



ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به کمک فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز

بهروز آقاجانلو، سید جمال حسینی پور*، حامد جمشیدی اول

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۶ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۵ دی ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۳ دی ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

صفحات دوقطبی
شکل‌دهی داغ با دمش گاز
الگوی شیاری مارپیچ
فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

چکیده: شکل‌دهی داغ ورق‌های فلزی با دمش گاز یکی از فرآیندهای نوین در شکل‌دهی فلزات به شمار می‌رود که به دلیل افزایش شکل‌پذیری و کاهش تنش تسلیم فلز که در نتیجه افزایش دمای فرآیند رخ می‌دهد، قابلیت ساخت محصولات با اشکال پیچیده در ابعاد بسیار کوچک و بزرگ را دارد. در این پژوهش، شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر و با الگوی شیاری مارپیچ به کمک فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی و فرآیندی بر روی شکل‌پذیری صفحات، قالبی با سه مارپیچ با هندسه‌های مختلف طراحی و ساخته شد و سپس آزمایش‌ها در دماها، فشارها و زمان‌های مختلف انجام شد. معیارهای ارزیابی شامل درصد نازک‌شدگی ورق، توزیع ضخامت و عمق پرشدگی قالب در نظر گرفته شد. نتایج حاصل نشان داد عامل دما و زمان به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر شکل‌پذیری ورق در ساخت صفحات دوقطبی دارند. از میان سه شیار با عرض‌های ۱/۵ و ۲ میلی‌متر، در شیار با عرض ۲ میلی‌متر با وجود بیشترین میزان درصد پرشدگی قالب، درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی کمتر از شیار با عرض ۱/۵ میلی‌متر است. بیشترین درصد پرشدگی شیار قالب با مقدار ۸۸/۸٪ در شیار با عرض ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴۰ بار و مدت‌زمان ۳۰ دقیقه به‌دست آمد.

۱- مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی از یک‌سو و میزان بالای آلاینده‌گی سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر، دست‌یابی و بهره‌برداری از منابع انرژی پاک و سازگار با محیط‌زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیل‌های سوختی با غشا الکترولیت پلیمری^۱ یکی از منابع تأمین انرژی پاک هستند که با آلاینده‌گی بسیار کم قادر به تولید انرژی الکتریکی از انرژی شیمیایی می‌باشند [۱]. در ساختمان پیل سوختی از صفحاتی تحت عنوان صفحات دوقطبی استفاده می‌شود که این صفحات بیشترین وزن، حجم و هزینه پیل را به خود اختصاص می‌دهند. لذا استفاده از صفحات نازک‌تر، سبک‌تر، ارزان‌تر ضمن حفظ استحکام می‌تواند در بهینه کردن ساخت و بهره‌برداری از پیل‌ها تأثیر به‌سزایی داشته باشد [۲]. ضخامت کم صفحات دوقطبی فلزی و بالا بودن نسبت کشش موجب شده که در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ساخت صفحات دوقطبی فلزی توسط روش‌های مختلف شکل‌دهی انجام شده است. این صفحات در حالت کلی در قالب چهار الگو ارائه می‌شوند که عبارتند از: الگوی پینی، الگوی شیاری مستقیم، الگوی شیاری مارپیچ و الگوی شیاری درهم‌تنیده [۳ و ۴]. به دلیل اهمیت بالای استحکام پیل سوختی و رسانایی الکتریکی بالا، انتخاب جنس مناسب این صفحات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. غالباً صفحات دوقطبی

از کامپوزیت‌های پایه فلزی و پایه گرافیتی ساخته می‌شوند. صفحات فلزی به دلیل برخورداری از خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب مانند استحکام مکانیکی و هدایت الکتریکی بالا و همچنین قابلیت شکل‌پذیری بهتر نسبت به صفحات گرافیتی ترد و شکل‌ناپذیر، گزینه مناسب‌تری برای ساخت این صفحات می‌باشند. لی و همکاران [۵] شبیه‌سازی و ساخت میکرو صفحات فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر را توسط فرآیند میکروماشین‌کاری الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به کمک این روش نوین ساخت این صفحات با مسیرهای جریان بسیار کوچک (شیارهایی با عرض ۰/۵ میلی‌متر و عمق ۰/۲ میلی‌متر) را مورد بررسی قرار دادند. با وجود روش‌های مختلف ارائه شده جهت ساخت صفحات دوقطبی فلزی، در بررسی روش‌های مختلف ساخت با رویکرد زمان و هزینه تولید محصول نهایی، برخی از روش‌های ارائه شده از قبیل ماشین‌کاری با تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری الکتروشیمیایی قابلیت استفاده به‌عنوان تولید انبوه را ندارند. لذا روش‌های مرسوم جهت ساخت این صفحات عبارتند از استمپینگ [۶]، هیدروفرمینگ [۷] و شکل‌دهی با لایه لاستیکی [۸]. هر یک از فرآیندهای مذکور دارای مزایایی از قبیل سرعت بالای تولید، تجهیزات ساده برای استمپینگ، شکل‌دهی یکنواخت و قابلیت تکرارپذیری بالا برای هیدروفرمینگ و عدم نیاز به تنظیم دقیق مجموعه قالب و کاهش هزینه قالب‌سازی برای شکل‌دهی با لایه لاستیکی هستند. اما با این وجود معایب روش‌های فوق زمینه‌ساز بروز مشکلاتی در روند تولید این صفحات می‌شود،

1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.hosseini@nit.ac.ir

دمش گاز^۱ می‌باشد. در این شیوه به دلیل انجام فرآیند در دمای بالا، با افزایش حد شکل‌دهی، کاهش تنش‌های پسماند، کاهش فشار موردنیاز و بهبود خواص مواد ناشی از انجام عملیات حرارتی توأم با فرآیند، مشکلات کیفی تولید مرتفع می‌شود. از دیگر مزایای این فرآیند می‌توان به شکل‌دهی با اعمال فشار کم، کیفیت سطح بالای محصول، هزینه تولید پایین و توانایی تولید قطعات پیچیده اشاره کرد [۱۷ و ۱۸]. اسماعیلی و همکاران [۱۹] در پژوهشی ساخت صفحات دوقطبی فلزی از جنس آلومینیوم ۸۱۱۱ با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر با الگوی پینی را توسط فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز موردبررسی قراردادند. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و توسط فشار گاز آرگون صورت گرفت. طبق نتایج حاصل مشخص شد با افزایش سطح فشار، میزان پرشدگی قالب افزایش می‌یابد در حالی که با این افزایش سطح فشار کاهش ضخامت ناحیه بحرانی تغییر چندانی نمی‌کند. در مقاله حاضر شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر با الگوی شیاری ماریچ در قالب محدب توسط فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز موردبررسی قرارگرفته است. پارامترهای فرآیندی موردبررسی دما، فشار و زمان و پارامترهای هندسی عرض شیار، نسبت عمق شیار به عرض شیار (h/w) و نسبت عرض شیار به عرض خنک‌کاری (w/s) می‌باشند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای موردنظر روی نحوه شکل‌گیری، میزان شکل‌گیری، نواحی بحرانی در شکل‌دهی ورق، توزیع ضخامت ورق در طول مسیر پروفیل ورق در مقطع برش‌خورده و همچنین درصد پرشدگی شیار و درصد نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی شکل‌دهی موردبررسی قرارگرفته است.

۲- روش تحقیق

ورق مورد آزمایش از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ نمای کلی مجموعه تجهیزات آزمایش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جهت اعمال فشار از یک کپسول گاز استفاده شده که میزان فشار به وسیله یک شیر کنترل فشار و سنجه فشار^۲ با قابلیت کنترل فشار تا سقف ۴۰ بار و دقت ۲ بار تنظیم می‌شود. جهت اعمال حرارت از یک کوره الکتریکی با قابلیت ایجاد حرارت تا دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده که دمای آن به وسیله یک کنترلر دما با دقت ۲ درجه سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. در شکل ۲ طرح شماتیک مجموعه قالب و شکل ۳ اجزای مجموعه قالب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی شیاری در قالب به صورت اینزرتی طراحی شده که در داخل غلاف بالایی قرار می‌گیرد و گاز از طریق قالب پایینی وارد می‌شود.

جهت آب‌بندی از واشر مسی استفاده شده و با استفاده از پرس مکانیکی اتصال قالب‌های بالایی و پایینی انجام شده و کل مجموعه قالب در داخل

برای مثال یکی از عمده‌ترین مشکلات در روش استمپینگ ضرورت ساخت دو قالب (سنجه و ماتریس) می‌باشد که علاوه بر تحمیل هزینه‌های زیاد ساخت و مونتاژ، وجود اصطکاک بین اجزای قالب و ورق می‌باشد که موجب بروز مشکلات فراوانی در کیفیت و میزان شکل‌گیری ورق می‌شود. چوی و همکاران [۹] بهبود شکل‌پذیری در ساخت صفحات با الگوی شیاری را به کمک فرآیند استمپینگ مورد مطالعه قراردادند. به دلیل پیچیدگی هندسی و ضخامت کم الگوهای شیاری نازک، امکان ساخت آن‌ها در یک مرحله توسط فرآیند استمپینگ وجود ندارد، به همین خاطر فرآیند ساخت طی سه مرحله استمپ اولیه، عملیات حرارتی و استمپ نهایی انجام شد. طبق نتایج حاصل مشخص شد توسط فرآیند سه مرحله‌ای مذکور نمونه‌های موفق با متوسط ضخامت ۷۵ میکرومتر ساخته شد و شکل‌پذیری در مقایسه با استمپ یک مرحله‌ای افزایش یافت. در روش استمپینگ اصطکاک زیاد بین دو قالب موجب کاهش کیفیت سطح، کاهش حد کشش و افزایش احتمال پارگی می‌شود [۱۰ و ۱۱]. اوسیا و همکاران [۱۲] در پژوهشی شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱۱ میلی‌متر و با الگوی پینی توسط فرآیند هیدروفرمینگ موردبررسی قراردادند. معیارهای بررسی را پروفیل پرشدگی، درصد پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی در نظر گرفتند. طبق نتایج حاصل شده مشخص شد که نمونه سالم در فشار ۳۰۰ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین با افزایش نسبت عمق به عرض (h/w) درصد پرشدگی و نازک‌شدگی مطلوب‌تری حاصل شد. در پژوهشی دیگر محمدتبار و همکاران [۱۳] شکل‌دهی یک الگوی شیاری ماریچ متصل به هم بر روی صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را با فرآیند هیدروفرمینگ مورد مطالعه قراردادند. طبق نتایج حاصل مشخص شد با افزایش فشار شکل‌دهی، میزان پرشدگی قالب افزایش یافته و ضخامت ناحیه بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش، کاهش بیشتری می‌یابد. با این وجود در فرآیند هیدروفرمینگ نیازمند اعمال فشارهای بسیار بالا در محدوده چند ده تا چند صد مگاپاسکال می‌باشد، لذا نشت‌بندی مخصوص و اعمال این محدوده‌های فشار نیازمند صرف هزینه‌های زیاد تولید می‌شود [۱۴]. لیو و همکاران [۱۵] شکل‌دهی صفحات دوقطبی را به روش شکل‌دهی با لایه لاستیکی در قالب محدب و مقعر با رویکرد بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر چگونگی و میزان پرشدن قالب موردبررسی قراردادند. با بررسی نمودارهای توزیع ضخامت مشخص شد که در حالت مقعر برای دستیابی به نسبت عمق به عرض بالاتر نیروی بیشتری نسبت به حالت محدب نیاز است. همچنین اگر نسبت عرض شیار به عرض خنک‌کاری (w/s) بزرگتر از یک باشد، قالب مقعر و اگر کوچکتر از یک باشد قالب محدب مناسب می‌باشد. همچنین با افزایش نسبت عمق به عرض درصد پرشدگی در قالب محدب افزایش و در قالب مقعر کاهش می‌یابد. از معایب روش شکل‌دهی با لایه لاستیکی می‌توان به عدم تکرارپذیری فرآیند و محدودیت حد تراکم لایه لاستیکی که منجر به محدودیت حد شکل‌دهی ورق می‌شود، اشاره کرد [۱۶].

یکی از روش‌های جدید شکل دادن فلزات، شکل‌دهی داغ فلزات با

1 Hot Metal Gas Forming (HMGF)

2 Pressure gauge



Fig. 3. Geometric parameters of the die
شکل ۳: تصویر مجموعه قالب

طراحی و ساخت قالب با ابعاد کوچک و دقت بالا، طرح مارپیچ به کمک دستگاه ماشین‌کاری کنترل عددی^۱ توسط ابزار مخصوص بر روی قالب موردنظر که تصویر آن در شکل ۴ نشان داده شده است، ایجاد شد. جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها در بررسی تأثیر پارامترهای هندسی قالب بر شکل‌دهی ورق که در شکل ۵ این پارامترها معرفی شده‌اند، سه شیار مارپیچی با هندسه‌های مختلف در یک قالب ساخته شد که مقادیر پارامترهای هندسی ثابت این شیارها در جدول ۲ و مقادیر پارامترهای هندسی متغیر در جدول ۳ آورده شده است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی دما، فشار و زمان روی روند شکل‌گیری صفحات دوقطبی بررسی‌هایی جهت انتخاب محدوده پارامترهای فرآیندی انجام شد. دماهای موردبررسی ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شدند. همچنین فشارهای مورد مطالعه ۱۵، ۲۵ و ۳۵ بار و مدت‌زمان فرآیند ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه اعمال شد.



Fig. 4. The values of constant geometric parameters (in millimeter)
شکل ۴: تصویر قالب ساخته شده

جدول ۱: ترکیب عناصر آلیاژی ورق SS 304

Table 1. The composition of SS304 sheet

نام عنصر	درصد عنصر
آهن (Fe)	۷۱/۰۸
کربن (C)	۰/۰۶۴
کبالت (Co)	۰/۰۸
سیلیسیوم (Si)	۰/۳۱
منگنز (Mn)	۱/۲۹
فسفر (P)	۰/۰۳
گوگرد (S)	۰/۰۰۵
مولیبدن (Mo)	۰/۱۹
نیکل (Ni)	۸/۸۵
کروم (Cr)	۱۸/۱



Fig. 1. The photograph of the die set

شکل ۱: نمای کلی مجموعه تجهیزات آزمایش

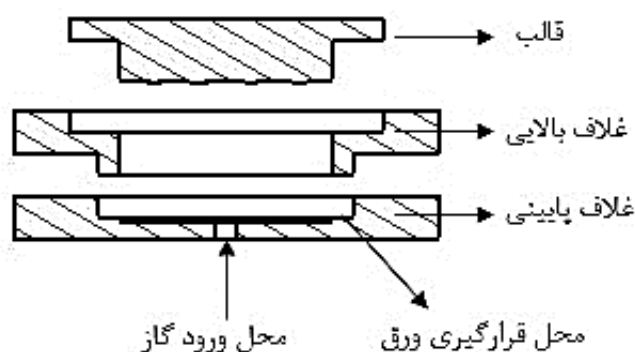


Fig. 2. The photograph of fabricated insert die

شکل ۲: تصویر شماتیک مجموعه قالب

کوره الکتریکی قرار می‌گیرد.

با توجه به ضخامت بسیار کم ورق مورد آزمایش و به تبع آن ضرورت

1 CNC machining

تحت فشار با کنترل فشار و دمای مربوط به هر آزمایش مدت زمان مشخصی تحت شرایط پایدار مربوط به آن آزمایش نگه داشته می شود تا اثر زمان بر میزان شکل پذیری ورق نیز مورد بررسی قرار گیرد. نهایتاً با اتمام روند انجام فرآیند، مجموعه قالب باز شده و نمونه صفحه دوقطبی شکل گرفته که در شکل ۶ به عنوان نمونه آورده شده است، از محفظه قالب خارج می شود. با توجه به الگوی ماریچ شیارها و داشتن هندسه نامتقارن به منظور بررسی نواحی بحرانی نیاز به بررسی دو مقطع طولی و عرضی شیارها می باشد که در شکل ۷ مقاطع های مورد بررسی به صورت شماتیک نشان داده شده است. صفحات شکل گرفته مطابق شکل ۸ از نواحی اشاره شده برش خورده و مانت^۱ شده و سپس آماده بررسی میکروسکوپی شدند. حاصل کار ۵۴ مقطع متشکل از ۲۷ نمونه مقاطع عمود بر شیار (مقطع A) و ۲۷ نمونه مقاطع عمود بر پیچ انتهایی شیار (مقاطع B و C و D) در شرایط مختلف آزمایش شد.

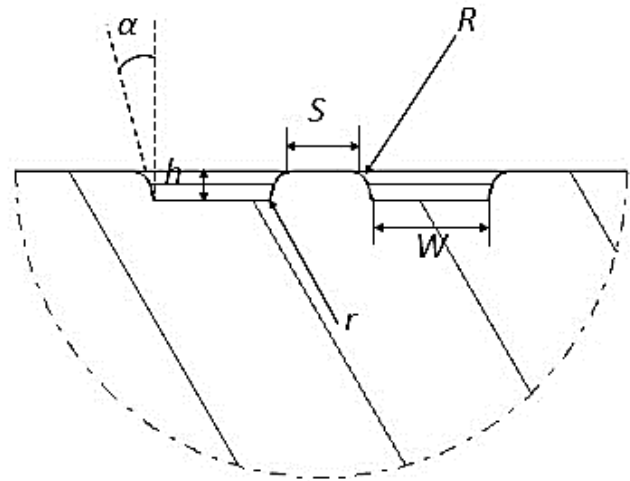


Fig. 5. The values of variable geometric parameters (in millimeter)

شکل ۵: پارامترهای هندسی قالب

جدول ۲: مقادیر پارامترهای هندسی ثابت (واحد: میلی متر)

Table 2. Overview of experiment setup

ردیف	عنوان پارامتر	اندازه
۱	عمق شیار (h)	۰/۵
۲	زاویه دیواره شیار (α)	۱۵ (درجه)
۳	شعاع لبه خارجی (R)	۰/۳
۴	شعاع لبه داخلی (r)	۰
۵	عرض خنک کاری (S)	۱/۵

جدول ۳: مقادیر پارامترهای هندسی متغیر (واحد: میلی متر)

Table 3. The layout of die set

ردیف	عنوان پارامتر	اندازه
۱	عرض شیار (w)	۱ - ۱/۵ - ۲
۲	نسبت عمق به عرض شیار (h/w)	۰/۵ - ۰/۳۳ - ۰/۲۵
۳	نسبت عرض شیار به عرض خنک کاری (w/s)	۰/۶۶ - ۱ - ۱/۳۳



Fig. 6. The formed sheets at pressure a) 15, b) 25 and c) 35 bar

شکل ۶: صفحات شکل گرفته در الف) ۱۵ بار ب) ۲۵ بار ج) ۳۵ بار

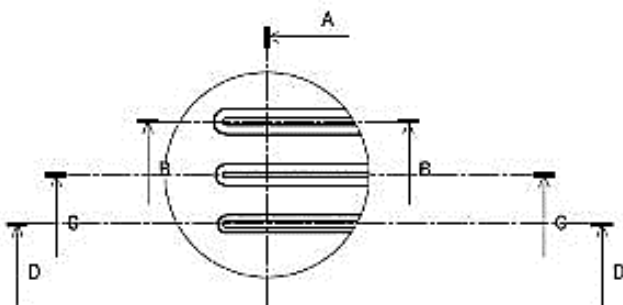


Fig. 7. The cut position of the formed sheets

شکل ۷: محل مقاطع برش خورده ورق شکل گرفته

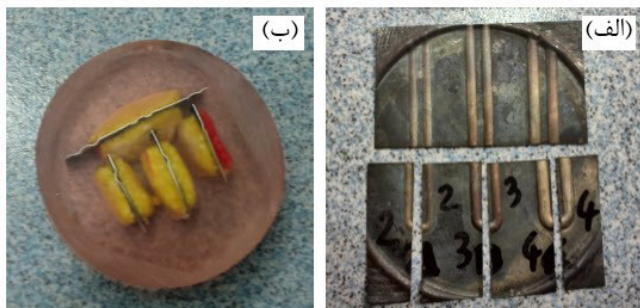


Fig. 8. a) The cut sections of a sample b) A mounted sample

شکل ۸: الف) مقاطع برش خورده ب) نمونه مانت شده

نمونه های مورد استفاده جهت انجام آزمایش ورق های فلزی گرد به قطر ۷۳ میلی متر بوده که از هر طرف ۶/۵ میلی متر از قطر گرده ورق به مهار ورق و آب بندی اختصاص داشته و نهایتاً ۵۰ میلی متر از بخش میانی ورق متعلق به سطح اصلی مورد نظر جهت انجام فرآیند می باشد. پس از تعبیه ورق، مجموعه قالب بسته شده و با اعمال فشار پرس آب بندی می شود. سپس کل مجموعه قالب در داخل کوره قرار گرفته و به دمای مورد نظر می رسد. جهت اعمال فشار گاز از گاز آرگون به دلیل خنثی بودن و جلوگیری از اکسیداسیون ورق استفاده شده است. گاز آرگون به محفظه داخلی قالب تزریق می شود که در مدت زمان یک دقیقه به طور پیوسته و با شیب ملایمی انجام می شود. پس از حصول اطمینان از تنظیم فشار پایدار داخل محفظه قالب، مجموعه

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر دما

برای تحلیل توزیع ضخامت همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، نواحی مختلف به‌عنوان مناطق مورد بررسی انتخاب شدند. با توجه به اینکه نواحی مختلف تحت بارگذاری‌های متفاوتی قرار می‌گیرند، نکته حائز اهمیت در این بخش که موجب بروز تفاوت در ضخامت در حین شکل‌گیری و توزیع ناهمگون ضخامت در مناطق مختلف شده است، همین تفاوت در نوع بارگذاری نواحی مختلف می‌باشد. برای توضیح نوع وابستگی توزیع ضخامت به پارامترهای مورد بررسی، توزیع ضخامت از دو جنبه میزان کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی و اختلاف ضخامت در نواحی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد بیشترین کاهش ضخامت در تمامی نمونه‌ها مربوط به ناحیه B می‌باشد. در تحلیل دلیل این رخداد می‌توان به نوع بارگذاری اعمال‌شده ناشی از هندسه مسأله در نواحی مختلف اشاره کرد که ناحیه B تحت تأثیر ۳ بارگذاری مختلف خمشی ناشی از فشار گاز، کشش ناشی از اصطکاک لبه قالب و کشش ناشی از کشیدگی نواحی مجاور قرار می‌گیرد. بنابراین ناحیه B به‌عنوان ناحیه بحرانی مقطع مشخص شد. در بررسی اختلاف ضخامت در نواحی مختلف مشاهده شد که عامل دما بیشترین تأثیر را بر نمودار توزیع ضخامت دارد. به منظور بررسی تأثیر عامل دما بر میزان شکل‌پذیری ورق آزمایش‌ها در دماهای ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشار ۳۵ بار و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه انجام شد. پس از استخراج نتایج آزمایش‌ها، به مقایسه و بررسی نتایج حاصل پرداخته شد. به‌عنوان نمونه در شکل ۱۰ نمودار مربوط به توزیع ضخامت ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در دماهای مذکور نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است بیشترین تغییرات ضخامت و نازک‌شدگی در نمونه مربوط به دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. نکته قابل توجه دیگر در نمودارهای توزیع ضخامت مشاهده می‌شود عدم تقارن نسبی نمودارهای توزیع ضخامت می‌باشد. این عدم تقارن ناشی از نامتقارن بودن هندسه قالب مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها بوده که در حین شکل‌دهی ورق تأثیر خود را به‌این ترتیب روی توزیع ضخامت

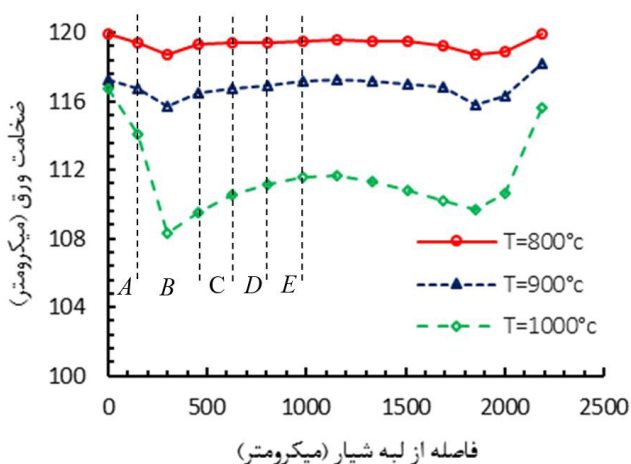


Fig. 10. Comparison of sheet thickness distribution in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 35 bar, 10 min and at different temperatures

شکل ۱۰: مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه در دماهای مختلف ورق نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه با افزایش دما تنش سیلان فلز کاهش می‌یابد بنابراین با اعمال فشار یکسان ورقی که دمای بالاتری دارد شکل‌پذیری بیشتری خواهد داشت. در شکل ۱۱ پروفیل‌های پرشدگی ورق مطابق حالت قبل در مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر با اعمال فشار ۳۵ بار و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه در دماهای ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود عمق پرشدگی ورق در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود دو برابر این مقدار در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و حدود پنج برابر این مقدار در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین اختلاف محسوس بین میزان عمق شکل‌گیری ورق در این سه دما حاکی از تأثیر قابل توجه عامل دما بر میزان شکل‌گیری ورق است.

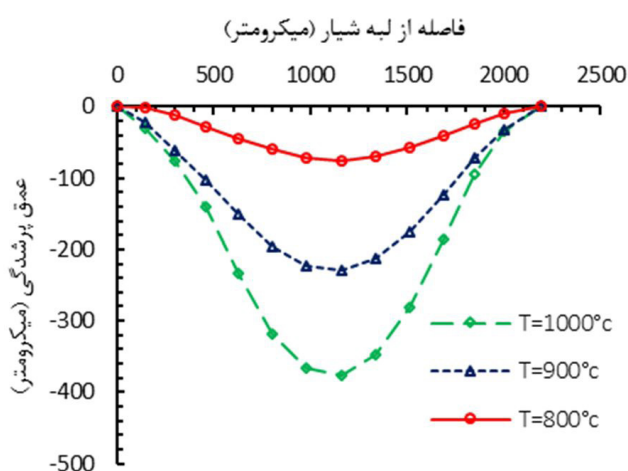


Fig. 11. Comparison of sheet filling profile in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 35 bar, 10 min and at different temperatures

شکل ۱۱: مقایسه نمودارهای پروفیل پرشدگی ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه در دماهای مختلف

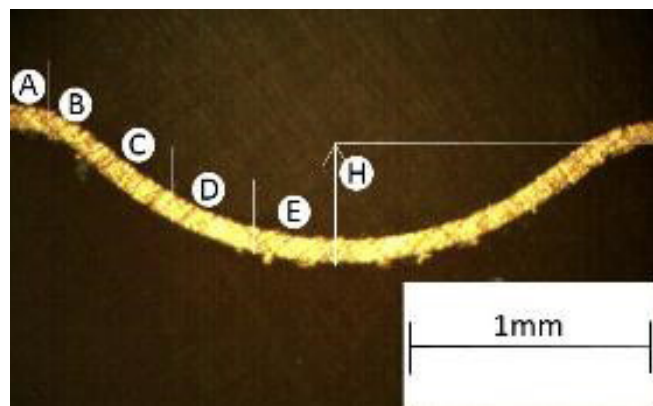


Fig. 9. The different regions of studied sections

شکل ۹: نواحی مختلف مقطع مورد مطالعه

فشار اعمالی ورق دچار خمش بیشتری می‌شود و به دلیل تأثیر این دو مکانیزم، ورق با شیب تندتری نسبت به مرحله قالب به درون شیار فرورفته و نازک‌شدگی ورق تشدید می‌شود. به همین دلیل با افزایش فشار نازک‌شدگی ورق در ناحیه بحرانی افزایش می‌یابد. با اعمال شرایط مختلف فرآیندی، نمودارهای پروفیل پرشدگی در شیارهای با هندسه‌های مختلف استخراج شدند. در شکل ۱۴ نمودارهای پروفیل پرشدگی مربوط به دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشارهای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ بار در مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار میزان عمق پرشدگی قالب افزایش می‌یابد ولی در هیچ‌یک از سه فشار اعمال شده حداکثر عمق پرشدگی

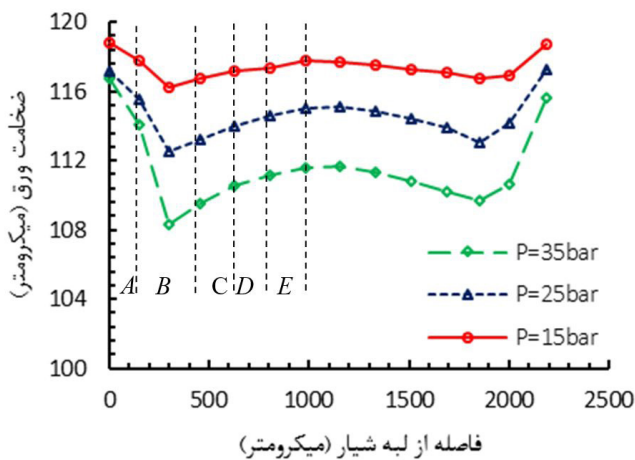


Fig. 13. Comparison of sheet thickness distribution in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 1000°C, 10 min and at different pressures

شکل ۱۳: مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت ورق مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰ دقیقه در فشارهای مختلف

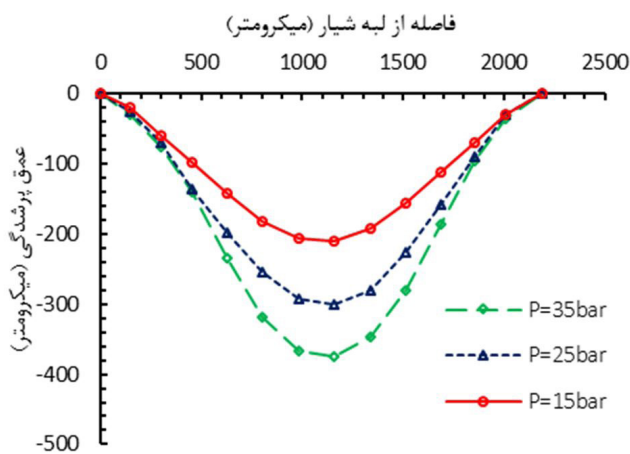


Fig. 14. Comparison of sheet filling profile in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 1000°C, 10 min and at different pressures

شکل ۱۴: مقایسه نمودارهای پروفیل پرشدگی ورق مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰ دقیقه در فشارهای مختلف

معیار درصد نازک‌شدگی در این پژوهش به درصد نازک‌شدگی نقطه بحرانی در ورق اطلاق می‌شود و به‌عنوان یک معیار محدودکننده حد شکل‌دهی مطرح می‌شود که طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$(1) \quad \text{ضخامت اولیه} - \text{ضخامت نهایی} = \text{درصد نازک‌شدگی} \times \text{ضخامت اولیه}$$

در شکل ۱۲ نمودار درصد نازک‌شدگی در دماهای مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار با عرض ۲ میلی‌متر در فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان درصد نازک‌شدگی افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری و نرم‌شدن فلز در دماهای بالاتر و افزایش میزان کشیدگی موضعی می‌باشد که نتایج حاصل از نمودارهای توزیع ضخامت در دماهای مختلف را که در شکل ۱۰ بررسی شد، تأیید می‌کند. با دقت در مقادیر درصد نازک‌شدگی ورق و مقایسه آن با مقادیر متناظر در فرآیندهای دیگر مشخص می‌شود که درصد نازک‌شدگی در این فرآیند بسیار اندک و مطلوب می‌باشد.

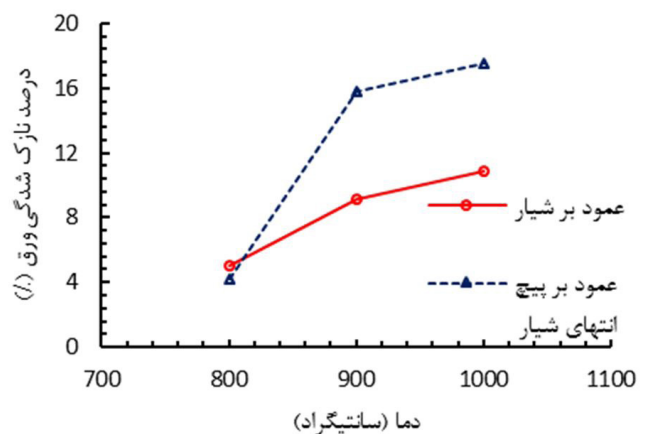


Fig. 12. Sheet thinning percentage in the sections perpendicular to the slot and perpendicular to the end turn of slot with width of 2 mm at 35 bar, 10 min and at different temperatures

شکل ۱۲: نمودار درصد نازک‌شدگی در دماهای مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار با عرض دو میلی‌متر در فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه

۳-۲- بررسی تأثیر فشار

به منظور بررسی تأثیر فشار بر توزیع ضخامت ورق با در نظر گرفتن مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر ضخامت ورق در نقاط مختلف در دمای ثابت دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با اعمال سطوح فشار ۱۵، ۲۵ و ۳۵ بار و زمان نگهداری ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شده که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار از ۲۵ بار تا ۳۵ بار تغییرات محسوسی در ضخامت ورق دیده می‌شود. در توضیح دلیل این اتفاق می‌توان به این مورد اشاره کرد که با توجه به اینکه تا فشار ۲۵ بار مکانیزم تغییر شکل غالب، کشش ورق بوده در حالی که با افزایش سطح

فشار مذکور در مدت‌زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به ورق اعمال شده‌اند، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان اعمال فشار شکل‌دهی میزان اختلاف توزیع ضخامت در نواحی مختلف، تغییر زیادی ندارد به طوری که در مدت‌زمان نگهداری ۲۰ و ۳۰ دقیقه تقریباً بر روی هم منطبق شده‌اند. با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مدت‌زمان نگهداری فشار اعمالی بیشتر از ۲۰ دقیقه تأثیر چندانی بر شکل‌دهی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نداشته است. در شکل ۱۷ نمودارهای پروفیل پرشدگی مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر تحت شرایط فرآیندی دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار که در آن‌ها فشار مذکور در مدت‌زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به ورق اعمال شده‌اند، نشان داده شده است. با مقایسه نمودارها می‌توان به این نکته پی برد که افزایش مدت‌زمان فرآیند در میزان پرشدگی شیار قالب تأثیر چندانی ندارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش مدت‌زمان فرآیند از ۱۰ دقیقه تا ۲۰ دقیقه موجب افزایش میزان پرشدگی اندکی می‌شود در حالی که افزایش این مقدار از ۲۰ تا ۳۰ دقیقه تقریباً تأثیری ندارد.

در شکل ۱۸ نمودار درصد نازک‌شدگی در زمان‌های مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار با عرض ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای توزیع ضخامت و پروفیل پرشدگی نیز مشاهده شد، عامل زمان تأثیر چندانی بر شکل‌گیری ورق نداشته و این تأثیر ناچیز در نمودار درصد نازک‌شدگی ورق نیز دیده می‌شود به طوری که نمودار درصد نازک‌شدگی با افزایش زمان نگهداری فشار اعمالی تقریباً ثابت و به صورت خط افقی در هر دو مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار درآمده است؛ بنابراین به‌عنوان یک نتیجه کلی از این بخش می‌توان گفت که فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

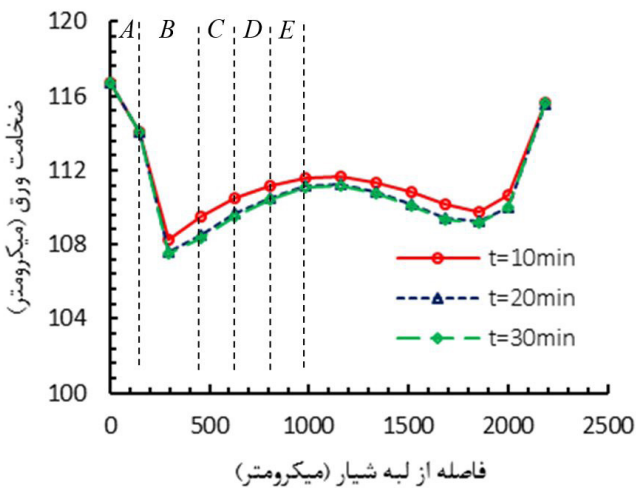


Fig. 16. Comparison of sheet thickness distribution in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 1000°C, 35 bar and at different periods of time

شکل ۱۶: مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار در زمان‌های مختلف

(۵/۰ میلی‌متر) مشاهده نمی‌شود. در حالی که در عرض‌های ۱/۵ و ۲ در شرایط فرآیندی مشابه تماس ورق با کف قالب رخ می‌دهد.

در شکل ۱۵ نمودار درصد نازک‌شدگی در فشارهای مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار با عرض ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش فشار در هر دو مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار موجب افزایش درصد نازک‌شدگی می‌شود اما این تأثیر در مقطع عمود بر پیچ انتهایی شیار بسیار ملموس‌تر می‌باشد. این اختلاف رفتار که در نمودارهای درصد نازک‌شدگی دیگر نیز مشاهده می‌شود به دلیل هندسه نامتقارن و همچنین تمرکز تنش در ناحیه پیچ انتهایی شیار می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در بررسی روند افزایش درصد نازک‌شدگی در مقطع عمود بر پیچ انتهایی شیار، نمودار دچار شکستگی شده است که این امر تأثیر دو مکانیزم مؤثر را که در بخش توزیع ضخامت عنوان شد، تأیید می‌کند.

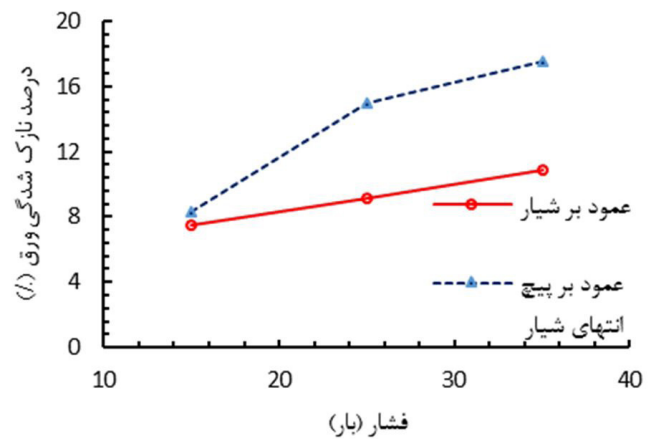


Fig. 15. Sheet thinning percentage in the sections perpendicular to the slot and perpendicular to the end turn of slot with width of 2 mm at 1000°C, 10 min and at different pressures

شکل ۱۵: نمودار درصد نازک‌شدگی در فشارهای مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهایی شیار با عرض ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰ دقیقه

۳-۳- بررسی تأثیر زمان

اهمیت بررسی عامل زمان در کیفیت شکل‌دهی صفحات دوقطبی از آن جهت می‌باشد که ممکن است در شرایط مشابه با اعمال دما و فشار یکسان، با تغییر مدت‌زمان اعمال فشار گاز تغییرات محسوسی در نحوه شکل‌پذیری ورق مشاهده شود که ناشی از تأثیر رخ دادن رفتار ویسکوپلاستیک (شبه خزشی) ورق بر میزان شکل‌پذیری آن می‌باشد. به همین منظور جهت بررسی تأثیر عامل زمان بر توزیع ضخامت ورق با اعمال شرایط یکسان هندسی و فرآیندی، تأثیر زمان اعمال فشار شکل‌دهی بر توزیع ضخامت در حالت‌های مختلف بررسی شد. در شکل ۱۶ نمودارهای توزیع ضخامت مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر تحت شرایط فرآیندی دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار که در آن‌ها

مقدار نازک‌شدگی که در ناحیه بحرانی رخ می‌دهد با افزایش عرض شیار، افزایش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش عرض شیار ضمن داشتن فضای کافی جهت فرورفتن ورق داخل شیار با شیب ملایم، مقدار فرورفتن ورق در داخل شیار بیشتر از بقیه بوده و لذا مقدار کاهش ضخامت نیز به همان نسبت بیشتر خواهد بود. در نتیجه در حالت کلی با وجود کاهش بیشتر ضخامت، چون به‌طور یکنواخت در تمام بخش‌ها کاهش یافته، افزایش عرض شیار به‌عنوان یک عامل مطلوب در توزیع مناسب ضخامت شناخته می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عرض شیار از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر نه تنها کاهش ضخامت و غیریکنواختی توزیع ضخامت بیشتر نشده بلکه کاهش نیز یافته است. در توجیه این رفتار ورق بایستی به این نکته اشاره کرد که با افزایش عرض شیار و رسیدن به مقدار ۱/۵ میلی‌متر ورق با کف شیار تماس پیدا می‌کند. تا لحظه تماس با توجه به اینکه تنها ناحیه اعمال اصطکاک بین ورق و قالب محل قرارگیری ورق روی قالب و لبه خارجی شیار بوده و لذا با افزایش فشار، نازک‌شدگی فقط در نواحی بحرانی بیشتر مشاهده شد درحالی‌که با ادامه روند و تماس ورق با کف شیار در این ناحیه نیز اصطکاک بین ورق و قالب ایجاد شده و کاهش ضخامت ورق دیگر فقط از یک ناحیه رخ نداده و موجب کاهش ضخامت در طول مسیر پروفیل ورق می‌شود. با مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت مشخص شد مطلوب‌ترین توزیع ضخامت با توجه به میزان پرشدگی شیار متعلق به شرایط فرآیندی دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۲۰ دقیقه در شیار با عرض ۲ میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به اینکه با افزایش عرض شیار، فضای در دسترس جهت شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد بدیهی است که با افزایش مقدار این پارامتر، میزان پرشدگی ورق افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲۰ که مربوط به پروفیل پرشدگی در شیار با عرض‌های مختلف در دمای ۱۰۰۰

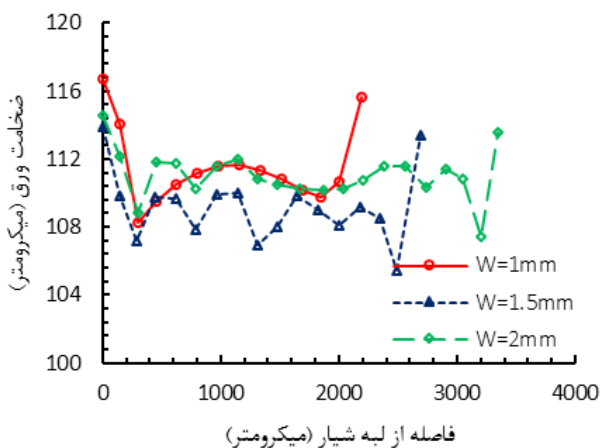


Fig. 19. Comparison of sheet thickness distribution diagrams of section perpendicular to the slot with different width at 1000°C, 35 bar and 10 min

شکل ۱۹: مقایسه نمودارهای توزیع ضخامت ورق مربوط به مقطع عمود بر شیارهای مختلف در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه

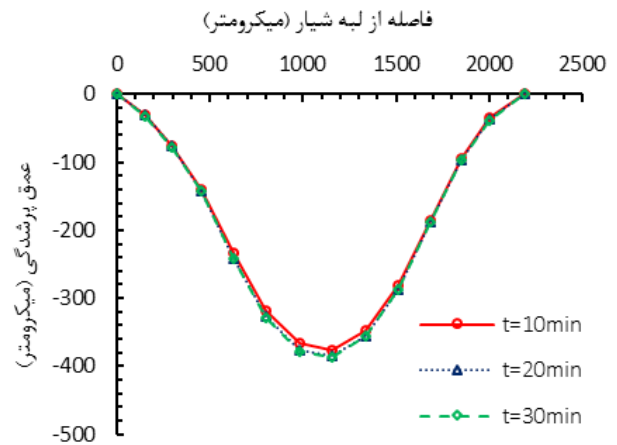


Fig. 17. Comparison of sheet filling profile in the section perpendicular to the slot with width of 1 mm at 1000°C, 35 bar and at different periods of time

شکل ۱۷: مقایسه نمودارهای پروفیل پرشدگی ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض ۱ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار در زمان‌های مختلف

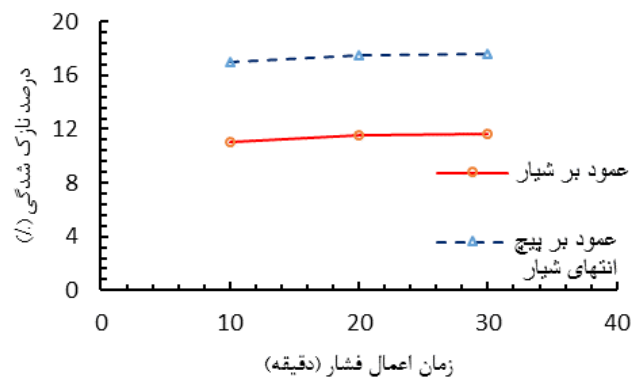


Fig. 18. Sheet thinning percentage in the sections perpendicular to the slot and perpendicular to the end turn of slot with width of 2 mm at 1000°C, 35 bar and at different periods of time

شکل ۱۸: نمودار درصد نازک‌شدگی در زمان‌های مختلف مربوط به مقطع عمود بر شیار و عمود بر پیچ انتهای شیار با عرض ۲ میلی‌متر در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۵ بار

طی انجام فرآیند شکل‌دهی با دمش گاز با اعمال شرایط فرآیندی مذکور رفتار ویسکوپلاستیک محسوسی از خود نشان نمی‌دهد.

۳-۴- بررسی تأثیر عرض شیار

با توجه به ضرورت بررسی عوامل هندسی شیار به بررسی تأثیر عرض شیار در میزان شکل‌پذیری ورق پرداخته شد. در شکل ۱۹ نمودار توزیع ضخامت مربوط به شیارهایی با عرض متفاوت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان نگه‌داری ۱۰ دقیقه آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض شیار، توزیع ضخامت ورق مطلوب‌تر می‌شود چون ورق جهت فرورفتن به داخل شیار به دلیل فضایی که در اختیار دارد با شیب ملایمی به داخل شیار فرو می‌رود درحالی‌که بیشترین

فاصله از لبه شیار (میکرومتر)

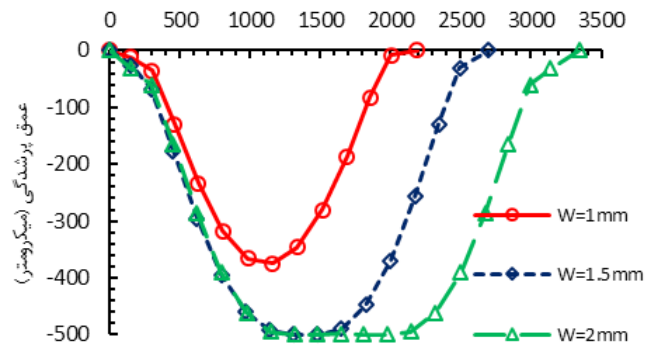


Fig. 20. Sheet filling profile in the section perpendicular to the slot with different width at 1000°C, 35 bar and 10 min

شکل ۲۰: نمودار پروفیل پرشدگی ورق مربوط به مقطع عمود بر شیار با عرض‌های مختلف میلی‌متر، دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه

درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه می‌باشد، مشاهده می‌شود با افزایش عرض شیار، علاوه بر اینکه میزان پرشدگی ورق نسبت به حالت‌هایی با عرض شیار کمتر، افزایش می‌یابد بلکه مقدار درصد پرشدگی شیار نیز بیشتر می‌شود. به منظور قضاوت نهایی در مورد مناسب بودن افزایش عرض شیار و تعیین محدوده مجاز بایستی به عامل نسبت عمق شیار به عرض شیار یا همان ضریب ظاهر (h/w) توجه داشت. با توجه به اینکه با افزایش مقدار عرض شیار این نسبت کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه جهت کارایی مناسب ورق در مجموعه پیل سوختی، محدوده مشخصی از این نسبت به‌عنوان محدوده مجاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین افزایش عرض شیار به شرط رعایت محدوده مجاز مناسب است. در شکل ۲۱ درصد پرشدگی ورق در این سه شیار در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه آورده شده است.

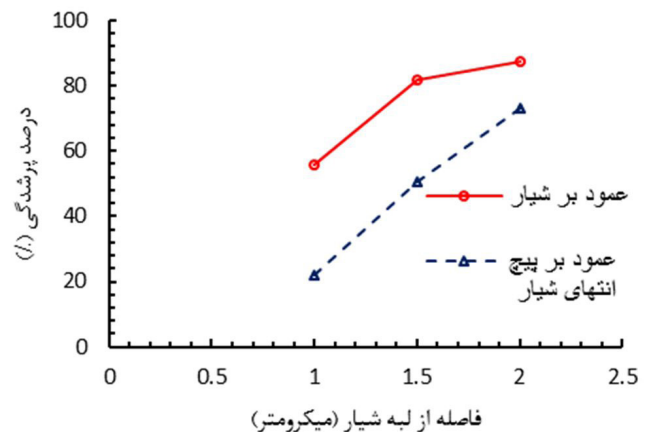


Fig. 21. Sheet filling percentage diagrams of three slots at 1000°C, 35 bar and 10 min

شکل ۲۱: درصد پرشدگی ورق در سه شیار مختلف در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان پرشدگی ورق در هر دو مقطع با افزایش عرض شیار افزایش یافته است. این افزایش در مقطع عمود بر شیار بیشتر از مقطع عمود بر پیچ انتهایی شیار بوده است. در شکل ۲۲ نمودار درصد نازک‌شدگی در شیارهای با عرض مختلف در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میزان درصد نازک‌شدگی با افزایش عرض شیار افزایش می‌یابد چون با افزایش عرض شیار فضای لازم جهت شکل‌گیری ورق افزایش یافته در نتیجه با افزایش میزان کشیدگی ورق، بالتبع میزان درصد نازک‌شدگی نیز افزایش می‌یابد. پس از بررسی درصد نازک‌شدگی تمامی نمونه‌ها مشخص شد که بیشترین درصد نازک‌شدگی با مقدار ۱۸٪ مربوط به ورق شکل گرفته در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴۰ بار، زمان ۳۰ دقیقه و شیار با عرض ۲ میلی‌متر می‌باشد.

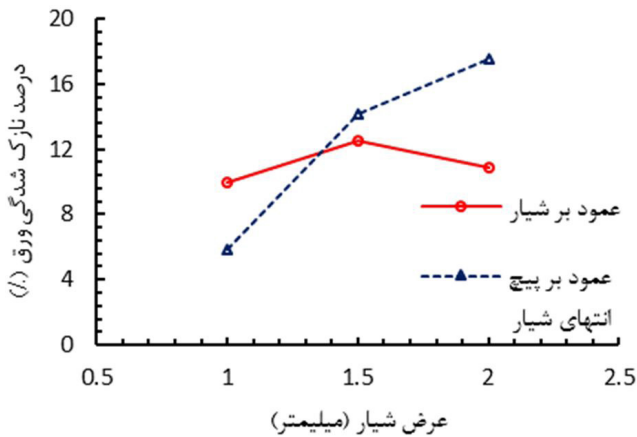


Fig. 22. Sheet thinning percentage diagrams of three slots at 1000°C, 35 bar and 10 min

شکل ۲۲: درصد نازک‌شدگی ورق با عرض‌های مختلف در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۳۵ بار و زمان ۱۰ دقیقه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌دهی صفحات دوقطبی پیل سوختی با شیار مارپیچ در قالب محذب به کمک فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز روی ورق فولاد زنگ‌نزن با ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. به منظور دستیابی به یک روند کلی مطلوب جهت شکل‌دهی این صفحات، تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و فرآیندی توسط ایجاد سه شیار با هندسه‌های متفاوت و همچنین اعمال شرایط فرآیندی مختلف در جریان شکل‌دهی این صفحات مورد مطالعه و نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده به‌طور خلاصه به‌قرار زیر است:

۱. با مقایسه نمودار پروفیل پرشدگی نمونه‌های مختلف مشخص شد عامل دما بیشترین تأثیر را در میزان شکل‌گیری ورق در ساخت صفحات دوقطبی دارد.
۲. همچنین با توجه به نمودارهای توزیع ضخامت مشخص شد

- (2008) 223-230.
- [8] Y. Liu, L. Hua, Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming, *Journal of Power Sources*, 195(11) (2010) 3529-3535.
- [9] S.-W. Choi, S.H. Park, H.-S. Jeong, J. Cho, S. Park, M.Y. Ha, Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process, *Journal of mechanical science and technology*, 26(8) (2012) 2397-2403.
- [10] T.-C. Chen, J.-M. Ye, Analysis of Stainless Steel Bipolar Plates Micro-Stamping Processes, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012) 121-126.
- [11] L. Ravi Narayan, *Forming of Ferritic Stainless Steel Bipolar Plates*, (2012).
- [12] M. B. Owsia, S. J. Hosseini-pour, M. B. Jooybari, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2014) 150-158. [In Persian]
- [13] N. Mohammadtabar, M. B. Jooybari, S. J. Hosseini-pour, A.H. Gorji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, 14(8) (2014) 17-27. [In Persian]
- [14] S. Mahabunphachai, M. Koç, Fabrication of micro-channel arrays on thin metallic sheet using internal fluid pressure: Investigations on size effects and development of design guidelines, *Journal of Power Sources*, 175(1) (2008) 363-371.
- [15] Y. Liu, L. Hua, J. Lan, X. Wei, Studies of the deformation styles of the rubber-pad forming process used for manufacturing metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 195(24) (2010) 8177-8184.
- [16] L. Peng, P. Hu, X. Lai, J. Ni, Fabrication of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell by flexible forming process-numerical simulations and experiments, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 7(3) (2010) 031009.
- [17] Z.-b. HE, X.-b. FAN, F. SHAO, K.-l. ZHENG, Z.-b. WANG, S.-j. YUAN, Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal gas forming at elevated temperature, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (2012) s364-s369.
- [18] M. S. Zoei, M. Farzin, A.H. Mohammadi, Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminium alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2014) 150-158. [In Persian]
- ناحیه‌ای از مقطع برش خورده ورق که در تماس با لبه خارجی اینزرت است، ناحیه بحرانی در شکل‌دهی این صفحات می‌باشد.
۳. در تحلیل عوامل مؤثر بر نازک‌شدگی ورق مشخص شد با افزایش عرض شیار میزان نازک‌شدگی افزایش می‌یابد. فشار و زمان اثرات یکسانی روی مقدار نازک‌شدگی داشته به‌گونه‌ای که با افزایش آن‌ها موجب افزایش درصد نازک‌شدگی ورق می‌شود.
۴. عامل زمان تأثیر کمتری نسبت به عوامل فشار، دما و پارامترهای هندسی بر میزان شکل‌پذیری و الگوی توزیع ضخامت داشته است.
۵. با مشاهده درصد پرشدگی قالب در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها دیده شد که با افزایش دما از ۹۰۰ به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد درصد پرشدگی حدود ۲ برابر و از ۸۰۰ به ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد این مقدار ۵ برابر شد. بیشترین درصد پرشدگی شیار قالب با مقدار ۸۸/۸٪ متعلق به شیار با عرض ۲ میلی‌متر تحت دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴۰ بار و زمان ۳۰ دقیقه بود.

منابع

- [1] X. Li, I. Sabir, Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4) (2005) 359-371.
- [2] J.-C. Hung, T.-C. Yang, K.-c. Li, Studies on the fabrication of metallic bipolar plates—Using micro electrical discharge machining milling, *Journal of Power Sources*, 196(4) (2011) 2070-2074.
- [3] C. -K. Jin, C. -G. Kang, Fabrication process analysis and experimental verification for aluminum bipolar plates in fuel cells by vacuum die-casting, *Journal of Power Sources*, 196(20) (2011) 8241-8249.
- [4] Y.-M. Lee, S.-J. Lee, C.-Y. Lee, D.-Y. Chang, The multiphysics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process, *Journal of Power Sources*, 193(1) (2009) 227-232.
- [5] S.-J. Lee, C.-Y. Lee, K.-T. Yang, F.-H. Kuan, P.-H. Lai, Simulation and fabrication of micro-scaled flow channels for metallic bipolar plates by the electrochemical micro-machining process, *Journal of Power Sources*, 185(2) (2008) 1115-1121.
- [6] S. Mahabunphachai, Ö.N. Cora, M. Koç, Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 195(16) (2010) 5269-5277.
- [7] L. Peng, X. Lai, D.a. Liu, P. Hu, J. Ni, Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 178(1)

of gas forming, in: *National Conference of Mechanical Engineering*, Malayer, Iran, 2013. [In Persian]

Engineering, 11(2) (2011) 49-56. [In Persian]
[19] S. Esmaili, S.J. Hosseinipour, A.S. Sarband, Simulation and manufacturing of fuel cell bipolar plates with method

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

B. Aghajanloo, J. Hosseinipour, H. Jamshidi Aval, Fabrication of Bipolar Plates of the Fuel Cell from Stainless Steel 304 by Hot Metal Gas Forming Process, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 589-600.
DOI: 10.22060/mej.2017.11597.5135



