوهش عبارت است از:

- با افزایش نیرو، عمق پرشدگی کانال‌ها در هر دو راستای طولی و عرضی، برای هر دو قالب محدب و مقعر افزایش می‌یابد.
- بیشینه درصد پرشدگی در راستای طولی در قالب محدب، ۸۵٪ می‌باشد که در نیروی ۱۵۰ تن اندازه‌گیری شده است. در حالی که در قالب مقعر در همین نیرو، ۶۴٪ بدست آمده است.
- افزایش نیروی بیشتر از ۱۵۰ تن، موجب پارگی در کانال‌های ورق در قالب محدب می‌گردد، در صورتی که در قالب مقعر، ازدیاد نیرو موجب پارگی لاستیک می‌شود.
- بیشینه درصد پرشدگی در راستای عرضی و در نیروی ۱۵۰ تن، در قالب محدب، ۹۰٪ بدست آمده است در حالی که در قالب مقعر، ۶۷٪ اندازه‌گیری شده است. این نتیجه به این معنی است که عمق پرشدگی در قالب محدب نسبت به قالب مقعر در یک نیروی یکسان بیشتر است.

- اختلاف در عمق پرشدگی، در دو راستای طولی و عرضی، به ترتیب در قالب محدب و مقعر، 30% و 5% اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده یکنواخت‌تر پرشدن الگوی مقعر نسبت به محدب است. به عبارت دیگر، درصورتی که یکنواخت پرشدن کانال نسبت به عمق پرشدگی در راستاهای طولی و عرضی در تولید یک صفحه دوقطبی مد نظر باشد الگوی مقعر ترجیح داده می‌شود.

- درصد خطای حاصل از یکنواختی عمق کانال در قالب محدب، کمتر از 2% می‌باشد، اما در قالب مقعر این مقدار کمتر از 4% بدست آمده است که نشان می‌دهد قالب محدب دارای یکنواختی عمق کانال بیشتری نسبت به قالب مقعر می‌باشد.

5-مراجع

[1] M.T. Bahramipoor, S.M. Rabie, M. Jafariyan, coating surface of the fuel cell bipolar plates of stainless steel 316L, *First National Conference Clean Energy,* 1392. (In Persian)
[2] L. Ma, S. Warthesen, D.A. Shores, Evaluation of materials for bipolar plates in PEMFCs, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems,* Vol. 3, pp. 221-228, 2000.
[3] H. Wang, J.A. Turner, Reviewing metallic PEMFC bipolar plates, *Fuel Cells,* Vol. 10, pp. 510-519, 2010.
[4] H. Blunk, D. J. Lisi, Y. E. Yoo, C. L. Tucker, Enhanced conductivity of fuel cell plates through controlled fiber orientation, *AIChE Journal,* Vol. 49, pp. 18–29, 2003.
[5] A. Muller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, Injection moulding of graphite composite bipolar plates, *Journal of Power Sources,* Vol. 15, pp. 467–471, 2006.
[6] M. F. Peker, Investigations on the micro-scale surface interactions at the tool and workpiece interface in micro- manufacturing of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells, *PhD Thesis,* Mechanical Engineering, Virginia Commonwealth University, May 2012.
[7] HJ. Kwon, YP. Jeon, CG. Kang, Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel, *Int. J. Adv. Manuf. Technology,* Vol. 64, pp. 381-94, 2013.
[8] Metals handbook, Forming and forging, 9th Edition, Vol. 14, 605615,1988.
[9] Y. Liu, L. Hua, Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming, *J.Power Sources,* Vol. 195, pp. 3529-3535, 2010.
[10] Ch.Y. Son, Y.Ph. Jeon, Y.T. Kim, Ch.G. Kang, Evaluation of the formability of a bipolar plate manufactured from aluminum alloy Al 1050 using the rubber pad forming process, *J. Engineering and Manufacturing,* Vol. 81, pp. 909-918, 2012.
[11] M. Belali Owsia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 10, pp. 150-158, 2014. (In Persian)
[12] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. Gorji, study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (In Persian)