

# Formability of Commercial Pure Titanium in Microchannel Bipolar Plates Using Warm Stamping Process

### ARTICLE INFO

*Article Type* Original Research

*Authors* Modanloo V.<sup>1</sup> *MSc,* Alimirzaloo V.<sup>\*1</sup> *PhD,* Elyasi M.<sup>2</sup> *PhD* 

How to cite this article Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Formability of Commercial Pure Titanium in Microchannel Bipolar Plates Using Warm Stamping Process. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1593-1599.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran <sup>2</sup>Mechanical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran Phone: +98 (44) 31942852 Fax: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

#### Article History

Received: April 27, 2019 Accepted: January 4, 2020 ePublished: June 20, 2020

#### ABSTRACT

Due to their excellent mechanical, electrical and thermal properties and ease of production, metallic bipolar plates are a suitable replacement for graphite and composite plates. Stamping is one of the most applicable processes to produce theses plates from a manufacturing cost point of view. Due to its excellent corrosion resistance and low density, titanium rises as a potential option for the manufacturing of the bipolar plates. In this paper, the formability of titanium bipolar plates having a thickness of 0.1mm with a parallel flow field has been experimentally investigated. The formability of the sheet was evaluated at warm temperatures using different forming speed and lubricants. After the experimental implementation of the designed tests based on the Taguchi method, the fracture depth of the microchannel of stamped samples was extracted. The results showed that the most elongation of the sheet will be achieved at 100<sup>[2]</sup>. Likewise, the forming speed and temperature are the most effective parameters on the forming depth, respectively. On the other hand, the effect of the lubricant is not tangible compared to the other mentioned parameters. The maximum forming depth equal to 0.494mm was obtained using an experiment with a forming temperature of 100<sup>[2]</sup>, speed of 4.8mm/min, and lubrication with MoS2.

Keywords Metallic Bipolar Plates; Titanium; Warm Stamping; Formability

### CITATION LINKS

[1] Investigation of dimensional accuracy in forming of metallic bipolar plates with serpentine flow field [2] Effect of manufacturing process sequence on the corrosion resistance characteristics of coated metallic bipolar plates [3] A new process of forming metallic bipolar plates for PEM fuel cell with pin-type pattern [4] A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection [5] Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell-Numerical simulation and experiments [6] Effect of stamping load variation on deformation behavior of stainless steel thin plate with micro channel [7] Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel [8] Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through rubber pad forming process [9] Fabrication of titanium bipolar plates by rubber forming and performance of single cell using TiN-coated titanium bipolar plates [10] Numericalexperimental investigations on the manufacturing of an aluminium bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by warm hydroforming [11] Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [12] Mechanical and microstructural evaluations of hot formed titanium sheets by electrical resistance heating process [13] In Key Engineering Materials [14] Modern solid lubrication: recent developments and applications of MoS2 [15] Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets [16] Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing [17] A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure [18] Stamping formability of pure titanium sheets [19] Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters [20] The variation of strain rate sensitivity exponent and strain hardening exponent in isothermal compression of Ti-6Al-4V alloy [21] Flow stress behavior of commercial pure titanium sheet during warm tensile deformation [22] Tensile behavior and formability evaluation of titanium-40 material based on the forming limit diagram approach [23] Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شکلپذیری تیتانیوم خالص تجاری در میکروکانالهای صفحات دوقطبی با استفاده از فرآیند مهرزنی گرم

### وحيد مدانلو MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران **ولی علیمیرزالو<sup>\*</sup> PhD** 

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران **مجید الیاسی PhD** 

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

### چکیدہ

صفحات دوقطبی فلزی بهدلیل داشتن خواص مکانیکی و الکتریکی عالی، خواص حرارتی مناسب و سهولت در تولید جایگزین مناسبی برای صفحات گرافیتی و کامپوزیتی هستند. مهرزنی یکی از مهمترین فرآیندهای کاربردی در توليد اين صفحات از نظر هزينه ساخت است. تيتانيوم بهدليل داشتن مقاومت به خوردگی عالی و چگالی پایین بهعنوان یک گزینه بالقوه برای ساخت صفحات دوقطبی مطرح میشود. در این مقاله، به بررسی تجربی شکل پذیری صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت ۱mm/۰ با الگوی شیاری موازی مستقیم پرداخته شده است. شکلپذیری ورق در دماهای گرم با استفاده از سرعتهای شکلدهی و روانکارهای مختلف بررسی شد. پس از انجام تجربی آزمایشهای طراحی شده بر اساس روش تاگوچی، عمق پارگی میکروکانال نمونههای مهرزنی شده، استخراج شد. بررسی نتایج نشان داد که بیشترین میزان ازدیاد طول ورق در دمای ℃۱۰۰ بهدست میآید. بهعلاوه، سرعت و دمای شکلدهی به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر عمق شکلدهی هستند. از سوی دیگر، تاثیر روانکار در مقایسه با سایر پارامترهای مذکور محسوس نیست. بیشترین عمق شکلدهی به میزان ۴۹۴mm، با استفاده از آزمایشی با پارامترهای دمای شکلدهی ℃۱۰۰، سرعت ۴/۸mm/min و روانکاری با دیسولفید مولیبدن حاصل شد.

كليدواژهها: صفحات دوقطبی فلزی، تیتانیوم، مهرزنی گرم، شكلپذیری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴ \*نویسنده مسئول: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

### مقدمه

طی سالیان اخیر، پیلهای سوختی غشای تبادل پروتون بهعنوان یک منبع انرژی پاک برای کاربردهای حمل و نقل (بهخصوص صنعت خودرو) مورد توجه قرار گرفتهاند. با این وجود، توسعه گسترده صنعتی آنها بهدلیل وجود موانعی نظیر هزینه، وزن و پایداری محدود شده است<sup>[1]</sup>. صفحات دوقطبی کلیدیترین جزء یک پیل سوختی از نظر وزن و هزینه هستند<sup>[2]</sup>. در مقایسه با صفحات گرافیتی و کامپوزیتی، امروزه صفحات فلزی بهدلیل خواص ساختاری و قابلیت تولید از جایگاه ویژهای بین محققان برخوردار شدهاند<sup>[3]</sup>. از فلزات رایج برای ساخت صفحات دوقطبی میتوان به فولاد ضدزنگ، آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم اشاره کرد. در توسعه تولید صفحات دوقطبی فلزی، معیارهای ویژهای

باید لحاظ شوند که برخی از مهمترین آنها عبارتاند از: مقاومت به خوردگی، پایداری شیمیایی در محیط اسیدی، مقاومت به ضربه، رسانایی حرارتی و الکتریکی<sup>[4]</sup>. هیچ یک از مواد مذکور در بالا بهتنهایی تمام ویژگیها را ندارد و هر کدام خواص ویژه مربوط به خود را دارد.

تاكنون تحقيقات مختلفى براى ساخت صفحات دوقطبى با استفاده از فلزات مذکور گزارش شده است. هو و همکاران، به مهرزنی صفحات دوقطبی از جنس فولاد ضدزنگ بهصورت تجربی و شبیه سازی پرداختند<sup>[5]</sup>. ضخامت ورق استفاده شده در تحقیق آنها، ۱۵mm/۱۰ بود. آنها دریافتند که در سرعتهای مهرزنی پایین، ورق دچار چروکیدگی و در سرعتهای بالا دچار پارگی میشود. *کو* و همكاران[6]، موفق به ساخت صفحات دوقطبی به كمک فرآیند مهرزنی با نیروی دینامیکی شدند. آنها در پژوهش خود از ورق فولاد ضدزنگ با ضخامت اولیه ۱mm استفاده کردند و توانستند با استفاده از فرآیند مهرزنی دینامیکی با موج مربعی، عمق شکلدهی را بهمیزان ۷% نسبت به حالت استاتیکی بهبود دهند. *کوآن* و همکاران، به مهرزنی صفحات دوقطبی از جنس آلومینیوم بهصورت تجربی پرداختند که ضخامت اولیه ورق در پژوهش آنها ۳mm/۰ بود<sup>[7]</sup>. آنها تاثیر سرعت و دمای شکلدهی بر شکلپذیری ورق را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، عمق میکروکانال افزایش مییابد. *الیاسی* و همکاران<sup>[8]</sup>، به شکلدهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد ضدزنگ (با ضخامت ورق اولیه ۰/۱mm) با استفاده از فرآیند شکلدهی لاستیکی پرداختند. آنها تاثیر الگوی محدب و مقعر را بر عمق شکلدهی و توزیع ضخامت صفحات دوقطبی مورد مطالعه قرار دادند و گزارش دادند که با استفاده الگوی محدب میتوان به میکروکانالهای عمیقتری دست یافت. جین و همکاران، از ورق تيتانيوم براى ساخت صفحات دوقطبى ييل سوختى استفاده کردند<sup>[9]</sup>. آنها با پیداکردن سطوح بهینه پارامترهای فرآیند شکلدهی لاستیکی، توانستند به نرخ پرشدگی ۶۸% (عمق میکروکانال ۰/۲۷mm) دست یابند. *پالومبو* و *پیکینینی*<sup>[10]</sup>، به شکلدهی صفحات دوقطبی از جنس آلومینیوم با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ گرم پرداختند. ضخامت اولیه ورق در پژوهش آنها ۵mm/۰ بود که با استفاده از شبیهسازی اجزاء محدود، به بررسی تاثیر پروفیل کانال و هندسه صفحات دوقطبی بر میزان نازکشدگی پرداختند و همچنین با استفاده از تکنیک آنالیز واریانس، به ارزیابی تاثیر یارامترهای شکلدهی (عرض کانال، شعاع گوشه قالب و ضخامت ورق) پرداختند. آنها توانستند، فرآیند را با دقت مطلوب ۹۸/۱۲% به کمک رگرسیون مدلسازی کنند. از بین مواد مذکور، تیتانیوم بهدلیل خواص بینظیری مانند مقاومت به خوردگی عالی و نسبت استحکام به وزن بالا، بهعنوان یک گزینه بالقوه برای تولید صفحات دوقطبی فلزی مطرح میشود. از سوی دیگر تیتانیوم شکلپذیری کمی در دمای محیط از خود نشان میدهد که فرآیند شکلدهی گرم میتواند چارهساز باشد. در

میان روشهای مذکور، ساخت صفحات دوقطبی فلزی، مهرزنی بهدلیل سادگی فرآیند، نیاز به تجهیزات کمتر و قابلیت تولید انبوه از اهمیت بسزایی برخوردار است. در عین حال، برخی عیوب شکلدهی ورقی نظیر نازکشدگی، پارگی و چروکیدگی اجتنابناپذیرهستند<sup>[11]</sup>.

تاکنون در زمینه شکلدهی گرم صفحات دوقطبی فلزی تحقیقات محدودی انجام شده است. همچنین در زمینه فرآیند مهرزنی گرم ورق تیتانیوم خالص تجاری برای ساخت صفحات دوقطبی، تحقیقی گزارش نشده است. کاربرد تیتانیوم بهعنوان یک ماده مقاوم به خوردگی یکی از موضوعات بسیار اساسی در طراحی صفحات دوقطبی فلزی است. شکلدهی این جنس در دمای محیط بهطور معمول مشکل است؛ از این رو، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از فرآیند مهرزنی گرم بهعنوان یک روش موثر به صفحات دوقطبی تیتانیومی با حداکثر عمق کانال دست یافت. برای طراحی آزمایشهای تجربی از روش تاگوچی (آرایه متعامد L9) و برای تحلیل نتایج از آنالیز واریانس و تحلیل سیگنال به نویز استفاده شده و تاثیر پارامترهای دما، سرعت و روانکار بر شکلپذیری ورق فلزی در مقاطع کانالهای شیاری موازی مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان سطوح مناسب پارامترها بهمنظور دستیابی به بیشترین عمق میکروکانال استخراج و آزمایش صحتسنجی انجام شده است.

### مواد و روشها

از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ۱۳۳۸ برای شکلدهی صفحات دوقطبی با الگوی شیاری موازی مستقیم استفاده شده است. جدول ۱، خواص شیمیایی ورق مذکور را که از آزمایش کوانتومتری بهدست آمده، نشان میدهد. با توجه به درصد وزنی عناصر تشکیلدهنده در مقایسه با استاندارد ASTM-B265، مشخص شد که ورق مورد استفاده در آزمایشهای تجربی از نوع تیتانیوم گرید ۱ است.

<b>مقدار</b> (درصد)	عنصر آلیاژی
۰/۱۲	آهن
٥/٥٩	سيليسيوم
٥/٥٤	سرب
۰/۰٣	منگنز
۰/۰Y	قلع

در ابتدا بهمنظور تعیین خواص مکانیکی ورق، آزمون کشش تکمحوره مطابق با استاندارد ASTM-E8M در دماهای محیط، ۱۰۰ و °°۲۰ انجام شد. از یک پرس یونیورسال سنتام با ظرفیت ۲۰tons همراه کوره روی آن با سرعت ۶mm/min/۱۰ استفاده شد. در شکل ۱، نمونههای کشش قبل و بعد از انجام آزمون در دماهای مختلف نشان داده شده است.



**شکل ۱)** نمونههای آزمون کشش قبل و بعد از انجام آزمون در دماهای مختلف (ابعاد برحسب میلیمتر)

ورقهای مورد نیاز برای آزمایش مهرزنی بهصورت لوحهایی در ابعاد ۳۵×۲۰ میلیمتر از تیتانیوم خالص تجاری برش داده شدند. بهمنظور انجام فرآیند مهرزنی گرم، دمای قالب و ورق باید در دمای مورد نظر یکسان باشند. به همین منظور، تعداد ۶ عدد گرمکن فشنگی به قطر ۱۷۳۳ و توان ۶۰۰۳ درون قالب تعبیه شدند. دمای قالب در محدوده تغییرات ۵°۵ توسط ترموکوپل متصل به کنترلر دما کنترل شد. پس از قراردادن ورق تیتانیوم روی قالب، مدت زمان کافی به آن داده شد تا به دمای مورد نظر برسد که دمای آن توسط یک ترمومتر لیزری اندازهگیری شد. قالبهای بالا و پایین به مورت اینسرتی و از جنس فولاد گرمکار ساخته شدند تا امکان استفاده از سایر الگوهای قالب فراهم باشد. الگوهای شیاری موازی مستقیم بر اینسرتها با استفاده از ماشین تخلیه الکتریکی سیمی ایجاد شدند که ابعاد هندسی آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



**شکل ۲)** ابعاد هندسی اینسرتهای بالا و پایین برحسب میلیمتر

بهعلاوه، اینسرتها برای جلوگیری از سایش و حفظ دقت ابعادی تا ۶۰HRC سختکاری شدند. بهمنظور جلوگیری از چرخش قالبها از چهار میل راهنما استفاده شد. شکل ۳، بهخوبی مجموعه قالب استفادهشده در فرآیند مهرزنی گرم را نشان میدهد. نکته مهم قابل ذکر این است که پودرهای گرافیت و دیسولفید مولیبدن با نسبت وزنی ۲۵% در روغن پارافین حل شده و از دوغاب حاصل برای آغشتهنمودن ورق قبل از شروع فرآیند استفاده شد. پس از اجرای آزمایشهای مهرزنی، نمونههای شکلدادهشده،

#### ۱۵۹۶ وحید مدانلو و همکاران ــ

ابتدا تمیز و سپس درون رزین پوکسی مانت شدند. در ادامه، عملیات سنبادهزنی و پولیشکاری روی نمونهها انجام شد. در نهایت عمق میکروکانالها با استفاده از یک میکروسکوپ نوری با قابلیت بزرگنمایی بیشینه ۱۰۰ برابر اندازهگیری شد.



**شکل ۳)** مجموعه قالب مهرزنی گرم همراه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

# پارامترهای مورد بررسی و سطوح انتخابشده

پارامترهای دمای شکلدهی، سرعت شکلدهی و روانکار هر کدام در سه سطح و بر اساس آزمایشهای اولیه بهمنظور تولید یک صفحه دوقطبی سالم انتخاب شدند. جدول ۲، پارامترهای انتخابی و سطوح آنها را نشان میدهد. قابل ذکر است که در اینجا دمای محیط برابر با C°۳۰ در نظر گرفته شده است. دماهای ۱۰۰ و C°۱۷۰ نیز با توجه به یژوهشهای پیشین و این نکته انتخاب شدند که افزایش بیش از حد دما تا دمای تبلور مجدد تاثیر قابل توجهی بر ازدیاد طول ورق ندارد و تنها سبب کاهش شدید تنش سیلان ماده می شود<sup>[12]</sup>. سرعت ۶۳m/min، به عنوان سطح کم و منطبق با سرعت آزمون کشش و بهعلت دستیابی به یک شکلدهی پایدار و یکنواخت انتخاب شد، در حالی که سطح زیاد سرعت یعنی ۴/۸mm/min حداکثر سرعت قابل کنترل توسط دستگاه بود. روانکارهای گرافیت و دیسولفید مولیبدن نیز بر اساس پژوهشهای پیشین در زمینه فرآیند مهرزنی بهویژه ورق تیتانیوم<sup>[13, 14]</sup> و مهرزنی و کشش عمیق گرم<sup>[15, 16]</sup> در نظر گرفته شدند. از آنجا که انجام تمام آزمایشها (۲۷=۳۳) منجر به افزایش هزینه و زمان میشود، از آرایه متعامد تاگوچی با تعداد ۹ آزمایش استفاده شد که جدول ۳ طرح آزمایشها را نشان میدهد. بهمنظور تعیین پارامترهای موثر و میزان مشارکت آنها بر عمق شکلدهی میکروکانال، از آنالیز واریانس و تحلیل سیگنال به نویز به کمک نرمافزار مینی تب استفاده شد. از معادله ۱ برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز تابع پاسخ که در اینجا عمق شکلدهی است استفاده شد که در آن n و y<sub>i</sub> بهترتیب تعداد آزمایش و ویژگی اندازهگیری شده هستند<sup>[17]</sup>.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right] \tag{1}$$

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

	<b>جدول ۲)</b> پارامترهای انتخابی و سطوح آنها				
سطح زياد	سطح متوسط	سطح کم	نماد	پارامتر	
دىسولفيد موليبدن	گرافیت	خشک	L	روانکار	
۱۷۰	100	٣。	Т	<b>دما</b> (C°)	
٤/٨	٢/٤	۰/٦	S	سرعت	
				(mm/min)	

### جدول ۳) طرح آزمایشها با استفاده از آرایه متعامد تاگوچی

S	Т	L	شماره آزمایش
۰/٦	٣٠	خشک	١
٢/٤	١٠٠	خشک	۲
٤/٨	۱۷۰	خشک	٣
٢/٤	۳۰	گرافیت	٤
٤/٨	١٠٠	گرافیت	٥
۰/٦	۱۷۰	گرافیت	٦
٤/٨	٣٠	دىسولفيد موليبدن	۷
۰/٦	١٠٠	دىسولفيد موليبدن	٨
٢/٤	۱۷۰	دىسولفيد موليبدن	٩

### نتايج و بحث

یکی از پارامترهای مهم در شکلدهی میکروکانالهای صفحات دوقطبی فلزی، میزان عمق کانالها است که تعیینکننده میزان جریان سوخت و متعاقباً بازده پیل سوختی است. هدف از تحقیق حاضر، شکلدهی صفحات دوقطبی تیتانیومی به ضخامت ۱mm/۰ با حداکثر عمق میکروکانال است، بهگونهای که پارگی یا کاهش ضخامت بحرانی در قطعه نهایی رخ ندهد. نمودارهای تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش در دماهای محیط، ۱۰۰ و ℃۱۷۰ در نمودار ۱ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما، تنش سیلان بهطور پیوسته کاهش مییابد ولی میزان ازدیاد طول در ابتدا افزایش و سپس کاهش مییابد. افزایش ازدیاد طول در دمای ℃۱۰۰ نسبت به دمای ℃۱۷۰ رفتاری کاملاً غیرعادی بهنظر میرسد که ممکن است در اثر افزایش سریع تغییر شکل دوقلویی و مقاومت در برابر لغزش نابجاییها باشد که منجر به افزایش تغییر شکل میشود<sup>[18]</sup>. در فاز اول با افزایش دمای محیط تا ه میزان ۱۶ کاهش و ازدیاد اول به میزان ۱۶ کاهش و ۱۰۰ $^{\circ}$ C ۲۳۴% افزایش مییابند. در فاز دوم با افزایش دما تا ℃۱۷۰، تنش سیلان و ازدیاد طول هر دو در حدود ۱۹% کاهش مییابند. بدین ترتیب، بهنظر میرسد که دمای ℃۱۰۰ منجر به بیشینه میزان تغییر شکل ورق تیتانیوم خواهد شد. پس از انجام تجربی آزمایشها مطابق با طرح تاگوچی، نتایج عمق پارگی میکروکانال استخراج و تحلیل شد که در جدول ۴ این نتایج همراه مقادیر سیگنال به نویز مربوطه آمده است. مطابق با نتایج بهدستآمده، کمینه و بیشینه عمق میکروکانال مربوط به آزمایشهای شماره ۴ و ۸ بهترتیب با مقادیر ۰/۳۸۵ و ۰/۴۹۱mm است. در حالت خشک (بدون روانکاری)، با افزایش دما میزان عمق میکروکانال بهطور پیوسته افزایش مییابد. از سوی دیگر، در حالت روانکاری (چه با گرافیت چه با دیسولفید مولیبدن) بیشینه عمق

میکروکانال در دمای ۲۵۰۰ حاصل میشود. علت این امر این است که هنگام استفاده از روانکار، افزایش بیش از حد دما تا ۲۵۰۲ منجر به چسبیدن ورق به سطح قالب و در نتیجه پارهشدن ورق میشود. در شکل ۴، یک نمونه از وقوع پارگی در میکروکانال نشان داده شده است. نمودار احتمال نرمال برای عمق شکلدهی مطابق با روش اندرسون-دارلینگ در نمودار ۲ نمایش داده شده است. مطابق با نمودار، فاصله نقاط در همسایگی خط مورب بیانگر پیرویکردن توزیع دادهها از توزیع نرمال است. بهعلاوه، مقدار آماری p برابر با ۱۷۵/ه بهدست آمد و چون این مقدار بیشتر از ۵۰/ه است، فرض نرمال بودن توزیع دادهها و در نتیجه قابلیت

**جدول ٤)** نتایج تجربی عمق شکلدهی و نسبت سیگنال به نویز مربوطه

نسبت سیگنال به نویز	عمق شکلدهی (mm)	شماره آزمایش
-۸/∘٦٨	۰/۳۹٥	١
-7/920	۰/٤٥٠	۲
-7/77	∘/٤٨٦	٣
-\/\40	₀/٣٨٥	٤
-7/140	۰/٤٩٠	0
-7/920	۰/٤٥٠	٦
-7/٣٩٣	∘/٤٧٩	Y
-7/17A	∘/٤٩١	٨
-Y/Y70	०/٤०٩	٩



**نمودار ۱)** منحنی تنش- کرنش حقیقی ورق تیتانیوم خالص تجاری در دماهای مختلف



شکل ٤) محل وقوع پارگی در میکروکانال



نتایج آنالیز واریانس برای عمق شکل دهی در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود سرعت و دمای شکل دهی به ترتیب با مشارکت به میزان ۵۲/۸۷ و ۳۵/۵۳% مهم ترین پارامترها هستند. از سوی دیگر پارامتر روانکار تاثیر قابل توجهی (در مقایسه با سایر پارامترها) بر عمق شکل دهی ندارد. نمودار ۳، تاثیرات اصلی پارامترهای مذکور بر عمق شکل دهی را نشان می دهد. از آنجا که تابع پاسخ در این تحقیق از نوع بزرگ تر بهتر است؛ لذا نمودار اثرات اصلی برای میانگین روند یکسانی با نمودار سیگنال به نویز دارد؛ لذا بیشترین مقادیر پارامترها به عنوان سطح مناسب انتخاب می شوند. در اینجا ترکیب پارامترها به عنوان روانکار دی سولفید مولیبدن، دمای شکل دهی  $2^{\circ}$ ۰۰۱ و سرعت محتسنجی با مقادیر مذکور انجام شد.

شكلدهى	عمق	برای	واريانس	آناليز	نتايج	٥)	جدول
--------	-----	------	---------	--------	-------	----	------

میزان مشارکت (%)	رتبه	درجه آزادی	پارامتر
٣/٦٤	٣	۲	روانکار
۳0/۲۰	٢	۲	دما
٥٢/٨٢	١	۲	سرعت
-	-	۲	خطا
-	-	٨	کل



Volume 20, Issue 6, June 2020

### ۱۵۹۸ وحید مدانلو و همکاران ـ

مطابق با نمودار ۳، در تفسیر مهمترین پارامتر یعنی سرعت شکلدهی مشاهده میشود که با افزایش سرعت از مقدار ۶mm/min، تا سطح متوسط یعنی ۲/۴mm/min، مقدار عمق کانال بهمیزان ۷% کاهش مییابد. در ادامه، با افزایش سرعت تا سطح بیشینه یعنی ۴/۸mm/min، میزان عمق کانال در حدود ۱۸% افزایش مییابد. در سوی مقابل، برای پارامتر دمای شکلدهی رفتاری معکوس مشاهده میشود؛ بهطوریکه عمق شکلدهی در ابتدا با افزایش دما تا ℃۱۰ در حدود ۱۴% افزایش و سپس با افزایش تا دمای ℃۱۷۰ حدود ۷% کاهش مییابد. با افزایش سرعت شکلدهی یا به عبارت دیگر نرخ کرنش، تنش سیلان افزایش و در نتیجه شکلیذیری ورق تیتانیومی کاهش مىيابد<sup>[20]</sup>. همچنين پارامتر نرخ كرنش نيز به دما وابسته بوده و با افزایش دما افزایش مییابد<sup>[21]</sup>. از طرف دیگر با افزایش دمای شکلدهی، تنش سیلان کاهش و در نتیجه شکلپذیری ورق افزایش مییابد<sup>[22]</sup>. در نتیجه، بین سرعت و دمای شکلدهی باید ارتباط (وابستگی) نزدیکی وجود داشته باشد. تاثیر متقابل بین یارامترهای مذکور در نمودار ۴ نشان داده شد که بیانگر وجود ارتباط بین سرعت و دما است.



مشاهده میشود که بیشینه عمق شکل دهی میکروکانال با استفاده از سرعت ۴/۸mm/min بهترتیب در دماهای ۱۰۰،  $2^{\circ}$ ۷۲ و دمای محیط به دست میآید. همچنین مشاهده می شود که در دمای  $2^{\circ}$ ۰۰ اختلاف عمق شکل دهی حاصل شده در سرعتهای  $2^{\circ}$  و ناماسب پارامترها (دی سولفید مولیبدن، دمای  $2^{\circ}$ ۰۰، سرعت مناسب پارامترها (دی سولفید مولیبدن، دمای  $2^{\circ}$ ۰۰، سرعت ناماسب پارامترها (دی سولفید مولیبدن، دمای  $2^{\circ}$ ۰۰، سرعت ناماسب پارامترها (دی سولفید مولیبدن، دمای  $2^{\circ}$ ۰۰، سرعت نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل داده شده نتایچ حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی می کر در ان نزدیک به آزمایش شماره ۸ (دی سول در می در از نامت. این در مای  $2^{\circ}$ ۰۰، سرعت مقد میکروکانال که تاکنون برای صفحات دوقطبی که بیشینه عمق میکروکانال که تاکنون برای صفحات دوقطبی

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

تیتانیومی گزارششده مربوط به پژوهش ماهابونیاچای و همکاران<sup>[23]</sup> و *جین* و همکاران<sup>[9]</sup> است که بهترتیب به عمق شکلدهی ۱۴/۰ و ۲۷mm/۰ دست یافتند. همانطور که قابل استنباط است، عمق شکلدهی بهدستآمده برای میکروکانال در این پژوهش بسیار مطلوب و کاربردی است.



شکل ٥) قطعه شکلداده شده حاصل از آزمایش صحتسنجی

## نتيجهگيرى

در تحقیق حاضر به شکلدهی صفحات دوقطبی تیتانیومی با الگوی شیاری موازی مستقیم با استفاده از فرآیند مهرزنی گرم پرداخته شده است. تاثیر روانکار، دما و سرعت شکلدهی بر شکلپذیری صفحات دوقطبی بهصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. پودرهای گرافیت و دیسولفید مولیبدن محلول در پارافین همراه حالت خشک بهعنوان حالات مختلف روانکاری در نظر گرفته شدند. از آرایه متعامد تاگوچی با ۹ آزمایش بهمنظور کاهش هزینه و زمان استفاده شد. نتایج کلی این پژوهش به شرح زیر خلاصه شده است:

۱- با مقایسه نتایج آزمون کشش در دمای محیط و دماهای گرم این نتیجه بهدست آمد که بیشترین میزان تغییر شکل ورق در دمای ۲۰۰۵ حاصل میشود. در این دما نسبت به دمای محیط میزان کرنش حقیقی بهطور چشمگیری در حدود ۲۳۴% افزایش و تنش حقیقی در حدود ۱۶% کاهش مییابد.

۲- نتایج آزمایشگاهی بهدستآمده نشان داد که بیشترین عمق شکلدهی میکروکانال برای جنس تیتانیوم خالص تجاری به اندازه ۸۹۴۳mm/۰ قابل دستیابی است. با توجه به نتایج ارایهشده برای سایر جنسها نظیر فولاد و آلومینیوم در مراجع دیگر، عمق بهدستآمده برای ورق تیتانیوم قابل قبول و کاربردی است.

۳۰- نتایج بهدستآمده در شکل دهی ورق تیتانیوم خالص تجاری نشان داد که بهترین شرایط شکل دهی برای دستیابی به بیشترین عمق و عدم پارگی و توزیع ضخامت مناسب در میکروکانالها، بهکمک آزمایشی با استفاده از روانکار دیسولفید مولیبدن، دمای ℃۱۰۰ و سرعت ۴/Amm/min حاصل شد. بهعلاوه در حالت forming process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;89(9-12):3257-3269.

9- Jin CK, Jeong MG, Kang CG. Fabrication of titanium bipolar plates by rubber forming and performance of single cell using TiN-coated titanium bipolar plates. International Journal of Hydrogen Energy. 2014;39(36):21480-21488.

10- Palumbo G, Piccininni A. Numerical-experimental investigations on the manufacturing of an aluminium bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by warm hydroforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;69(1-4):731-742.

11- Peng L, Yi P, Lai X. Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy. 2014;39(36):21127-21153.

12- Ozturk F, Ece RE, Polat N, Koksal A, Evis Z, Polat A. Mechanical and microstructural evaluations of hot formed titanium sheets by electrical resistance heating process. Materials Science and Engineering: A. 2013;578:207-214.

13- Adamus J. Stamping of titanium sheets. In Key Engineering Materials. Key Engineering Materials. 2009;410-411:279-288.

14- Savan A, Pflüger E, Voumard P, Schröer A, Simmonds M. Modern solid lubrication: recent developments and applications of MoS2. Lubrication Science. 2000;12(2):185-203.

15- Liu Y, Zhu Z, Wang Z, Zhu B, Wang Y, Zhang Y. Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets. Procedia Engineering. 2017;207:723-728.

16- Barimani Varandi A, Hosseinipour SJ. Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(10):187-194. [Persian]

17- Modanloo V, Gorji A, Bakhshi-Jooybari M. A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. 2019;43(3):487-494.

18- Chen FK, Chiu KH. Stamping formability of pure titanium sheets. Journal of materials processing technology. 2005;170(1-2):181-186.

19- Modanloo V, Doniavi A, Hasanzadeh R. Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters. Decision Science Letters. 2016;5(3):349-360.

20- Luo J, Li M, Yu W, Li H. The variation of strain rate sensitivity exponent and strain hardening exponent in isothermal compression of Ti–6Al–4V alloy. Materials & Design. 2010;31(2):741-748.

21- Tsao LC, Wu HY, Leong JC, Fang CJ. Flow stress behavior of commercial pure titanium sheet during warm tensile deformation. Materials & Design. 2012; 34:179-184.

22- Chamos AN, Labeas GN, Setsika D. Tensile behavior and formability evaluation of titanium-40 material based on the forming limit diagram approach. Journal of Materials Engineering and Performance. 2013;22(8):2253-2260.

23- Mahabunphachai S, Cora ÖN, Koç M. Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. Journal of Power Sources. 2010;195(16):5269-5277.

شکلدهی در دمای محیط و هم در دماهای بالاتر از ℃۱۰۰، عمق شکلدهی کاهش یافته و عیب پارگی در قطعه رخ میدهد.

۴- نتایج آنالیز واریانس نشان داد که پارامترهای سرعت و دما بهترتیب بهمیزان ۵۲/۸۷ و ۳۵/۲۰% بیشترین تاثیر را بر عمق میکروکانال دارند؛ در حالی که تاثیر روانکار در مقایسه با دو پارامتر دیگر محسوس نیست. با بررسیهای بیشتر مشخص شد که پارامترهای سرعت و دمای شکلدهی بر هم تاثیر متقابل دارند. نتایج بهدستآمده در این پژوهش میتواند برای تولید صفحات دوقطبی فلزی با عمق میکروکانال مطلوب در صنایع تولید انرژی یاک مورد استفاده قرار گیرد.

> **تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد. **تاییدیهاخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد. **تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

كارط شاهم. موردي توسط تويسند عن بيان تسد.

**سهم نویسندگان:** وحید مدانلو (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۴%)؛ ولی علیمیرزالو (نویسنده دوم)، روششناس/پژوهشگر کمکی (۳۳%)؛ مجید الیاسی (نویسنده سوم)، روششناس/پژوهشگر کمکی (۳۳%).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

### منابع

1- Elyasi M, Talebi Ghadikolaee H, Hosseinzadeh M. Investigation of dimensional accuracy in forming of metallic bipolar plates with serpentine flow field. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;96(1-4):1045-1060.

2- Dur E, Cora ÖN, Koç M. Effect of manufacturing process sequence on the corrosion resistance characteristics of coated metallic bipolar plates. Journal of Power Sources. 2014;246:788-799.

3- Belali-Owsia M, Bakhshi-Jooybari M, Hosseinipour SJ, Gorji AH. A new process of forming metallic bipolar plates for PEM fuel cell with pin-type pattern. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;77(5-8):1281-1293.

4- Taherian R. A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. Journal of Power Sources. 2014;265:370-390.

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

6- Koo JY, Jeon YP, Kang CG. Effect of stamping load variation on deformation behavior of stainless steel thin plate with micro channel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013;227(8):1121-1128.

7- Kwon HJ, Jeon YP, Kang CG. Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;64(5-8):681-694.

8- Elyasi M, Khatir FA, Hosseinzadeh M. Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through rubber pad