



بررسی شکل پذیری آلیاژ AA8111 در میکرو کانال‌های شیاری صفحات دوقطبی بوسیله فرآیند شکل دهی با دمش گاز

حسن کارگرپیشبجاری¹، سید جمال حسینی پور^{2*}، حامد جمشیدی اول³

1- دانشجوی کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 484، j.hosseini@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 خرداد 1394

پذیرش: 16 مرداد 1394

ارائه در سایت: 03 شهریور 1394

کلید واژگان:

میکرو کانال

صفحات دوقطبی فلزی

شکل دهی با دمش گاز

آلیاژ آلومینیوم 8111

چکیده

صفحات دوقطبی فلزی از کلیدی‌ترین اجزای پیل سوختی می‌باشند که به عنوان بهترین جایگزین به جای صفحات گرافیتی محسوب می‌شوند. انتخاب فرآیند شکل دهی مناسب، تأثیر زیادی در هزینه تمام شده و کیفیت صفحات تولید شده ایجاد می‌کند. از فرآیندهای نو در ساخت صفحات دوقطبی فلزی شکل دهی با دمش گاز می‌باشد. در این پژوهش شکل‌پذیری صفحات آلومینیوم 8111 با ضخامت 200 میکرون در قالب‌های شیاری مقعر مورد بررسی قرار گرفت. شکل دهی داغ ورق فلزی در دماهای 300 و 400 درجه سانتی‌گراد و در فشارهای 20 تا 40 بار مورد آزمایش قرار گرفت. با بررسی پروفیل پرشدگی در الگوی شیاری مستقیم صفحات دوقطبی شکل داده شده در مقاطع مختلف کانال‌ها، میزان درصد پرشدگی، نازک شدگی و پارگی در مقاطع مختلف شیاری قالب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که با کاهش نسبت عمق به عرض کانال از مقدار $(h/w < 0/75)$ ، میزان شکل پذیری ورق افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت عمق به عرض کانال از $(h/w > 0/5)$ ، میزان عمق شکل‌گیری کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش زاویه دیواره کانال $(\alpha = 0)$ به $(\alpha = 15)$ ، میزان شکل پذیری ورق بدون ایجاد پارگی دارای بیشترین میزان شکل پذیری ورق در قالب شیاری مقعر می‌باشد.

An Investigation into the formability of AA8111 Alloy in the grooved micro channels of bipolar plate using gas blow forming process

Hassan Kargar Pishbijari, Seyed Jamal Hosseinipour*, Hamed Jamshidi Aval

Department of Material Science and Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 484 Babol, Iran, j.hosseini@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 June 2015
Accepted 07 August 2015
Available Online 25 August 2015

Keywords:

Micro Channel
Metallic bipolar plates
Gas blow forming
Aluminum alloy 8111

ABSTRACT

Metal bipolar plates are key components in fuel cells, which are considered to be the best alternative to replace graphite plates. Material selection in bipolar plates depends on its weight and corrosion resistance. Metallic bipolar plate can be considered the best alternative to graphite and composite plates. One of the new processes in order to produce this plate is gas blow forming process. In this study, forming of AA8111 bipolar plates with 200 μm thickness in concave groove dies is investigated by gas blow forming process at various pressures (20, 30 and 40 bar) and temperatures (300 and 400 °C). The filling percentage of die at various wall angles and depth to width ratios are examined. According to the dimension of channels, maximum and minimum thinning percentage at high temperature and pressure are investigated. Results show that at wall angle of $\alpha = 0$, and the depth to width ratio of $h/w = 0.5$, rupture occurs at pressure of 20bar and at temperature of 300° C and at pressures of 20 and 40 bar at temperature of 400° C. The best channel filling with lowest thinning obtained at $\alpha = 15$ and $h/w = 0.5$.

1- مقدمه

کل سلول سوختی داشته باشد [3]. صفحات دوقطبی وظایف مختلفی را بر عهده دارند که از آن جمله می‌توان به توزیع سوخت و اکسیدکننده در درون سلول، استحکام و حمایت از بدنه‌ی سلول، توزیع یکنواخت هیدروژن و اکسیژن در درون سلول، انتقال جریان تولیدی، خنک نگه‌داشتن سلول و همچنین تخلیه آب تولیدشده از سلول را می‌توان نام برد [4]. مرسوم‌ترین مواد در ساخت صفحات دوقطبی عبارت انداز: گرافیت، مواد کامپوزیتی و فلزی می‌باشد. بیشترین ماده استفاده شده در گذشته برای تولید این صفحات

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که از شکست پیوند شیمیایی قادر به تولید جریان الکتریکی می‌باشد. صفحات دوقطبی مهم‌ترین بخش‌های یک پیل سوختی هستند، بنابراین انتظار می‌رود تا آنجا که ممکن است با کمترین ضخامت طراحی و ساخته شوند [2,1]. این صفحات 80 درصد وزن و 40 درصد هزینه یک سلول سوختی را به خود اختصاص داده‌اند و عمده‌ترین بخشی است که می‌تواند تأثیری اساسی بر روی هزینه تمام‌شده

Please cite this article using:

H. Kargar Pishbijari, S.J. Hosseinipour, H. Jamshidi Aval, An Investigation into the formability of AA8111 Alloy in the grooved micro channels of bipolar plate using gas blow forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 23-31, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این عامل سبب توزیع ضخامت غیریکنواخت در نقاط مختلف ورق شکل داده شده می‌شود. کو و همکارانش [16]، با بررسی شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم 5052 توسط روش استمپینگ دریافتند که در هندسه کانال ($h/w:0/42$)، نیروی پرس بصورت ضربه‌ای بهتر از حالت‌های اعمال نیرو آهسته می‌باشد. اوسیا و همکارانش [17]، با بررسی شکل‌پذیری ورق فولادی زنگ نزن 304 در یک الگوی پینی توسط روش هیدروفرمینگ در هندسه کانال با نسبت عمق به عرض ($h/w:0/0.33/67$) دریافتند که با کاهش نسبت عمق به عرض از ($0/67$) به ($0/33$)، میزان پرشدگی در قالب پینی افزایش می‌یابد و همچنین مقدار نازک شدگی در بیشترین شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. محمدتبار و همکارانش [18]، با بررسی شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی فولاد زنگ نزن 304 در یک الگوی مارپیچ موازی به روش هیدروفرمینگ دریافتند که با افزایش فشار شکل‌دهی سیال، علاوه بر افزایش میزان پرشدگی قالب، نقش مهمی در نازک شدگی ناحیه بحرانی دارد. به طوری که به دلیل افزایش نسبت کشش در مقطع بحرانی، میزان نازک شدگی بیشتر کاهش می‌یابد و این فرایند از قابلیت تکرار بالایی برخوردار می‌باشد. اسماعیلی و همکارانش [19]، در یک الگوی پینی شکل با ثابت در نظر گرفتن دما 500 درجه سانتی‌گراد در یک فشار شکل‌دهی ثابت، نسبت‌های عمق به عرض ($h/w:0/0.4/5$) مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش ارتفاع پین در نسبت عمق به عرض ($0/5$) بیشترین میزان نازک شدگی نسبت به عمق به عرض ($0/4$) افزایش می‌یابد. همچنین نازک شدگی در محل تماس با لبه بیرونی پین‌ها دارای بیشترین مقدار است.

تاکنون تحقیقات بسیار محدود در فرآیند ساخت این صفحات به روش شکل‌دهی با دمش گاز انجام شده است. فرآیند شکل‌دهی با دمش گاز در مقایسه با هیدروفرمینگ و سایر روش‌ها نامبرده شده، بعنوان یک تکنولوژی جدید در ساخت صفحات دوقطبی فلزی محسوب می‌شود. برتری این فرایند نسبت به سایر روش‌ها، شکل‌دهی با میزان فشار خیلی پایین می‌باشد. در این پژوهش قابلیت شکل‌پذیری میکرو کانال‌های شیاری مقعر با در نظر گرفتن اثر ابعاد هندسی کانال‌ها با الگوی موازی/مستقیم، شرایط فرایندی در شکل‌دهی بر میزان پرشدگی قالب، نازک شدگی و پارگی ورق فلزی در مقاطع کانال‌های قالب شیاری مقعر به روش دمش با گاز مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش آزمایش تجربی

در این پژوهش از ورق آلومینیوم 8111 با ضخامت 200 میکرون جهت انجام آزمایش استفاده شد. شکل 2 نمایی از قالب به همراه ابعاد هندسی کانال را نشان می‌دهد. طرح الگوی قالب به صورت کانالی موازی مستقیم می‌باشد. به منظور بررسی پارگی و حداکثر شکل‌پذیری ورق فلزی پارامترهای هندسی قالب در 4 شیار مقعر با نسبت‌های عمق به عرض کانال (h/w)، زاویه دیواره قالب (α)، شعاع گوشه بالایی (R)، شعاع گوشه پایینی (r) مطابق با جدول 1 ساخته شده است. به منظور جلوگیری از تغییر شکل قالب و ابعاد هندسی کانال‌ها، با توجه به تنش‌های حرارتی زیاد در دمای بالا، مجموعه قالب از جنس فولاد گرم کار (H13) ساخته شده است. فرآیند شکل‌دهی با اعمال فشار گاز بر روی ورق آلومینیومی در طی مدت زمان 30 ثانیه، شکل قالب شیاری را به خود می‌گیرد.

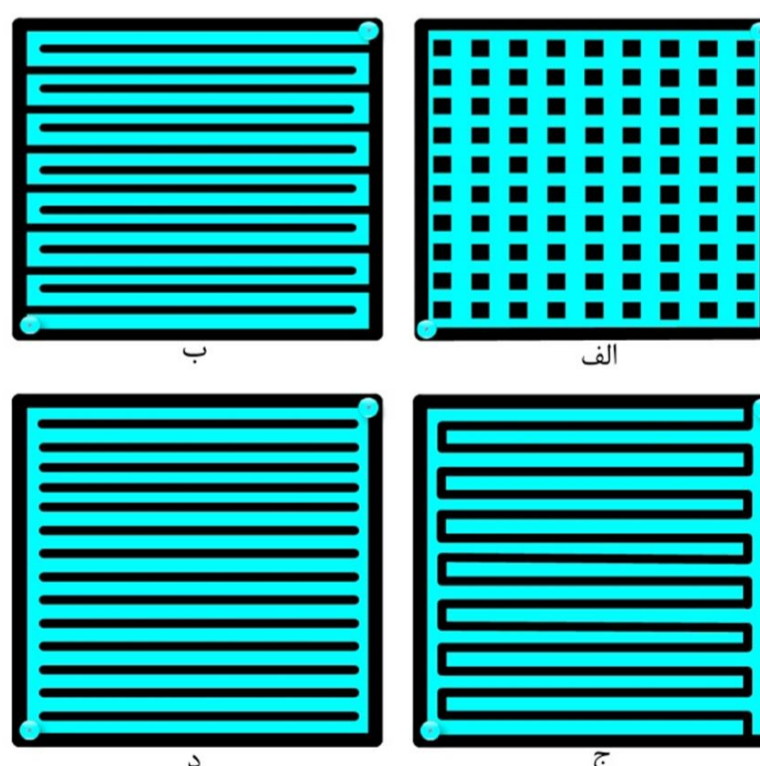
کل مجموعه قالب توسط یک پرس مکانیکی کلمپ شده است. اعمال فشار شکل‌دهی ورق آلومینیومی با استفاده از یک کپسول گاز آرگون با فشار 150 بار انجام شده است.

بر پایه گرافیت بوده است [5] از طرفی چقرمگی کم و شکست در اثر تردی گرافیت در ایجاد دقیق کانال‌های میدان جریان محدودیت‌هایی در ساخت صفحات دوقطبی گرافیتی به وجود می‌آورد [6,7]. صفحات دوقطبی فلزی جایگزینی مناسب به جای صفحات گرافیتی هستند. رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب همراه با خواص مکانیکی بالا و مقاومت در برابر خوردگی، حتی در ضخامت‌های کم از ویژگی‌های صفحات فلزی می‌باشند [8,9]. به منظور مقاومت به خوردگی، فلزاتی که معمولاً در این راستا انتخاب می‌شوند عبارت انداز آلومینیوم، تیتانیوم، نیکل و فولاد زنگ نزن می‌باشد [10]. اولین قدم در توسعه ساخت صفحات دوقطبی، مطالعه بر روی طرح‌های مختلف و شکل‌های گوناگون از نظر الگوهای جریان این نوع صفحات است [11]. در شکل 1 انواع الگوهای جریان صفحات دوقطبی شامل پینی¹، تک مارپیچ²، درهم‌پیچیده³ و کانالی موازی/مستقیم⁴ نشان داده شده است.

با رشد علم و توسعه فناوری‌های جدید در ساخت صفحات دوقطبی فلزی، جهت تولید انبوه این صفحات با حداکثر کیفیت و کارایی، در کمترین زمان ممکن تلاش می‌شود. در این راستا روش‌های مختلفی جهت شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی مورد بررسی قرار گرفته است.

نیکام و ردی [13] شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی توسط فرایند نورد، با الگوی موازی مستقیم با نسبت عمق به عرض شیار ($h/w:0/5$) مورد بررسی قرار دادند. این روش از دقت ابعادی مناسب در ایجاد شعاع گوشه و تکرارپذیری در ایجاد عمق کانال برخوردار نمی‌باشد. لیم و همکارانش [14]، با مطالعه در شکل‌پذیری ورق آلومینیومی 1050 به کمک فرایند رابرد فرمینگ دریافتند که در یک هندسه کانال با نسبت عمق به عرض ($h/w:0/5$)، افزایش فشار پانچ موجب افزایش شکل‌پذیری ورق می‌شود. همچنین با کاهش سختی پد لاستیکی، میزان عمق شکل‌گیری افزایش پیدا می‌کند.

جونگ و همکارانش [15]، با بررسی شکل‌پذیری ورق آلومینیومی 1050 توسط فرایند رابر پد فرمینگ دریافتند که در عرض کانال ($w:1.2$)، با افزایش زاویه دیواره کانال میزان شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد. مهم‌ترین محدودیت این فرایند، عدم کنترل رفتار پد لاستیکی در اثر اعمال فشار می‌باشد.

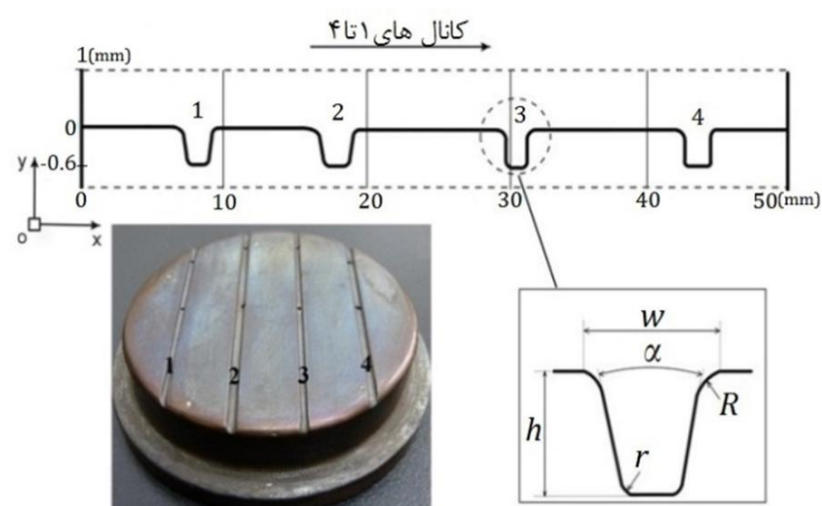


شکل 1 انواع الگوهای جریان: الف) پینی، ب) مارپیچ، ج) درهم‌پیچیده، د) کانالی موازی [12]

- 1- Pin-type
- 2- Single Serpentine
- 3- Inter-digitated
- 4- Straight/parallel-type

دمش فشار گاز آرگون برای انجام آزمایش در فشارهای شکل‌دهی مطابق با جدول 2 و نگهداری در هر یک از فشارها، به مدت زمان 15 دقیقه در دما و فشار ثابت به منظور شکل‌پذیری کامل قطعه انجام شده است. در شکل 3 نحوه مونتاژ مجموعه قالب و شماتیک فرآیند شکل‌دهی به کمک دمش گاز را نشان می‌دهد.

در فرایند شکل‌دهی صفحات دوقطبی توسط فرایند دمش گاز، ورق فلزی ما بین دو نیمه قالب قرار می‌گیرد. سپس با اعمال نیروی گیره بندی توسط یک دستگاه پرس مکانیکی ساده، کلمپینگ مجموعه به منظور جلوگیری از نشتی گاز انجام می‌شود. از المنت‌های حرارتی فشنگی به منظور گرم کردن قالب و سطح ورق تا دمای آزمایش استفاده شده است. مقدار حرارت مشخصه بر روی سطح ورق به وسیله ترموکوپل توسط یک کنترل‌کننده دما با توجه شرایط آزمایش کالیبره شده و هر لحظه مقدار حرارت از سطح ورق خوانده می‌شود. مقدار جریان عبوری به المنت‌های حرارتی توسط کنتاکتور کنترل می‌شود تا مقدار درجه حرارت سطح ورق آلومینیومی در همان محدوده دمایی ثابت باشد و از نوسان دما و اتلاف حرارت جلوگیری نماید. از یک واشر آلومینیومی به منظور جلوگیری از نشتی گاز آرگون مابین ورق فلزی و قالب پایینی استفاده شده است. با اعمال نیروی کلمپینگ و حرارت حاصل از شکل‌دهی، واشر آلومینیومی به طور کامل مجموعه قالب را نشت بند می‌نماید و از خروج گاز به بیرون قالب جلوگیری می‌کند.



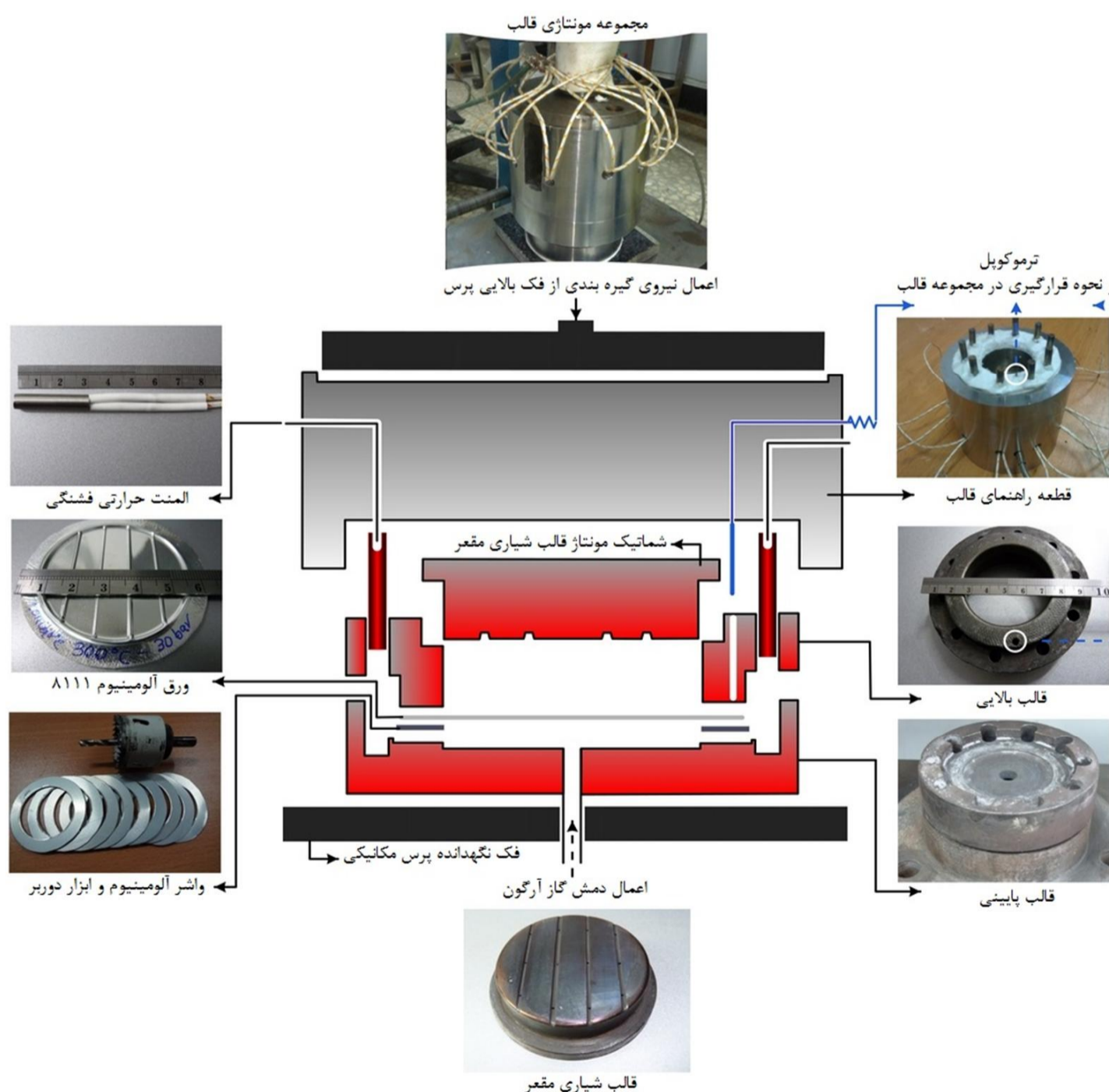
شکل 2 نمایی از ابعاد هندسی قالب

جدول 1 مقادیر پارامترهای قالب (بر حسب میلی‌متر)

پارامترهای هندسی	کانال 1	کانال 2	کانال 3	کانال 4
عرض کانال (w)	0/8	1/2	0/8	1/2
زاویه دیواره (α)	15	15	0	0
شعاع گوشه بالا (R)	0/3	0/3	0/3	0/3
شعاع گوشه پایین (r)	0/2	0/2	0/2	0/2
نسبت عمق به عرض (h/w)	0/75	0/5	0/75	0/5

جدول 2 پارامترهای فرآیندی در شکل‌دهی صفحات دوقطبی

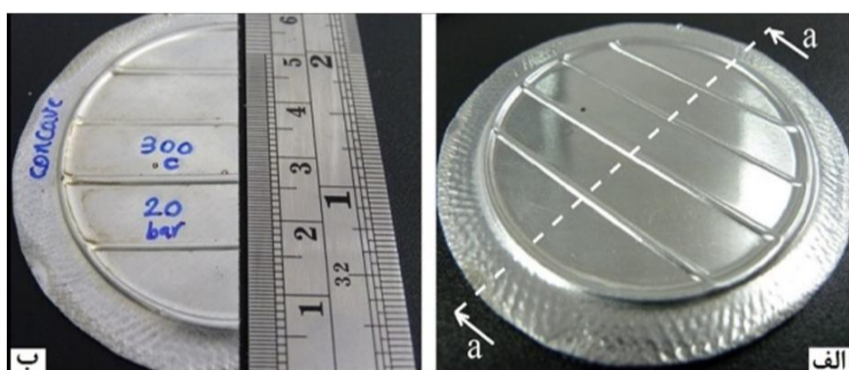
دما ($^{\circ}\text{C}$)	فشار (bar)	مسیر فشار (s)	زمان نگهداری (min)
300, 400	30, 20, 40	30	15



شکل 3 شماتیک مونتاژی و نحوه گیره بندی قالب در فرآیند شکل‌دهی با دمش گاز، و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش



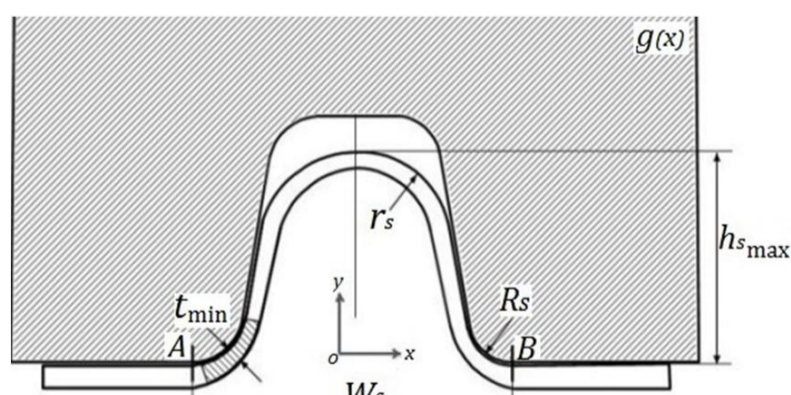
شکل 4 نمایی از واحد اعمال فشار گاز، پرس و تجهیزات آزمایش



شکل 5 مقطع اندازه‌گیری کانال، الف) مقطع برش، ب) نمونه برش خورده



شکل 6 اندازه‌گیری میکروسکوپی مقاطع در بررسی پروفیل پرشدگی



شکل 7 نمایی از محاسبه مسیر پرشدگی قالب

4- نتایج و بحث

بررسی ابعاد هندسی کانال از مهم‌ترین پارامتر شکل‌دهی صفحات دوقطبی محسوب می‌شود. نسبت عمق به عرض (h/w) و زاویه دیواره کانال (α), بطور

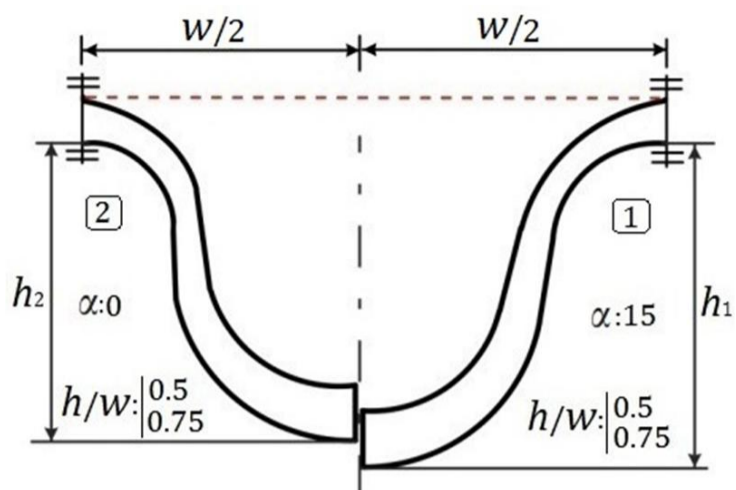
با اعمال دمش گاز ورق آلومینیومی در طی مدت زمان بسیار کوتاه، شکل پروفیل هندسی قالب شیاری مقعر را به خود می‌گیرد. به منظور تسریع در خنک‌شدگی ورق در دمای محیط، طراحی قالب بگونه‌ای انجام شده که بعد از تخلیه گاز، مجموعه قالب بالایی به همراه قالب شیاری مقعر و قطعه راهنما بعد از فرآیند شکل‌دهی از قالب پایینی و ورق فلزی جدا شود. برای اندازه‌گیری و کنترل مقدار فشار گاز اعمالی به قالب از دو شیر کنترل فشار استفاده می‌شود. در شیر کنترل فشار اول حداکثر تحمل فشار خروجی گاز به مقدار 70 بار می‌باشد. به منظور کنترل در مسیر اعمال فشار گاز از شیر کنترل فشار دوم تا حداکثر میزان خروجی فشار گاز تا 40 بار، با توجه به شرایط آزمایش در بیشترین مقدار اعمال فشار گاز به منظور ضریب اطمینان در کنترل فرآیند شکل‌دهی استفاده شده است. شکل 4 نمایی از واحد اعمال فشار شکل‌دهی، دستگاه پرس و تجهیزات استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد.

3- اندازه‌گیری میکرو کانال‌ها

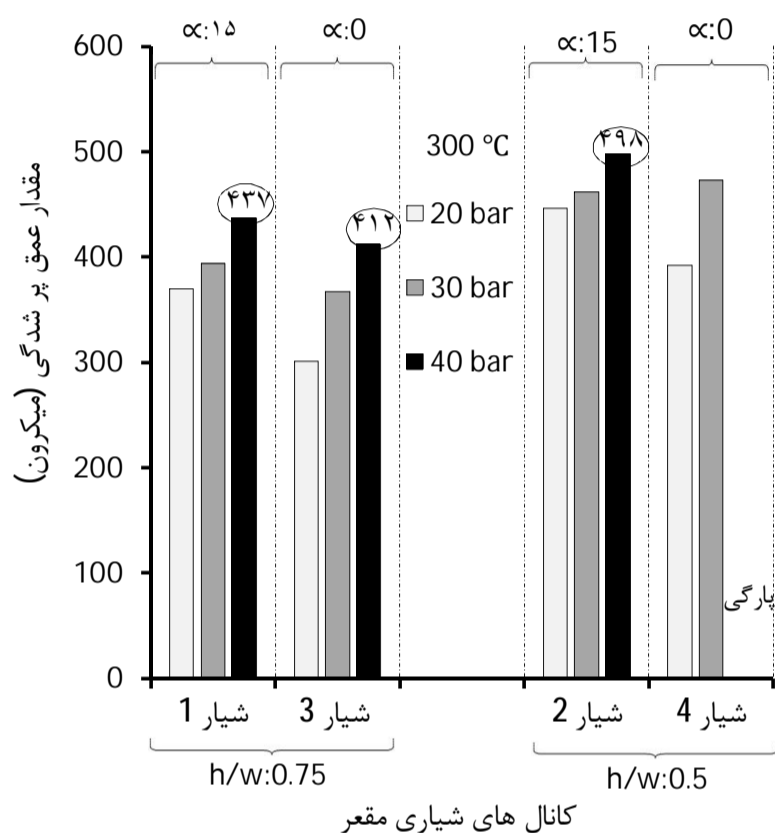
به منظور اندازه‌گیری پروفیل پرشدگی در ناحیه تغییر شکل، ابتدا کانال‌ها مطابق شکل 5 از مقطع عرضی (a-a) توسط دستگاه برش سیمی¹ به دو قسمت برش داده شد. سپس با استفاده از مانت و پولیش نمونه‌ها، توزیع ضخامت و مقدار پروفیل پرشدگی کانال توسط میکروسکوپ با دقت 10 میکرون مطابق با شکل 6 اندازه‌گیری شد. محاسبه‌ی درصد پرشدگی (P), در مسیر پروفیل قالب از نقاط A تا B، مطابق شکل 7، با اندازه‌گیری مساحت جاروب شده ورق در کانال شیاری مقعر طبق معادله (1) انجام شد.

برای محاسبه مساحت جاروب شده ورق، ابتدا مسیر پرشدگی ورق با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب درصد پرشدگی قالب محاسبه شد. در معادله (1)، شعاع گوشه بالای ورق شکل گرفته، w_s مقدار عرض کانال ورق شکل گرفته، r_s شعاع گوشه پایین ورق شکل گرفته $h_{s,max}$ ماکزیمم ارتفاع ورق شکل گرفته شده، α زاویه دیواره ورق شکل گرفته به درون حفره قالب، نسبت به $g(x)$ مساحت شیاری پروفیل قالب با پارامترهای زاویه و ابعاد ثابت کانال در هر یک شیاریهای مقعر می‌باشد.

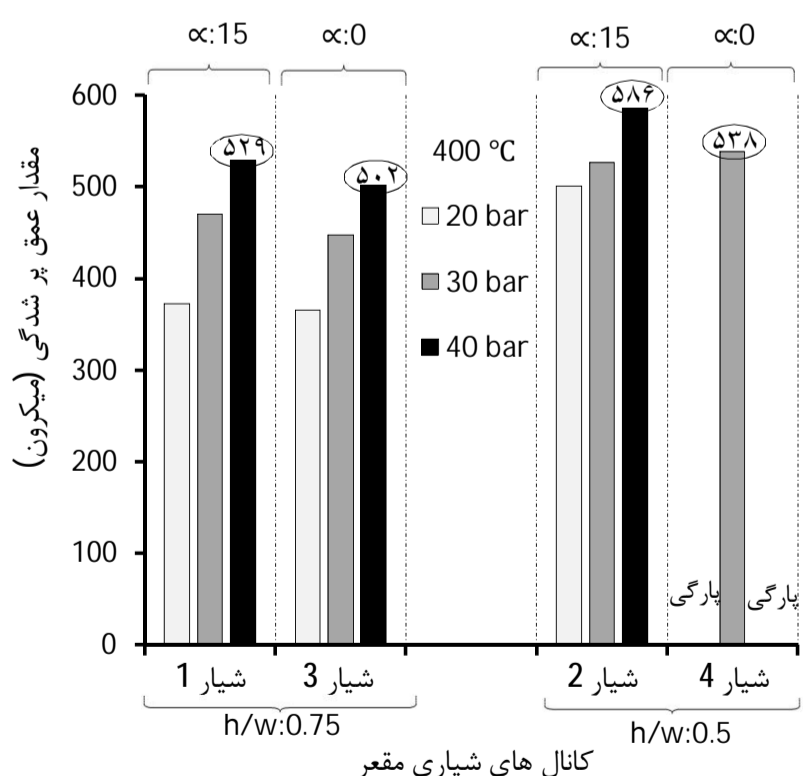
1. Wire cut



شکل 8 نمایی از تأثیر زاویه دیواره کانال در عمق پرشدگی شیاری قالب، (1) مقدار عمق شکل داده شده (h_1) در اثر زاویه دیواره کانال 15 درجه، (2) مقدار عمق شکل داده شده (h_2) در اثر زاویه دیواره کانال صفر درجه



شکل 9 مقایسه میزان عمق شکل‌گیری در نسبت عمق به عرض (0/75, 0/5) در اثر زاویه دیواره (0, 15) درجه کانال‌های شیاری مقعر تحت شرایط فرآیندی در دمای 300 درجه سانتی‌گراد



شکل 10 مقایسه میزان عمق شکل‌گیری در نسبت عمق به عرض (0/75, 0/5) در اثر زاویه دیواره (0, 15) درجه کانال‌های شیاری مقعر تحت شرایط فرآیندی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد

مستقیم در میزان پرشدگی، نازک‌شدگی و پارگی ورق فلزی در شکل‌دهی این صفحات اثربخش می‌باشد. همچنین پارامترهای فرآیندی، اعمال فشار شکل‌دهی در دمای آزمایش، از دیگر موارد تأثیرگذار بر شکل‌دهی این صفحات در فرآیند داغ می‌باشد.

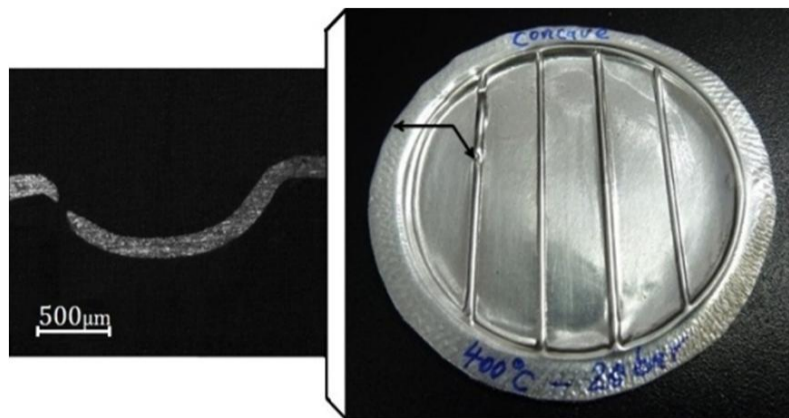
همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، ابتدا با بررسی مقایسه‌ای در میزان عمق پرشدگی ورق در شیاری قالب مقعر، تأثیر زوایای کانال و نسبت‌های عمق به عرض، در هر یک از شیاریها محاسبه می‌شود. سپس با تعیین مقدار عمق شکل‌گیری در دو زاویه کانال ($\alpha=0/15$) و نسبت عمق به عرض کانال ($h/w=0/5, 0/75$) در هر یک از دما و فشار شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. بطوری که مقدار درصد نازک‌شدگی و درصد پرشدگی با مقایسه پروفیل مقاطع شکل داده شده در هر یک از ارتفاع (h_1) نسبت به (h_2) قابل بررسی و بهترین شیاری هندسی مقعر قابل تشخیص می‌باشد.

$$P = \frac{\int f(w_s, R_s, r_s, h_{s,max}, \alpha) ds}{\int g(x) dx} \times 100 \quad (1)$$

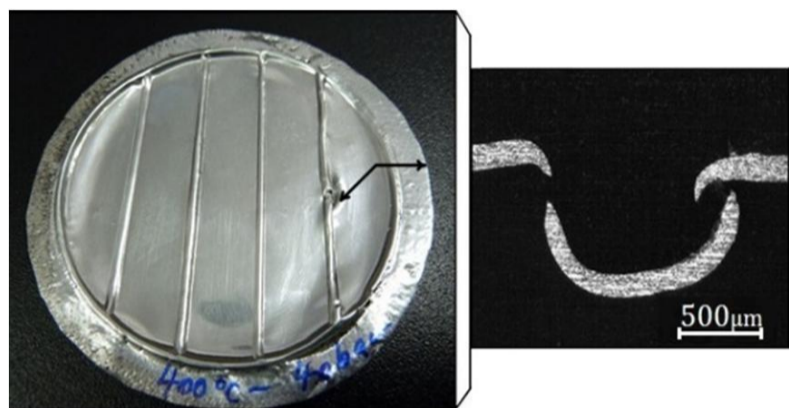
4-1- تأثیر زاویه دیواره کانال در نسبت عمق به عرض (0/75 و 0/5) بر پرشدگی قالب

در شکل 9 مقایسه نسبت عمق به عرض (0/75 و 0/5) در تحت تأثیر زاویه دیواره کانال در شرایط فرآیندی آزمایش نشان داده شده است. با افزایش زاویه دیواره کانال از صفر به 15 درجه، در شرایط فرآیندی آزمایش، میزان شکل‌پذیری ورق در قالب شیاری مقعر در نسبت عمق به عرض 0/75 افزایش می‌یابد. با مقایسه مقدار عمق شکل داده شده در شیاری 1 نسبت به شیاری 3 نشان می‌دهد که زاویه دیواره کانال با حساسیت به نرخ فشار کمتر، با مقدار عمق شکل‌پذیری بهتر ورق فلزی درون پروفیل قالب شیاری شکل می‌گیرد. با کاهش نسبت عمق به عرض (h/w) از 0/75 به مقدار 0/5، میزان شکل‌پذیری ورق فلزی در قالب شیاری مقعر افزایش می‌یابد. میزان حساسیت به نرخ فشار در زاویه دیواره کانال 15 درجه در کانال شیاری 2 به مراتب کمتر از زاویه دیواره کانال صفر درجه در کانال شیاری 4 می‌باشد. بطوری که در فشار ماکزیمم بعد از اعمال دمش گاز، اولین عامل ایجاد پارگی در شیاری 4، اثر زاویه دیواره کانال صفر و بعد از آن مهم‌ترین عامل، حل گر نوع خزشی در شرایط حل مسئله می‌باشد. زمان نگهداری ورق در زیر فشار ثابت شکل‌دهی در مدت زمان 15 دقیقه، در کانال‌هایی با زاویه دیواره 15 درجه مطابق با شیاری 1، 2 و صفر درجه در نسبت عمق به عرض 0/75 در شیاری 3 مفید می‌باشد. اما رفتار تغییر شکل ورق فلزی در کانال صفر درجه با نسبت عمق به عرض 0/5، بسیار تحت تأثیر زاویه دیواره و نرخ فشار شکل‌دهی می‌باشد. با مشاهده رفتار شکل‌پذیری کانال شیاری 4 نسبت به شیاری 2، در مینیمم فشار شکل‌دهی، با مقدار عمق شکل‌پذیری کمتر در پروفیل قالب شکل می‌گیرد. اما به علت نداشتن زاویه دیواره در فشار 30 بار در کانال شیاری 4 به مقدار بیشتری از عمق پروفیل پرشدگی نسبت به زاویه دیواره کانال 15 درجه شکل داده شده است. مهم‌ترین عامل در عمق شکل‌پذیری کانال در شیاری 4 فشار 30 بار، میزان چسبندگی کمتر ورق در اثر کاهش سطح تماس ورق با شیاری قالب در هنگام پرشدگی در شیاری 4 می‌باشد.

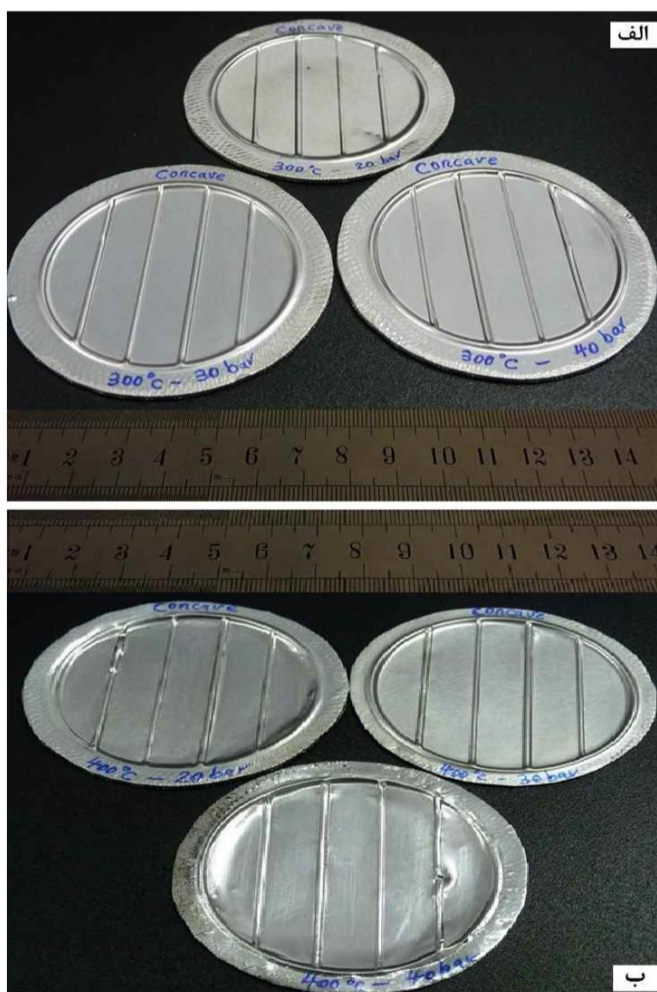
در شکل 10 با کاهش زاویه دیواره کانال از 15 به صفر درجه، سبب کاهش میزان عمق شکل‌گیری در دمای 400 درجه سانتی‌گراد در نسبت عمق به عرض 0/75 می‌شود. حساسیت به نرخ فشار شکل‌دهی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد در نسبت عمق به عرض 0/75 به مراتب بیشتر از نسبت عمق به عرض 0/5 می‌باشد. با کاهش زاویه دیواره کانال از 15 به صفر در نسبت عمق به عرض 0/5 میزان حساسیت به نرخ فشار شکل‌دهی کاهش یافته و مقدار عمق شکل داده شده افزایش می‌یابد.



شکل 12 پارگی کانال شیاری مقعر در نسبت عمق به عرض ($h/w=0/5$)، در زاویه دیواره کانال ($\alpha=0$) در دمای 400 درجه سانتی‌گراد و فشار 20 بار



شکل 13 پارگی کانال شیاری مقعر در نسبت عمق به عرض ($h/w=0/5$)، در زاویه دیواره کانال ($\alpha=0$) در دمای 400 درجه سانتی‌گراد و فشار 40 بار



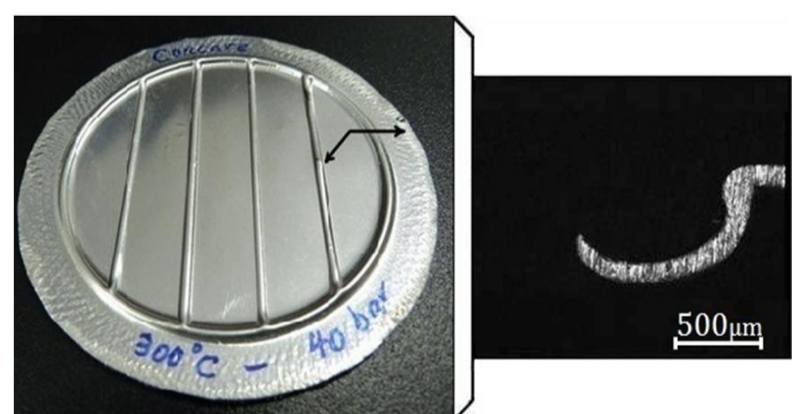
شکل 14 نمونه صفحات دوقطبی شکل داده‌شده توسط فرآیند دمش با گاز، الف) دمای 300 درجه سانتی‌گراد و فشارهای 20، 30 و 40 بار، ب) دمای 400 درجه سانتی‌گراد و فشارهای 20، 30 و 40 بار

شکل 14 مجموعه‌ای از صفحات دوقطبی شکل داده‌شده در شرایط فرآیندی آزمایش نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش از هیچ‌گونه روانکاری مابین ورق فلزی و قالب شیاری مقعر استفاده نشده است، به دلیل افزایش زمان نگهداری ورق در زیر فشار شکل‌دهی و نوع حل خزشی ورق، چسبندگی زیاد در قالب شیاری مقعر تا حدی از کیفیت سطوح در دمای 400 درجه کاسته شده است. بطوری که این محدودیت با بکارگیری روانکار دما بالا مانند گرافیت قابل جبران می‌باشد.

بطوری که با افزایش کشش حدی در زاویه دیواره کانال صفر درجه به همراه مقدار نازک شدگی بیشتر در شعاع گوشه بالای کانال در فشار 20 و 40 بار سبب پارگی در مقطع کانال‌ها می‌شود. مقدار بهینه فشار شکل‌دهی در زاویه دیواره کانال صفر درجه در نسبت عمق به عرض 0/5، به مقدار 30 بار می‌باشد که میزان 538 میکرون شکل گرفته شده است.

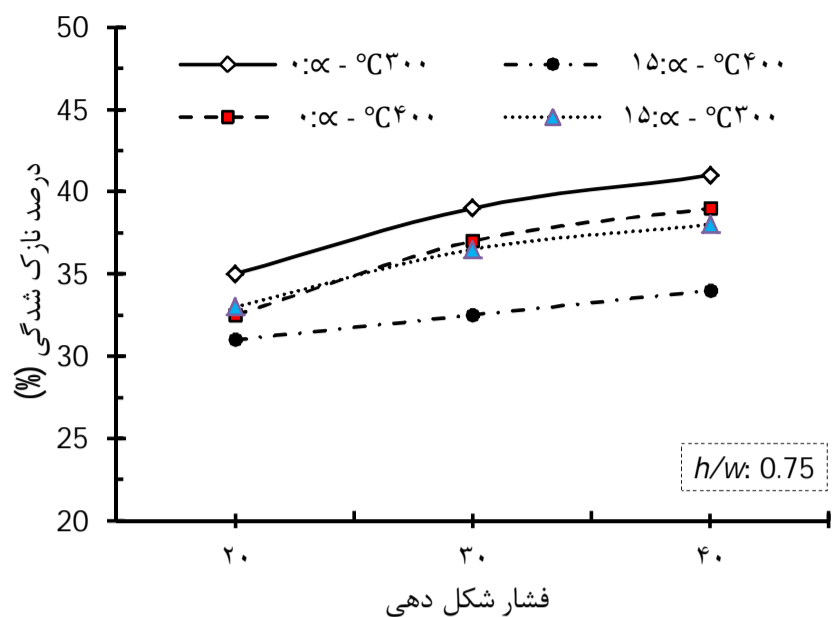
شکل‌های 11، 12 و 13 مقاطع پارگی میکروسکوپی ورق فلزی به دلیل افزایش حدی کشش در شعاع گوشه بالای کانال در شیاری 4 نشان داده شده است. افزایش مقدار کشیدگی ورق در دیواره شعاع گوشه‌ی بالا کانال (R_s)، مقدار ضخامت ناحیه به حداقل ضخامت (کمتر از نصف ضخامت اولیه ورق) کاهش می‌یابد. بطوری که این ناحیه بعنوان یک نقطه بحرانی و عامل ایجاد گلویی¹ می‌باشد و در نهایت منجر به پارگی ورق فلزی می‌شود. با تغییر شکل پلاستیکی سریع در نرخ کرنش زیاد در دما و فشار شکل‌دهی مقدار حد تنش کششی در اثر کشیدگی ورق به داخل پروفیل قالب در جداره دیواره کانال صفر درجه افزایش می‌یابد. ابتدا سبب نازک شدگی ضخامت دیواره و ایجاد کم‌ترین ضخامت در شعاع گوشه بالای ورق می‌شود. سپس با ایجاد گلویی در بیشترین نازک شدگی از ضخامت ورق، در شعاع گوشه بالا در زاویه دیواره کانال صفر می‌شود و پارگی به وجود می‌آید. در نسبت عمق به عرض کانال 0/75 به دلیل عرض کانال کوچک‌تر به مقدار ($w=0/8$) در مقایسه با عمق به عرض 0/5 در زاویه دیواره صفر درجه با عرض کانال ($w=1/2$) در شیاری 3 و 4 رفتار شکل‌پذیری مطلوب و بدون ایجاد پارگی در پروفیل قالب شکل می‌گیرد.

نتایج نشان داد که افزایش عرض کانال در زاویه دیواره صفر با عرض کانال ($w>0/8$) در دماهای بالا سبب افزایش نازک شدگی و منجر به پارگی ورق فلزی می‌شود. در نمونه میکروسکوپی شکل 11 مشاهده شد که پارگی در ورق فلزی شکل داده شده در دمای 300 درجه سانتی‌گراد، از یک طرف در شعاع گوشه بالا اتفاق می‌افتد. بطوری که علاوه بر اثر هندسه کانال در ایجاد پارگی ورق، تأثیر دمش گاز در ماکزیمم فشار شکل‌دهی نقش مهمی در پارگی ایجاد می‌کند. در شکل 12 و 13 با افزایش دما به مقدار 400 درجه سانتی‌گراد، مقدار کشیدگی ورق به داخل پروفیل قالب در فشار 20 بار از یک طرف سبب ایجاد گلویی می‌شود که در نهایت پارگی رخ می‌دهد. در فشار 40 بار مقدار کشیدگی ورق به طور یکنواخت تحت تأثیر شعاع گوشه بالا در پروفیل قالب می‌باشد که در نهایت سبب ایجاد گلویی منجر به پارگی ورق می‌شود. افزایش دما سبب توزیع یکنواخت کشیدگی و سیلان ورق به داخل پروفیل قالب می‌شود. میزان حساسیت به نرخ فشار شکل‌دهی در ایجاد پارگی ورق فلزی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد در کانال شیاری 4 بیشتر از دمای 300 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

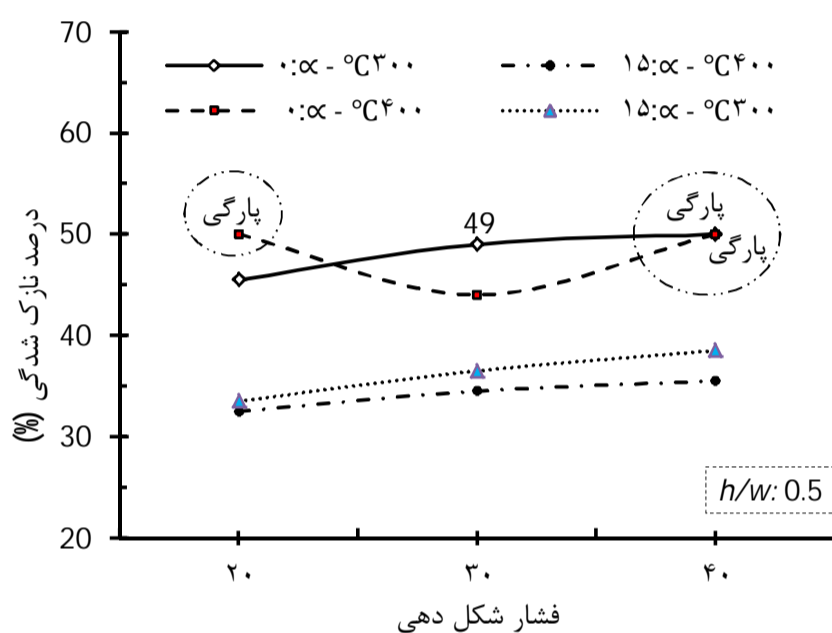


شکل 11 پارگی کانال شیاری مقعر در نسبت عمق به عرض ($h/w=0/5$)، در زاویه دیواره کانال ($\alpha=0$) در دمای 300 درجه سانتی‌گراد و فشار 40 بار

1. Necking



شکل 16 مقایسه درصد نازک شدگی در نقاط بحرانی C در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/75)$ در زاویه دیواره $(0, 15)$ درجه در فشارها و دماهای آزمایش



شکل 17 مقایسه درصد نازک شدگی در نقاط بحرانی C در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/5)$ در زاویه دیواره $(0, 15)$ درجه در فشارها و دماهای آزمایش

در زاویه دیواره $(\alpha=0)$ به دلیل افزایش حدی کشش در اثر اعمال فشار گاز در حرارت شکل‌دهی مشخصه، با افزایش میزان درصد نازک شدگی بیشتر از 49 درصد، در شعاع گوشه بالا از ناحیه نقطه‌ی بحرانی (C) شروع به پارگی می‌کند. افزایش نرخ کرنش لحظه‌ای در اثر فشار شکل‌دهی در حرارت مشخصه در عرض کانال $(w>0/8)$ سبب افزایش درصد نازک شدگی در زاویه دیواره $(\alpha=0)$ می‌شود. شکل 17 مقایسه درصد نازک شدگی در نقاط بحرانی (C) در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/5)$ در زاویه دیواره $(0, 15)$ درجه در شرایط فرآیندی آزمایش نشان داده شده است. عمق شکل‌گیری در هندسه کانال با نسبت عمق به عرض $(0/5)$ در زاویه دیواره $(\alpha=15)$ و در دمای 400 درجه سانتی‌گراد در ماکزیمم فشار شکل‌دهی به مقدار 586 میکرون می‌باشد. در زاویه دیواره $(\alpha=0)$ به دلیل بزرگ بودن نسبت عرض کانال و نداشتن زاویه شیب به منظور سیلان فلز به درون شیاری قالب، در اثر افزایش فشار گاز در حرارت مشخصه، تنش کششی در شعاع گوشه‌ی بالا از حالت یک‌بعدی خارج شده و به حالت سه‌بعدی تبدیل می‌شوند. در مدت زمان کوتاهی پارگی در ورق فلزی قبل از پر شدن کامل قالب در بیشترین نازک شدگی مقطع گلوبی ایجاد شده در زاویه $(\alpha=0)$ از نقطه بحرانی (C) اتفاق می‌افتد. با توجه به مقدار حداکثر پرشدگی قالب و بررسی مقدار نازک شدگی در نقطه‌ی بحرانی (C)، در ماکزیمم پرشدگی کانال بهترین الگوهای کانال در بیشترین مقدار دما و فشار کانال با نسبت عمق به عرض $(h/w=0/5)$ و زاویه دیواره کانال $(\alpha=15)$ انتخاب شد.

به منظور بررسی محدوده پارگی، با تعیین توزیع ضخامت ورق از مسیر نقاط A تا O در جهت پروفیل پرشدگی کانال شیاری مطابق با شکل 15 در نسبت‌های عمق به عرض $(h/w=0/0,5/75)$ و زاویه دیواره $(\alpha=0)$ و $(\alpha=15)$ اندازه‌گیری شد. با استفاده از معادله (2)، مقادیر درصد نازک شدگی در کل نقاط محاسبه شد. (t_{min}) مقدار نازک شدگی ضخامت ورق شکل داده شده، (t_0) مقدار ضخامت اولیه ورق می‌باشد. در نتیجه مشاهده شد که شکل‌پذیری ورق در شیاری مقعر، حساسیت ورق به پارگی و نازک شدگی در محدوده (R) به وجود می‌آید. بطوری که بیشترین نازک شدگی و در نهایت پارگی در نقطه‌ی (C) ایجاد می‌شود.

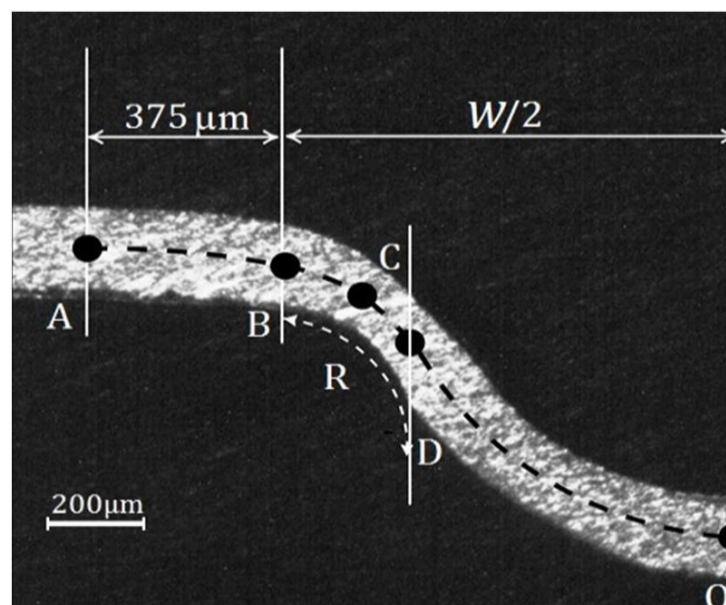
$$\text{درصد نازک شدگی مسیر نقاط A تا O} = \frac{t_0 - t_{min}}{t_0} \times 100 \quad (2)$$

2-4- نازک شدگی در نقطه بحرانی در نسبت عمق به عرض 0/75

شکل 16 مقایسه درصد نازک شدگی در نقاط بحرانی C در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/75)$ در زاویه دیواره $(0, 15)$ درجه در شرایط فرآیندی آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه دیواره از صفر به 15 درجه با توجه به پارامترهای فرآیندی دما و فشار، میزان شکل‌پذیری ورق با کمترین درصد نازک شدگی افزایش می‌یابد. بیشترین عمق شکل‌گیری ورق در فشار 40 بار، در دمای 400 درجه سانتی‌گراد در زاویه $(\alpha=15)$ با 34 درصد نازک شدگی تا عمق 529 میکرون، دارای کمترین مقدار درصد نازک شدگی می‌باشد. در دمای 300 درجه سانتی‌گراد در زاویه دیواره کانال $(\alpha=0)$ با 42 درصد نازک شدگی تا عمق 412 میکرون، دارای بیشترین مقدار درصد نازک شدگی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت سبب بهبود شکل‌پذیری در قالب و کاهش درصد نازک شدگی در بحرانی‌ترین نقطه از تغییر شکل ایجاد می‌کند. از طرفی افزایش فشار شکل‌دهی سبب افزایش درصد نازک شدگی در نقطه بحرانی در دمای 300 درجه سانتی‌گراد می‌شود. به طوری که می‌توان با افزایش درجه حرارت در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/75)$ از میزان نازک شدگی در نقاط بحرانی جلوگیری کرد.

3-4- نازک شدگی در نقطه بحرانی در نسبت عمق به عرض 0/5

تأثیر زاویه دیواره کانال در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/5)$ از مهم‌ترین پارامترهای شکل‌پذیری توسط دمش گاز می‌باشد. به دلیل بزرگ بودن عرض کانال $(w=1/2)$ نسبت به ارتفاع آن $(h=0/6)$ ، درصد پرشدگی و تغییر شکل‌پذیری ورق در اثر زاویه دیواره بزرگ‌تر از صفر، رفتار مطلوب‌تری را در زاویه $(\alpha=15)$ از خود نشان می‌دهد.



شکل 15 توزیع ضخامت از مسیر نقاط A تا O

$(w>0/5)$ رفتار قابل‌اطمینان‌تری به منظور جلوگیری از پارگی و کاهش نازک شدگی، نسبت به عرض $(w<0/5)$ در زاویه $(\alpha=0)$ از خود نشان می‌دهد.

بهترین زاویه دیواره‌ی قالب به منظور بیشترین شکل‌پذیری ورق بدون ایجاد پارگی و حداقل نازک شدگی در زاویه دیواره کانال 15 درجه و با نسبت عمق به عرض 0/5 بدست آمده است.

با افزایش فشار گاز در نسبت عمق به عرض (0/75) میزان شکل‌پذیر ورق در زاویه دیواره $(\alpha=15)$ دارای بیشترین میزان درصد پرشدگی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد درون حفره قالب به مقدار 90 درصد تشکیل می‌دهد.

در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/75)$ در زاویه دیواره کانال $(\alpha=15)$ ، مقدار نازک شدگی در نقطه بحرانی (C) با مقدار عمق شکل‌گیری 529 میکرون به میزان 34 درصد به عنوان انتخاب دوم کانال با شکل‌پذیری خوب از نظر کمترین درصد نازک شدگی در مقطع بحرانی (C) می‌باشد.

در دمای 300 درجه سانتی‌گراد رفتار تغییر شکل در نسبت عمق به عرض (0/75) دارای کمترین میزان درصد پرشدگی درون حفره قالب می‌باشد.

پارگی ورق در زاویه دیواره‌ی کانال صفر با نسبت عمق به عرض 0/5، در دمای 300 درجه سانتی‌گراد با فشار 40 بار و در دمای 400 درجه سانتی‌گراد با فشارهای 20 و 40 بار، با درصد نازک شدگی بیشتر از 49% از نقطه‌ی بحرانی (C) ایجاد می‌شود.

زاویه دیواره کانال صفر درجه به علت بیشترین درصد نازک شدگی در قسمت شعاع گوشه بالا، الگوی مناسبی برای حداکثر شکل‌پذیری صفحات دوقطبی محسوب نمی‌شوند.

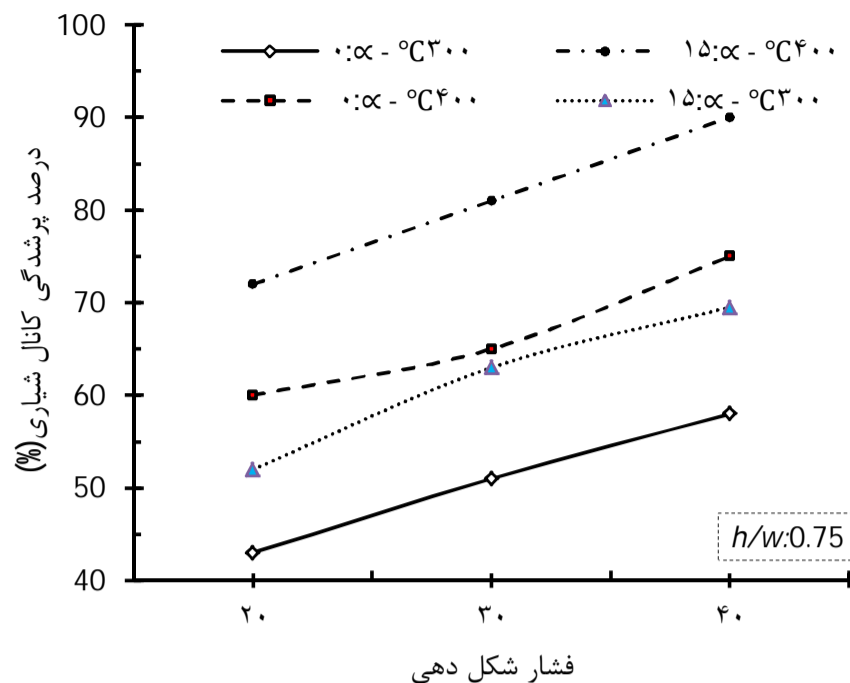
با افزایش درجه حرارت، مقدار شکل‌پذیری ورق در فشارهای شکل‌دهی بیشتر می‌شود و از وقوع پارگی در شعاع گوشه بالا جلوگیری می‌کند.

6- تقدیر و تشکر

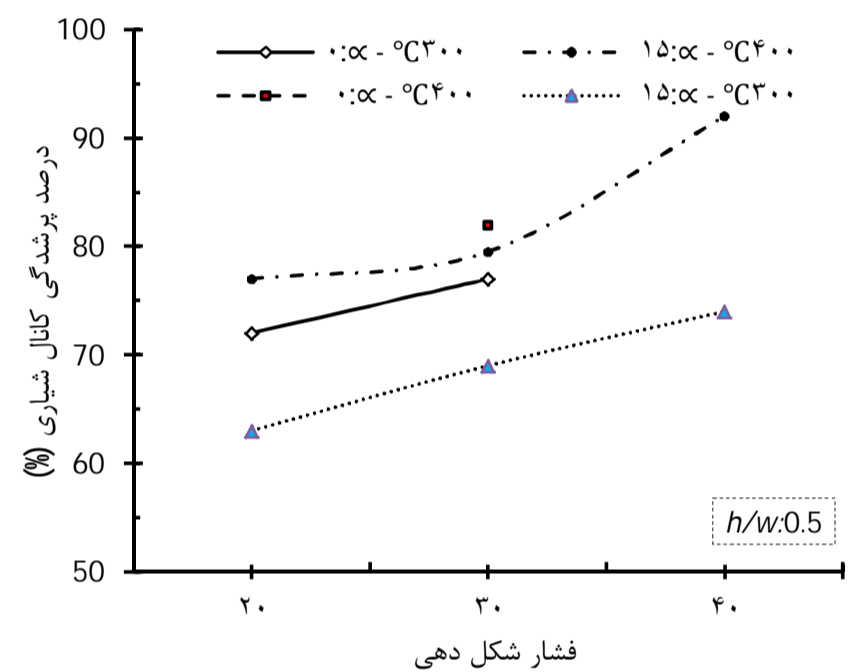
از سازمان انرژی‌های نو ایران (کمیته راهبری پیل سوختی) به منظور حمایت‌های مالی در راستای انجام پروژه کمال تشکر و قدردانی راداریم.

7- مراجع

- [1] E. Middelmann, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen, and E. de Waal, Bipolar plates for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*. 118(1-2), 44-46. 2003.
- [2] I. Bar-On, R. Kirchain, and R. Roth, Technical cost analysis for PEM fuel cells". *Journal of Power Sources*. 109(1), 71-75. 2002.
- [3] H. Tsuchiya, and O. Kobayashi, Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(10), 985-990. 2004.
- [4] A. Hermann, T. Chaudhuri, and P. Spagnol, Bipolar plates for PEM fuel cells. A review. *Intl Journal of Hydrogen Energy*, 30(12), 1297-1302. 2005
- [5] J. Scholta, B. Rohland, et al. Investigations on novel low-cost graphite composite bipolar plates. *Journal of Power Sources* 84(2): 231-234. 1999.
- [6] G. O. Mepsted, and J. M. Moore, *Performance and durability of bipolar plate materials*. in *Handbook of Fuel Cells*, John Wiley & Sons, Ltd. 2010.
- [7] K. Roberg, and V. Trapp, *Graphite-based bipolar plates*, in *Handbook of Fuel Cells*", John Wiley & Sons, Ltd. 2010.
- [8] D. J. L. Brett, and N. P. Brandon. Review of materials and characterization methods for polymer electrolyte fuel cell flow-field plates. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 4(1), 29-44. 2007.
- [9] H. L. Wang, M. A. Sweikart, and J. A. Turner, Stainless steel as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 115(2), 243-251. 2003.
- [10] R. A. Antunnes, L. Oliverira, Gerhard Ett. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8): 3632-3647. 2010.
- [11] X. Li, I. Sabir, *Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 359 - 371. 2005.
- [12] A. Heinzl, F. Mahlendorf, C. Jansen, *Bipolar Plates*, Duisburg- Essen University, Duisburg, Germany, 2009



شکل 18 درصد پرشدگی در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/75)$ در زاویه دیواره (0)، 15 درجه در فشارها و دماهای آزمایش



شکل 19 درصد پرشدگی در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/5)$ در زاویه دیواره (0)، 15 درجه در فشارها و دماهای آزمایش

مقدار درصد پرشدگی در قالب شیاری مقعر به مقدار 92 درصد و میزان نازک شدگی در نقطه‌ی بحرانی (C) به مقدار 35/5 درصد در عمق شکل‌گیری 586 میکرون بدست آمد.

4-4- پرشدگی قالب شیاری در نسبت عمق به عرض 0/5 و 0/75

شکل 18 و 19 مقدار درصد پرشدگی کانال‌های شیاری مقعر در نسبت عمق به عرض $(h/w=0/0.75/5)$ در زاویه دیواره (0، 15) درجه در شرایط فرایندی آزمایش را نشان می‌دهد. درصد شکل‌پذیری $(h/w=0/5)$ در زاویه $(\alpha=15)$ دارای بهترین مقدار پرشدگی به درون حفره قالب به میزان 92 درصد می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی از جنس آلومینیوم 8111 به ضخامت 200 میکرون در الگوی کانال‌های موازی مستقیم در قالب شیاری مقعر به کمک فرآیند دمش گازی در پارامترهای هندسی و فرآیندی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارت انداز:

با افزایش دمش گاز در دمای ثابت 300 و 400 درجه سانتی‌گراد در عرض

- [17] 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)
- [18] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A.H. 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)
- [19] S. Esmaili, S. J. Hosseinipour, A. Shamsi sarband, Simulation and Experimental of metallic bipolar plates for fuel cell by gas blow forming process, in *The National conference on Mechanical Engineering. Malayer. Iran.2013*. (In Persian).
- [13] v. Nikam, G. Reddy, Corrugated bipolar sheets as fuel distributors in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*.31 (13):1863-1873. 2006.
- [14] S. S. Lim, Y. T. Kim, and C. G. Kang, Fabrication of aluminum 1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process. *Int J Adv Manuf Technol*. 65:231-238. 2013.
- [15] M.G. Jung, Y.P. Jeon, and C.G. Kang, Metallic Bipolar Plate Fabrication Process of Fuel Cell by Rubber Pad Forming and its Performance Evaluation. *Engineering Materials*. Vols. 535-536. pp 310-313. 2013.
- [16] j.j. Koo, h.h. Kim, et al. *Formability Evaluation of Microchannels of Aluminum Bipolar Plate Stamped under Pulsating Load*. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol. 136 / 041004-1. 2014.