



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

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Modanloo V.¹ MSc,
Alimirzaloo V.^{*1} PhD,
Elyasi M.² 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.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

²Mechanical 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 these 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°C. 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°C, 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] Numerical-experimental 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

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

وحید مدائلو MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

ولی‌علی‌میرزالیو* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مجید الیاسی PhD

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

چکیده

صفحات دوقطبی فلزی به دلیل 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 تولید این صفحات از نظر هزینه ساخت است. تیتانیوم به دلیل داشتن مقاومت به خوردگی عالی و چگالی پایین به‌عنوان یک گزینه بالقوه برای ساخت صفحات دوقطبی مطرح می‌شود. در این مقاله، به بررسی تجربی شکل‌پذیری صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت 1mm 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 طراحی‌شده بر اساس روش تاگوچی، عمق پارگی میکروکانال نمونه‌های مهرزنی‌شده، استخراج شد. بررسی نتایج نشان داد که بیشترین میزان ازدیاد طول ورق در دمای 100°C به‌دست می‌آید. به‌علاوه، سرعت و دمای شکل‌دهی به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر عمق شکل‌دهی هستند. از سوی دیگر، تأثیر روانکار در مقایسه با سایر پارامترهای مذکور محسوس نیست. بیشترین عمق شکل‌دهی به میزان 0.494mm با استفاده از آزمایشی با پارامترهای دمای شکل‌دهی 100°C ، سرعت $4/8\text{mm/min}$ و روانکاری با دی‌سولفید مولیبدن حاصل شد.

کلیدواژه‌ها: صفحات دوقطبی فلزی، تیتانیوم، مهرزنی گرم، شکل‌پذیری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

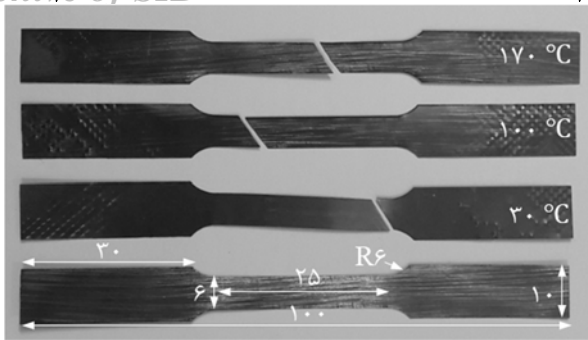
*نویسنده مسئول: v.alimirzaloo@urmia.ac.ir

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 به دلیل وجود موانعی نظیر هزینه، وزن و پایداری محدود شده است^[1]. صفحات دوقطبی کلیدی‌ترین جزء یک پیل سوختی از نظر وزن و هزینه هستند^[2]. در مقایسه با صفحات گرافیتی و کامپوزیتی، امروزه صفحات فلزی به دلیل خواص ساختاری و قابلیت تولید از جایگاه ویژه‌ای بین محققان برخوردار شده‌اند^[3]. 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

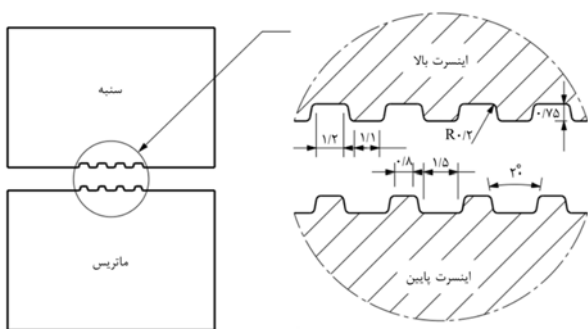
باید لحاظ شوند که برخی از مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: مقاومت به خوردگی، پایداری شیمیایی در محیط اسیدی، مقاومت به ضربه، رسانایی حرارتی و الکتریکی^[4]. هیچ یک از مواد مذکور در بالا به‌تنهایی تمام ویژگی‌ها را ندارد و هر کدام خواص ویژه مربوط به خود را دارد.

تاکنون تحقیقات مختلفی برای ساخت صفحات دوقطبی با استفاده از فلزات مذکور گزارش شده است. هو و همکاران، به مهرزنی صفحات دوقطبی از جنس فولاد ضدزنگ به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی پرداختند^[5]. ضخامت ورق استفاده‌شده در تحقیق آنها، 1.5mm بود. آنها دریافتند که در سرعت‌های مهرزنی پایین، ورق دچار چروکیدگی و در سرعت‌های بالا دچار پارگی می‌شود. کو و همکاران^[6]، موفق به ساخت صفحات دوقطبی به‌کمک فرآیند مهرزنی با نیروی دینامیکی شدند. آنها در پژوهش خود از ورق فولاد ضدزنگ با ضخامت اولیه 1mm استفاده کردند و توانستند با استفاده از فرآیند مهرزنی دینامیکی با موج مربعی، عمق شکل‌دهی را به میزان 7% 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 3mm بود^[7]. آنها تأثیر 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^[8]، به شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد ضدزنگ (با ضخامت ورق اولیه 1mm) با استفاده از فرآیند شکل‌دهی لاستیکی پرداختند. آنها تأثیر الگوی محدب و مقعر را بر عمق شکل‌دهی و توزیع ضخامت صفحات دوقطبی مورد مطالعه قرار دادند و گزارش دادند که با استفاده از الگوی محدب می‌توان به میکروکانال‌های عمیق‌تری دست یافت. جین و همکاران، از ورق تیتانیوم برای ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی استفاده کردند^[9]. آنها با پیدا کردن سطوح بهینه پارامترهای فرآیند شکل‌دهی لاستیکی، توانستند به نرخ پرشدگی 68% (عمق میکروکانال 0.27mm) دست یابند. پالومبو و پیکینینی^[10]، به شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس آلومینیوم با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ گرم پرداختند. ضخامت اولیه ورق در پژوهش آنها 5mm بود که با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، به بررسی تأثیر پروفیل کانال و هندسه صفحات دوقطبی بر میزان نازک‌شدگی پرداختند و همچنین با استفاده از تکنیک آنالیز واریانس، به ارزیابی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی (عرض کانال، شعاع گوشه قالب و ضخامت ورق) پرداختند. آنها توانستند، فرآیند را با دقت مطلوب $98/12\%$ به‌کمک رگرسیون مدل‌سازی کنند. از بین مواد مذکور، تیتانیوم به دلیل 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



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

ورق‌های مورد نیاز برای آزمایش مهرزنی به صورت لوح‌هایی در ابعاد ۳۵×۲۰ میلی‌متر از تیتانیوم خالص تجاری برش داده شدند. به منظور 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 ۱۷mm و توان ۶۰۰W درون قالب تعبیه شدند. دمای قالب در محدوده تغییرات ۵°C 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 صورت 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

به علاوه، اینسرت‌ها برای جلوگیری از سایش و حفظ دقت ابعادی تا ۶۰HRC سخت‌کاری شدند. به منظور جلوگیری از چرخش قالب‌ها از چهار میل راهنما استفاده شد. شکل ۳، به خوبی 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،

میان روش‌های مذکور، ساخت صفحات دوقطبی فلزی، مهرزنی به دلیل 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 اجتناب‌ناپذیر هستند [11].

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 به عنوان یک ماده مقاوم به خوردگی یکی از موضوعات بسیار اساسی در طراحی صفحات دوقطبی فلزی است. شکل‌دهی این جنس در دمای محیط به طور معمول مشکل است؛ از این رو، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از فرآیند مهرزنی گرم به عنوان یک روش موثر به صفحات دوقطبی تیتانیومی با حداکثر عمق کانال دست یافت. برای طراحی آزمایش‌های تجربی از روش تاگوچی (آرایه متعام 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 به منظور دستیابی به بیشترین عمق میکروکانال استخراج و آزمایش صحت‌سنجی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ۰/۱mm برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی با الگوی شیار موازی مستقیم استفاده شده است. جدول ۱، خواص شیمیایی ورق مذکور را که از آزمایش کوانتومتری به دست 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.

جدول ۱) درصد وزنی عناصر آلیاژی ورق استفاده‌شده در آزمایش تجربی

عناصر آلیاژی	مقدار (درصد)
آهن	۰/۱۲
سیلیسیوم	۰/۰۹
سرب	۰/۰۴
منگنز	۰/۰۳
قلع	۰/۰۲

در ابتدا به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق، آزمون کشش تک‌محوره مطابق با استاندارد ASTM-E8M در دماهای محیط، ۱۰۰ و ۱۷۰°C انجام شد. از یک پرس یونیورسال سنتام با ظرفیت ۲۰tons همراه کوره روی آن با سرعت ۰/۶mm/min استفاده شد. در شکل ۱، نمونه‌های کشش قبل و بعد از انجام آزمون در دماهای مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲) پارامترهای انتخابی و سطوح آنها

پارامتر	نماد	سطح کم	سطح متوسط	سطح زیاد
روانکار	L	خشک	گرافیت	دی سولفید مولیبدن
دما (°C)	T	۳۰	۱۰۰	۱۷۰
سرعت	S	۰/۶	۲/۴	۴/۸
(mm/min)				

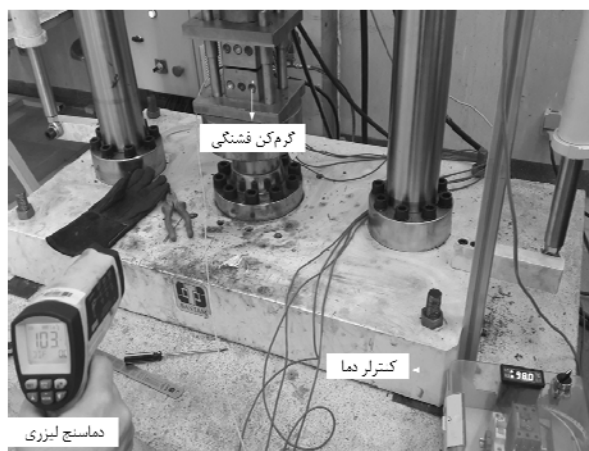
جدول ۳) طرح آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعامد تاگوچی

شماره آزمایش	L	T	S
۱	خشک	۳۰	۰/۶
۲	خشک	۱۰۰	۲/۴
۳	خشک	۱۷۰	۴/۸
۴	گرافیت	۳۰	۲/۴
۵	گرافیت	۱۰۰	۴/۸
۶	گرافیت	۱۷۰	۰/۶
۷	دی سولفید مولیبدن	۳۰	۴/۸
۸	دی سولفید مولیبدن	۱۰۰	۰/۶
۹	دی سولفید مولیبدن	۱۷۰	۲/۴

نتایج 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 ۰/۸mm 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 محیطی، ۱۰۰ و ۱۷۰°C در نمودار ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود 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°C نسبت به دمای ۱۷۰°C 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 [18]. در فاز اول با افزایش دمای محیط تا ۱۰۰°C، تنش سیلان و ازدیاد طول به‌ترتیب به‌میزان ۱۶٪ کاهش و ۲۳۴٪ افزایش می‌یابند. در فاز دوم با افزایش دما تا ۱۷۰°C، تنش سیلان و ازدیاد طول هر دو در حدود ۱۹٪ کاهش می‌یابند. بدین ترتیب، به‌نظر می‌رسد که دمای ۱۰۰°C 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 دی سولفید مولیبدن) بیشینه عمق

ابتدا تمیز و سپس درون رزین اپوکسی 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.

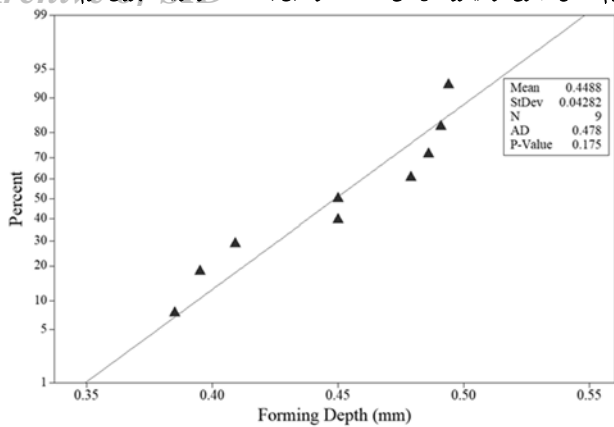


شکل ۳) مجموعه قالب مهرزنی گرم همراه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

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 ۳۰°C در نظر گرفته شده است. دماهای ۱۰۰ و ۱۷۰°C نیز با توجه به پژوهش‌های 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 می‌شود [12]. سرعت ۰/۶mm/min به‌عنوان 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 دی سولفید مولیبدن نیز بر اساس پژوهش‌های پیشین در زمینه فرآیند مهرزنی به‌ویژه ورق تیتانیوم [13, 14] و مهرزنی و کشش عمیق گرم [15, 16] در نظر گرفته شدند. از آنجا که انجام تمام آزمایش‌ها (۳=۲۷) 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 به‌کمک نرم‌افزار مینی‌تپ 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 yi به‌ترتیب تعداد آزمایش و ویژگی اندازه‌گیری شده هستند [17].

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

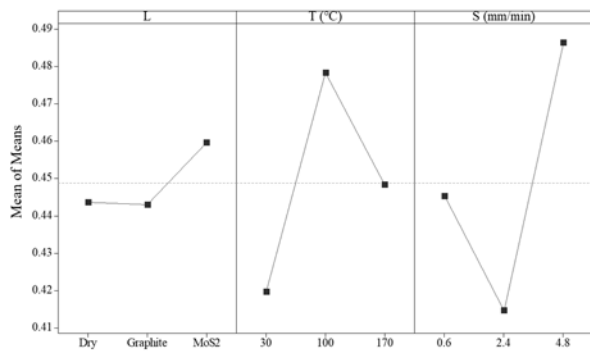


نمودار ۲) احتمال نرمال برای عمق شکل‌دهی

نتایج آنالیز واریانس برای عمق شکل‌دهی در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت و دمای شکل‌دهی به ترتیب با مشارکت به میزان ۵۲/۸۷ و ۳۵/۲۰٪ مهم‌ترین پارامترها هستند. از سوی دیگر پارامتر روانکار تاثیر قابل توجهی (در مقایسه با سایر پارامترها) بر عمق شکل‌دهی ندارد. نمودار ۳، تاثیرات اصلی پارامترهای مذکور بر عمق شکل‌دهی را نشان می‌دهد. از آنجا که تابع پاسخ در این تحقیق از نوع بزرگ‌تر بهتر است؛ لذا نمودار اثرات اصلی برای میانگین روند یکسانی با نمودار سیگنال به نویز دارد؛ لذا بیشترین مقادیر پارامترها به‌عنوان سطح مناسب انتخاب می‌شوند. در اینجا ترکیب پارامترها به‌صورت روانکار دی‌سولفید مولیبدن، دمای شکل‌دهی ۱۰۰°C و سرعت ۴/۸mm/min به‌عنوان ترکیب مناسب حاصل شد که آزمون صحت‌سنجی با مقادیر مذکور انجام شد.

جدول ۵) نتایج آنالیز واریانس برای عمق شکل‌دهی

پارامتر	درجه آزادی	رتبه	میزان مشارکت (%)
روانکار	۲	۳	۳/۶۴
دما	۲	۲	۳۵/۲۰
سرعت	۲	۱	۵۲/۸۷
خطا	۲	-	-
کل	۸	-	-

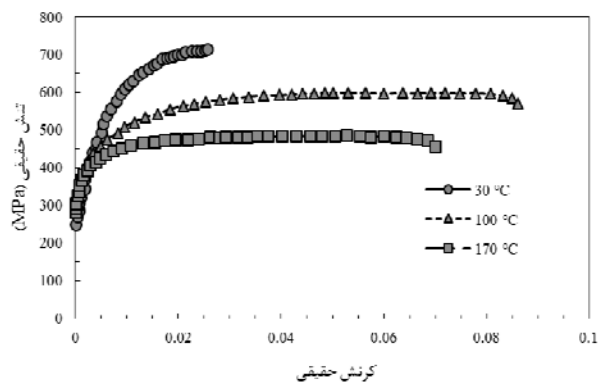


نمودار ۳) تاثیرات اصلی پارامترها بر عمق شکل‌دهی

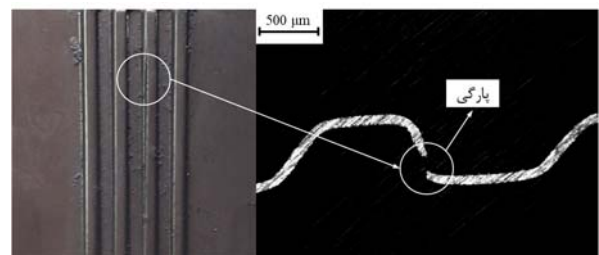
میکروکانال در دمای ۱۰۰°C حاصل می‌شود. علت این امر این است که هنگام استفاده از روانکار، افزایش بیش از حد دما تا ۱۷۰°C منجر به چسبیدن ورق به سطح قالب و در نتیجه پاره‌شدن ورق می‌شود. در شکل ۴، یک نمونه از وقوع پارگی در میکروکانال نشان داده شده است. نمودار احتمال نرمال برای عمق شکل‌دهی مطابق با روش اندرسون-دارلینگ در نمودار ۲ نمایش داده شده است. مطابق با نمودار، فاصله نقاط در همسایگی خط مورب بیانگر پیروی کردن توزیع داده‌ها از توزیع نرمال است. به‌علاوه، مقدار آماری p برابر با ۰/۱۷۵ به‌دست آمد و چون این مقدار بیشتر از ۰/۰۵ است، فرض نرمال‌بودن توزیع داده‌ها و در نتیجه قابلیت اطمینان به نتایج آنالیز واریانس اثبات می‌شود [19].

جدول ۴) نتایج تجربی عمق شکل‌دهی و نسبت سیگنال به نویز مربوطه

شماره آزمایش	عمق شکل‌دهی (mm)	نسبت سیگنال به نویز
۱	۰/۳۹۵	-۸/۰۶۸
۲	۰/۴۵۰	-۶/۹۳۵
۳	۰/۴۸۶	-۶/۲۶۷
۴	۰/۳۸۵	-۸/۲۹۰
۵	۰/۴۹۰	-۶/۱۲۵
۶	۰/۴۵۰	-۶/۹۳۵
۷	۰/۴۷۹	-۶/۳۹۳
۸	۰/۴۹۱	-۶/۱۷۸
۹	۰/۴۰۹	-۷/۷۶۵

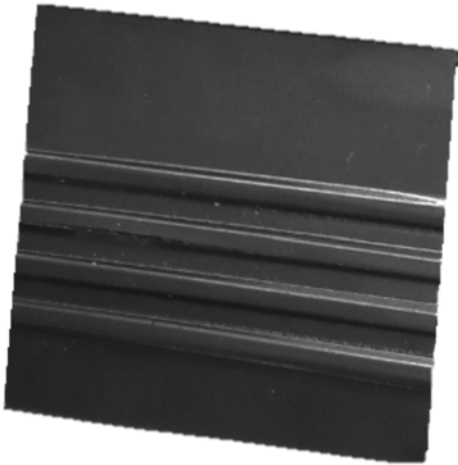


نمودار ۱) منحنی تنش- کرنش حقیقی ورق تیتانیوم خالص تجاری در دماهای مختلف



شکل ۴) محل وقوع پارگی در میکروکانال

تیتانیومی گزارش شده مربوط به پژوهش ماهابونیاچای و همکاران [23] و جین و همکاران [9] است که به ترتیب به عمق شکل‌دهی ۰/۱۴ و ۰/۲۷mm دست یافتند. همان‌طور که قابل استنباط است، عمق شکل‌دهی به دست آمده برای میکروکانال در این پژوهش بسیار مطلوب و کاربردی است.



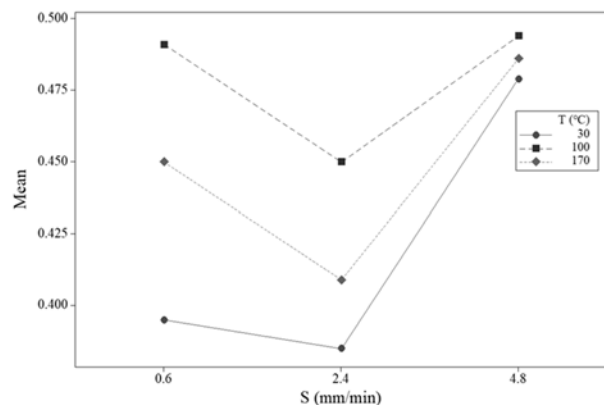
شکل ۵) قطعه شکل‌داده شده حاصل از آزمایش صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

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 به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. پودرهای گرافیت و دی‌سولفید مولیبدن محلول در پارافین همراه حالت خشک به عنوان حالات مختلف روانکاری در نظر گرفته شدند. از آرایه متعامد تاگوچی با ۹ آزمایش به منظور 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 به دست آمد که بیشترین میزان تغییر شکل ورق در دمای ۱۰۰°C 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 به دست آمده نشان داد که بیشترین عمق شکل‌دهی میکروکانال برای جنس تیتانیوم خالص تجاری به اندازه ۰/۴۹۴mm قابل دستیابی است. با توجه به نتایج ارائه شده برای سایر جنس‌ها نظیر فولاد و آلومینیوم در مراجع دیگر، عمق به دست آمده برای ورق تیتانیوم قابل قبول و کاربردی است.
- ۳- نتایج به دست آمده در شکل‌دهی ورق تیتانیوم خالص تجاری نشان داد که بهترین شرایط شکل‌دهی برای دستیابی به بیشترین عمق و عدم پارگی و توزیع ضخامت مناسب در میکروکانال‌ها، به کمک آزمایشی با استفاده از روانکار دی‌سولفید مولیبدن، دمای ۱۰۰°C و سرعت ۴/۸mm/min حاصل شد. به علاوه در حالت

مطابق با نمودار ۳، در تفسیر مهم‌ترین پارامتر یعنی سرعت شکل‌دهی مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت از مقدار ۰/۶mm/min تا سطح متوسط یعنی ۲/۴mm/min مقدار عمق کانال به میزان 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؛ به طوری که عمق شکل‌دهی در ابتدا با افزایش دما تا ۱۰۰°C در حدود ۱۴٪ افزایش و سپس با افزایش دما تا ۱۷۰°C حدود ۷٪ کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت شکل‌دهی یا به عبارت دیگر نرخ کرنش، تنش سیلان افزایش و در نتیجه شکل‌پذیری ورق تیتانیومی کاهش می‌یابد [20]. همچنین پارامتر نرخ کرنش نیز به دما وابسته بوده و با افزایش دما افزایش می‌یابد [21]. از طرف دیگر با افزایش دمای شکل‌دهی، تنش سیلان کاهش و در نتیجه شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد [22]. در نتیجه، بین سرعت و دمای شکل‌دهی باید ارتباط (وابستگی) نزدیکی وجود داشته باشد. تاثیر متقابل بین پارامترهای مذکور در نمودار ۴ نشان داده شد که بیانگر وجود ارتباط بین سرعت و دما است.



نمودار ۴) منحنی تاثیرات متقابل دما و سرعت شکل‌دهی

مشاهده می‌شود که بیشینه عمق شکل‌دهی میکروکانال با استفاده از سرعت ۴/۸mm/min به ترتیب در دماهای ۱۰۰°C، ۱۷۰°C و دمای محیط به دست می‌آید. همچنین مشاهده می‌شود که در دمای ۱۰۰°C اختلاف عمق شکل‌دهی حاصل شده در سرعت‌های ۰/۶ و ۴/۸mm/min کمتر از ۱٪ است. از آنجا که آزمایشی با سطوح مناسب پارامترها (دی‌سولفید مولیبدن، دمای ۱۰۰°C، سرعت ۴/۸mm/min) در بین آزمایش‌های طراحی شده جدول ۳ نیست، لذا باید آزمایش منطبق با ترکیب مناسب انجام گیرد تا صحت نتایج حاصل تایید شود. در شکل ۵، صفحه دوقطبی شکل‌داده شده حاصل از آزمایش صحت‌سنجی نشان داده شده است که در آن بیشینه عمق میکروکانال برابر با ۰/۴۹۴mm به دست آمد که بسیار نزدیک به آزمایش شماره ۸ (دی‌سولفید مولیبدن، دمای ۱۰۰°C، سرعت ۰/۶mm/min) ولی بیشتر از آن است. این در حالی است که بیشینه عمق میکروکانال که تاکنون برای صفحات دوقطبی

- 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, Koksall 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°C، عمق شکل‌دهی کاهش یافته و عیب پارگی در قطعه رخ می‌دهد.

۴- نتایج آنالیز واریانس نشان داد که پارامترهای سرعت و دما به ترتیب به میزان 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 به دست آمده در این پژوهش می‌تواند برای تولید صفحات دوقطبی فلزی با عمق میکروکانال مطلوب در صنایع تولید انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهام نویسندگان: وحید مدانلو (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ ولی علی‌میرزالی (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 Ghadikolae 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