



مطالعات ریزساختاری و خواص مکانیکی فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های آلایژی منیزیم AZ31B و آلومینیم AA 2024 در دماهای بالا

فaramرز فرشته‌صنیعی¹، سعید یعقوبی^{2*}، صادق قربانحسینی³

1- استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- دانش آموخته دکتری، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- دانش آموخته دکتری، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان، کد پستی 38695-65178، s.yaghoubi92@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هیدروفرمینگ یکی از جدیدترین روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی به‌شمار رفته که در دو دهه اخیر به‌طور گسترده‌ای در صنعت مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، فرآیند هیدروفرمینگ ورق دو آلایژ سبک آلومینیم 2024 و منیزیم AZ31B در دماهای بالا به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی کیفیت نمونه‌های تولید شده، کرنش ضخامت به‌وجود آمده در نمونه‌های تغییر شکل یافته مطالعه گردیده است. در ادامه و با استفاده از سختی و تصاویر ریز ساختار به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ارتباط بین نحوه توزیع کرنش ضخامت با اندازه دانه و میزان سختی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به‌منظور تأیید مقادیر تجربی به‌دست آمده، تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی انجام گردید. نتایج پژوهش نشان داد که دمای مناسب جهت فرآیند شکل‌دهی نمونه‌های آلومینیمی و منیزیمی به‌ترتیب 250°C و 200°C می‌باشد. بیشترین میزان کشیدگی و در نتیجه کرنش پلاستیک (به‌دلیل خمش و کشش همزمان) در ناحیه دیواره قطعه‌کار اتفاق افتاده و با وجود اصطکاک تماسی بین ورق و ماتریس در ناحیه فلنج، میزان کرنش ناحیه مزبور افزایش پیدا کرد. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده، بیشترین میزان افزایش سختی و کاهش اندازه دانه برای نمونه آلومینیمی به‌ترتیب 37% و 20% و برای نمونه منیزیمی به‌ترتیب 24% و 42% در ناحیه دیواره نسبت به کف محصول به‌دست آمدند.

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 مهر 1400

داوری اولیه: 3 آذر 1400

پذیرش: 5 دی 1400

کلیدواژگان:

هیدروفرمینگ ورق

کرنش ضخامت

کرنش پلاستیک

Al 2024

AZ31B

Microstructural Studies and Mechanical Properties of Hydroforming Process of AZ31B Magnesium and AA 2024 Aluminum Alloy Sheets at Elevated Temperatures

Faramarz Fereshteh-Saniee, Saeed Yaghoubi*, Sadegh Ghorbanhosseini

Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

* P.O.B. 65178-38695 Hamedan, Iran, s.yaghoubi92@basu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 October 2021

First Decision: 24 November 2021

Accepted: 26 December 2021

Keywords:

Sheet hydroforming

Thickness strain

Plastic strain

Al 2024

AZ31B

Abstract

Hydroforming is one of the newest sheet metal forming methods that has been widely considered in the industry in the last two decades. In the present research work, the sheet hydroforming process of 2024 aluminum and AZ31B magnesium light-alloys at elevated temperatures has been studied experimentally. In order to evaluate the quality of the produced specimens, the thickness strain created in the cups has been investigated. Then, the relationship between thickness strain distributions with the grain size was discussed using hardness test and Microstructural images obtained from scanning electron microscopy (SEM). In order to confirm the gained numerical values, the repeatability of experimental results was performed. The outcomes demonstrated that the suitable temperatures for the hydroforming process of 2024 Al alloy and AZ31B Mg alloy respectively gained to be 250°C and 200°C . The maximum amount of elongation and plastic strain (due to simultaneous bending and stretching) occurred in the wall of the cup and despite the friction of contact between the sheet and the matrix in the flange region, the amount of strain in this area increased. According to the results of the current study, the maximum increase in hardness and decrease in grain size were obtained 37% and 20% for AA 2024 and 24% and 42% for AZ31B, respectively, in the wall area in comparison with the bottom of the product.

1- مقدمه

فلزات، به‌دلیل تولید قطعاتی با خواص مکانیکی عالی و کمترین اتلاف ماده، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف همچون خودروسازی، ماشین‌آلات صنعتی و موارد مشابه دارند [1]. هدف اصلی در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، ایجاد تغییر شکل مطلوب

روش‌های تولید و توسعه آن‌ها، از زمینه‌هایی است که همواره در طی دوره‌های مختلف زندگی بشری، از اهمیت بالایی برخوردار است. در بین روش‌های مختلف تولید، فرآیندهای شکل‌دهی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Fereshteh-Saniee, S. Yaghoubi, S. Ghorbanhosseini, Microstructural Studies and Mechanical Properties of Hydroforming Process of AZ31B Magnesium and AA 2024 Aluminum Alloy Sheets at Elevated Temperatures, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 10, pp. 39- 48, 2022 (in Persian)

سه نقطه‌ای و آزمایش اریکسون⁴ به‌دست آمدند. مردندی و همکاران [9]، آزمایش تحذب در ورق‌های دو لایه از جنس آلومینیم-مس را به‌صورت تجربی، تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان‌دهنده همپوشانی قابل قبول یافته‌های تحلیلی و عددی با مقادیر آزمایشگاهی بود. یعقوبی و فرشته‌صنعی [10، 11]، تأثیر پارامترهای هندسی و آزمایشگاهی شکل‌دهی بهینه شده با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و زنبورعسل در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی را مورد مطالعه قرار دادند. در این دو پژوهش، با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مقادیر متغیرهای طراحی به‌گونه‌ای تعیین گردید که یکنواختی محصول نهایی افزایش و بیشینه درصد نازک شدگی⁵ محصول نهایی کاهش یافت. راجا ساتیش⁶ و همکاران [12]، شکل‌پذیری ورق از جنس آلایژ آلومینیم 6061 در دمای بالا را بررسی نمودند. هدف از تحقیق ایشان، بررسی دی‌گرام حد شکل‌دهی⁷ در اثر تغییر پارامترهایی نظیر سرعت سنبه و دمای انجام فرآیند بود. عبدالغفار⁸ و همکاران [13]، میزان عدم انطباق سنبه-ماتریس به‌منظور تولید نمونه‌های مربعی شکل در فرآیند کشش عمیق را به‌صورت تجربی و عددی پیش‌بینی نمودند. هدف از تحقیق ایشان، بررسی تأثیر پارامتر مزبور بر میزان نیروی شکل‌دهی و توزیع ضخامت در محصول نهایی بود. وانگ⁹ و همکاران [14]، روش نوین کشش عمیق هیدرومکانیکی با استفاده از محفظه قالب ثابت و متحرک ترکیب شده را ارائه دادند. نتایج تحقیق ایشان بهبود میزان چروکیدگی در نمونه‌های مخروطی با عمق کشش بالا را نشان داد.

آلیاژهای سبک همچون آلومینیم و منیزیم، به‌دلیل برخورداری از نسبت استحکام به وزن خوب و مقاومت به خوردگی بالا (برای آلومینیم)، جایگزین خوبی برای فولاد در صنایع مختلف (به‌خصوص صنعت خودروسازی) به‌شمار می‌آیند. عیب اصلی این آلیاژها، چقرمگی کم و شکل‌پذیری پایین آن‌ها در دمای اتاق است. در این پژوهش، برای رفع این مشکل و کاهش استحکام تسلیم ورق و در نتیجه کاهش نیروی شکل‌دهی، فرآیند هیدروفرمینگ ورق از جنس آلایژ آلومینیم 2024 و آلایژ منیزیم AZ31B در دمای بالا انجام شده است. به‌منظور بررسی نواحی حساس قطعه‌کار در فرآیند شکل‌دهی

در ماده خام اولیه (با هندسه نسبتاً ساده)، به یک محصول با شکل نسبتاً پیچیده طی یک یا چند مرحله عملیات شکل‌دهی می‌باشد [2]. ورق‌های فلزی از رایج‌ترین مواد خام استفاده شده در صنعت می‌باشند. یکی از جدیدترین روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی، هیدروفرمینگ است [3]. درحقیقت این روش، فرآیند کشش عمیق به‌کمک فشار سیال است که به‌دلیل مزایای متعدد آن، عمدتاً نسبت به فرآیند کشش عمیق معمولی برتری دارد. فرآیند هیدروفرمینگ ورق شبیه فرآیند متداول کشش عمیق ورق بوده که در آن، قطعه‌کار توسط ورق‌گیر بر روی قالب گرفته شده و سنبه، قطعه مورد نظر را به درون قالب می‌کشانند. اختلاف عمده روش هیدروفرمینگ ورق نسبت به فرآیند مرسوم کشش ورق آن است که در این روش، علاوه بر سنبه، از یک سیال استفاده می‌شود. در شکل‌دهی ورق به‌روش هیدروفرمینگ، به‌سبب این‌که فشار سیال در همه جا یکنواخت است، ضخامت ورق حاصل از این روش نیز در همه جای آن تقریباً یکنواخت‌تر از نمونه به‌دست آمده از روش کشش عمیق خواهد بود. شکل‌دهی قطعات پیچیده، دقت ابعادی بالاتر به‌دلیل کاهش بازگشت فنری، صافی سطح مطلوب و عدم نیاز به قالب پیچیده، یکنواختی ضخامت بسیار مناسب، کشش قطعات پیچیده در یک مرحله، عمق کشش بیشتر به‌همراه توزیع مناسب کرنش و در نتیجه کاهش هزینه از مزایای این روش نسبت به فرآیند کشش عمیق است [4]. فرآیند هیدروفرمینگ دارای انواع مختلفی است که یکی از آن‌ها، روش کشش عمیق هیدرومکانیکی¹ با فشار شعاعی بوده و در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است [5]. فشار شعاعی در محیط قطعه، باعث جریان آسان‌تر ورق به داخل محفظه قالب و در نتیجه افزایش نسبت کشش و کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود [6].

دما، یکی از مهمترین عوامل مؤثر در شکل‌دهی فلزات است. استفاده از عملیات گرم در فرآیند شکل‌دهی، موجب افزایش نسبت کشش حدی² و توزیع ضخامت بهتر می‌شود [7]. گرچه تحقیقات مربوط به فرآیند هیدروفرمینگ گرم از سال 1997 آغاز شد، ولی به‌دلیل دشواری‌های عملی، پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام نشده است. دن‌گیز³ و همکاران [8]، محدودیت‌های فرآیند کشش عمیق ورق‌های فلزی گنبدی شکل را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. در تحقیق ایشان، خواص سختی و محدودیت‌های فرآیند کشش عمیق ورق فولادی زنگ نزن به‌صورت تجربی و با استفاده از آزمایش خمش

⁴ Ericson test⁵ Maximum thickness reduction⁶ Raja Satish⁷ Forming Limit Diagram (FLD)⁸ Abdul Ghafar⁹ Wang¹ Hydro-Mechanical Deep Drawing (HMDD)² Limit Drawing Ratio (LDR)³ Dengiz

کشش عمیق هیدرومکانیکی پژوهش حاضر هم فشار سیال و هم دمای فرآیند بالا می‌باشند، آب بند مورد استفاده باید توانایی تحمل هر دو پارامتر به‌صورت همزمان را داشته باشد. در ناحیه بین ماتریس و ورق‌گیر، تماس بین دو سطح فلزی برقرار است و آب بند استفاده شده در این ناحیه دارای نام تجاری وایتون² بوده که برندی از FKM می‌باشد. این آب بند که توانایی تحمل فشار سیال و دمای بالایی دارد، تحت عنوان ASTM D1418 و ISO1629 FKM تقسیم و طبقه‌بندی می‌شود [16].

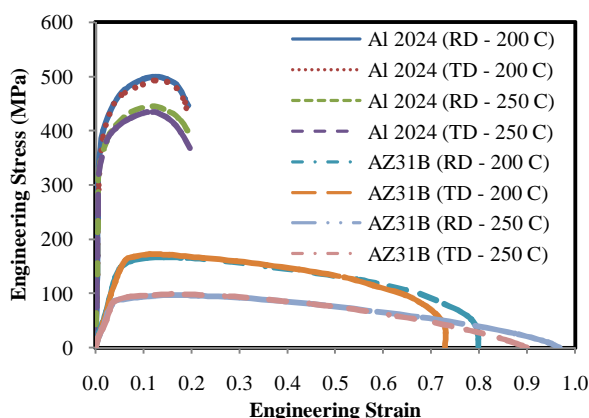


Fig. 1 Engineering stress-strain diagram of alloys used in the present study

شکل 1 نمودار تنش-کرنش مهندسی آلایژی‌های به‌کار رفته در پژوهش حاضر



Fig. 2 A view of sheet hydroforming die set

شکل 2 نمایی از مجموعه قالب آزمایش هیدروفرمینگ ورق

به‌منظور جلوگیری از نشت سیال در ناحیه بین سنبه و ورق‌گیر، از سنبه با مغزی فولادی از جنس CK45 و روکش کروم به ضخامت 20 میکرون استفاده شده و در نتیجه حرکت

ورق‌های فلزی و تأثیر دمای فرآیند بر آن، میزان کرنش ضخامتی در دماهای بالا برای هر دو ورق آلایژی اندازه‌گیری شده است. در ادامه و با استفاده از آزمایش سختی و محاسبه ابعاد دانه (استخراج شده از تصاویر ریز ساختار) و همچنین بیان روابط ریاضی بین پارامترها، نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تمایز عمده پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین در انتخاب نوع آلایژی‌های استفاده شده و همچنین به‌کارگیری تحلیل‌های متالورژیکی به‌منظور بررسی میزان شکل‌پذیری در نواحی مختلف از سطح مقطع نمونه‌های تولید شده است.

2- مراحل آزمایشگاهی

در شکل 1، منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی مربوط به مواد آلایژی به‌کار گرفته شده در این تحقیق آورده شده است. آزمون کشش گرم با استفاده از دستگاه سنتام 50 کیلو نیوتن (STM-50) انجام شده و ابعاد نمونه‌های آزمایش کشش بر اساس مرجع [15] در نظر گرفته شده است. نمودارهای به‌دست آمده برای نمونه‌های برش خورده در راستای نورد و عمود بر آن (در هر حالت) به‌ازای هر دو ماده دارای تفاوت قابل توجهی نمی‌باشند. به‌همین منظور، دو ورق آلایژی آلومینیم 2024 (با ضخامت 2 میلی‌متر) و منیزیم AZ31B (با ضخامت 1/9 میلی‌متر) با تقریب قابل قبولی به‌صورت همسان‌گرد در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نمودارهای موجود در شکل 1، با افزایش دما، به‌دلیل پایین آمدن استحکام و جریان بهتر مواد، تنش سیلان کم و میزان ازدیاد طول افزایش می‌یابد.

در شکل 2، نمایی از مجموعه قالب آزمایش آورده شده است. مجموعه آزمایشگاهی فرآیند شکل‌دهی نشان داده شده شامل دو بخش مکانیکی و هیدرولیکی می‌باشد. بخش مکانیکی قالب از ماتریس، ورق‌گیر و سنبه تشکیل شده که در هنگام انجام فرآیند شکل‌دهی، ورق‌گیر و ماتریس به‌هم پیچ شده و با حرکت سنبه توسط پرس هیدرولیکی به‌سمت محفظه توخالی درون ماتریس، ورق دایره‌ای اولیه (بلانک¹) شکل داده می‌شود. در قالب طراحی شده، مقادیر قطر داخلی ماتریس، قطر سنبه و قطر بلانک‌ها به‌ترتیب برابر 44/4 میلی‌متر، 40 میلی‌متر و 70 میلی‌متر می‌باشند. به‌منظور سهولت در فرآیند شکل‌دهی، میزان لقی بین ورق و ورق‌گیر برابر 0/25 میلی‌متر و شعاع‌های نوک سنبه و دهانه ورودی ماتریس به‌ترتیب 7/50 میلی‌متر و 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به آن‌که در فرآیند

² Viton

¹ Blank

که t_0 و t_f به ترتیب ضخامت اولیه و میزان ضخامت ورق در نقطه مورد نظر در انتهای فرآیند می‌باشند. محصول نهایی به دست آمده از یک فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی باید دارای کیفیت مطلوبی باشد. به همین منظور، افزایش و یا کاهش بیش از حد کرنش ضخامتی در نمونه ورقی تولید شده موجب کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود.

3-1- تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی

به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌های عملی، فرآیند شکل‌دهی چهار مورد از نمونه‌ها با شرایط آزمایشگاهی مشخص تکرار شدند. نتایج به دست آمده از تکرار آزمایش‌ها برای دو ورق آلومینیومی و منیزیمی در جدول 1 آورده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول مزبور برای پارامتر بیشینه کرنش ضخامتی به ازای عمق کشش 22 میلی‌متر در نمونه‌های تولید شده، دقت قابل قبول یافته‌های تجربی و تکرارپذیری آزمایش‌ها را تأیید می‌نماید.

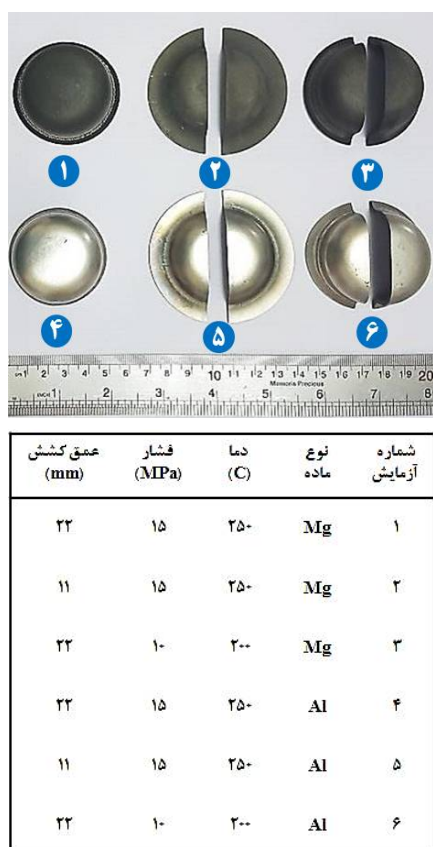


Fig. 3 Experimental products obtained from the sheet hydroforming process

شکل 3 نمونه‌های آزمایشگاهی به دست آمده از فرآیند هیدروفرمینگ ورق

متغیرهای فرآیند تأثیرات متفاوتی بر نواحی مختلف محصول تولید شده دارد. به همین منظور، سطح مقطع برش خورده نمونه

سنبه در داخل فضای ورق‌گیر به صورت جذب و روان صورت گرفت. همچنین، در این مسیر نشت سیال، از دو آب بند وایتون و ان. بی. آر^۱ به صورت متوالی استفاده گردیده و جانمایی آن‌ها در لبه داخلی ورق‌گیر و حد فاصل بین آن‌ها در نظر گرفته شد. بخش دیگر مجموعه قالب شامل مدار هیدرولیکی است. به منظور تأمین فشار سیال در سطح زیرین ورق، از یک دستگاه پمپ دستی انریک^۲ استفاده شده که قابلیت ایجاد فشار تا میزان 280 مگا پاسکال را دارد. مدار هیدرولیکی طراحی شده جهت اعمال فشار مزبور شامل شیر اطمینان^۳، شیر یک‌طرفه^۴ و فشارسنج^۵ است. روند اعمال فشار به گونه‌ای است که قبل از حرکت سنبه و انجام فرآیند، پمپ فشار محفوظه را به یک میزان اولیه می‌رساند. با حرکت سنبه به سمت داخل محفوظه قالب، سیال روغن فشرده شده و پس از رسیدن به میزان بیشینه مد نظر (در این پژوهش 10 مگاپاسکال و 15 مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌اند)، شیر اطمینان باز شده و مازاد فشار اعمال شده تخلیه می‌گردد. به منظور انجام آزمایش‌های عملی در این تحقیق، از دستگاه پرس هیدرولیکی 80 تن استفاده شده است [17]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، شکل‌دهی ورق‌های آلایژی سبک همانند آلایژهای آلومینیم و منیزیمی، به دلیل تردی آن‌ها در دمای محیط امکان‌پذیر نمی‌باشد. بدین منظور، معمولاً فرآیند شکل‌دهی این نوع آلایژها در دمای بالا صورت می‌گیرد. در مجموعه قالب تحقیق حاضر، تعدادی گرمکن الکتریکی با توان 500 وات به صورت متقارن و در زیر قالب جهت گرم کردن مجموعه و در نتیجه سهولت در فرآیند شکل‌پذیری به کار گرفته شده‌اند.

3- نتایج و بحث

نمونه‌های تولید شده از دو آلایژ آلومینیم 2024 و منیزیم AZ31B در دماهای 200 و 250 درجه سانتی‌گراد در شکل 3 نشان داده شده است. یکی از پارامترهای به کار گرفته شده جهت بررسی کیفیت نمونه نهایی تغییر شکل یافته، کرنش ضخامتی بوده که منظور از آن، میزان تغییرات ضخامت نسبت به ضخامت اولیه در هر نقطه از سطح مقطع قطعه کار می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر از رابطه (1) استفاده می‌شود:

$$\varepsilon_{th} = \frac{t_f - t_0}{t_0} \quad (1)$$

¹ N.B.R

² Enerpac

³ Safety valve

⁴ Check valve

⁵ Pressure gauge

ماتریس) به صورت هم‌زمان قرار می‌گیرد، افزایش میزان کرنش ضخامتی در ناحیه مزبور منطقی به نظر می‌رسد. در یک نمونه ورقی تغییر شکل داده شده، افزایش میزان نازک‌شدگی و کاهش میزان یکنواختی موجب افزایش میزان ناهمسان‌گردی صفحه‌ای می‌شود. در این پژوهش، افزایش دما باعث به وجود آمدن رفتار متفاوتی از نحوه شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیومی و منیزیمی شده است. با افزایش دما در نمونه منیزیمی، رسوبات در فاز زمینه حل شده و موجب می‌شود که دانه‌ها در یک امتداد خاص جهت‌گیری کنند که این عامل موجب افزایش ناهمسان‌گردی می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش دما در نمونه آلومینیومی، رسوبات Al_2Cu موجود در فاز زمینه از جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها جلوگیری نموده و این عامل موجب کاهش میزان ناهمسان‌گردی می‌شود. به همین دلیل، رفتار دو آلیاژ در دماهای انجام فرآیند قابل توجه است. در پژوهش‌های پیشین [18]، کاهش نیروی شکل‌دهی و افزایش قابلیت شکل‌پذیری قطعه‌کار در اثر افزایش دما مورد توجه قرار گرفته و یکنواختی محصول تولید شده کمتر بررسی شده است. به همین دلیل و در تحقیق حاضر، بررسی فرآیند شکل‌دهی به روش کشش عمیق هیدرومکانیکی آلیاژهای آلومینیوم 2024 و منیزیم AZ31B در دماهای 200 و 250 درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

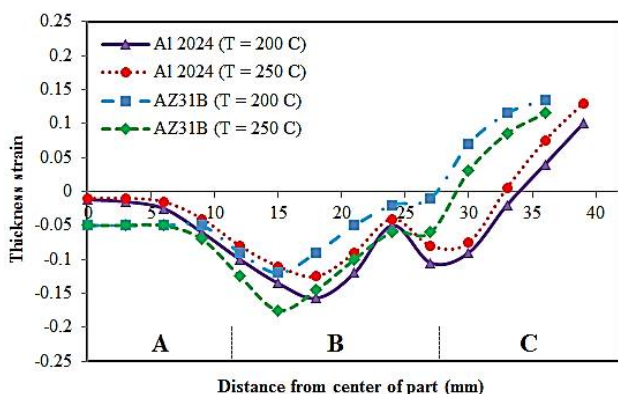


Fig. 4 Diagram of thickness strain distribution in terms of distance from the center of the workpiece

شکل 4 نمودار توزیع کرنش ضخامتی بر حسب فاصله از مرکز قطعه‌کار

3-3- مطالعات ریزساختار

برای به دست آوردن اثر فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی تحت شرایط مختلف محیطی بر تغییرات ریزساختار ماده اولیه، تحلیل متالوگرافی انجام گردید. یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک نمونه شکل داده شده در فرآیند شکل‌دهی ورقی، ضخامت مقطع آن است. به همین منظور و در این پژوهش، تحلیل متالوگرافی بر روی این ناحیه صورت گرفته است.

تغییر شکل یافته به سه ناحیه کف نمونه (A)، ناحیه در تماس با گوشه سنبه (B) و در نهایت دیواره نمونه (C) تقسیم‌بندی شده است.

جدول 1 تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی فرآیند هیدروفرمینگ

نوع آلیاژ	شماره آزمایش	بیشینه فشار سیال (MPa)	دما (°C)	کرنش ضخامتی بیشینه
Al 2024	1	15	250	0/132
	2 (تکرار)	15	250	0/125
	3	10	200	0/189
	4 (تکرار)	10	200	0/194
AZ31B	1	15	250	0/142
	2 (تکرار)	15	250	0/139
	3	10	200	0/164
	4 (تکرار)	10	200	0/160

3-2- توزیع کرنش ضخامتی

در شکل 4، نمودار توزیع کرنش ضخامتی بر حسب فاصله از مرکز قطعه‌کار برای ورق‌های آلایژی موجود در پژوهش حاضر آورده شده است. در این نمودارها، فشار بیشینه سیال و عمق کشش برای نمونه‌های تولید شده به ترتیب برابر 15 مگا پاسکال و 22 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نمودارهای موجود در شکل مزبور بیان کننده آن است که بیشترین میزان کرنش ضخامتی در نواحی B و C ایجاد شده و بسته به دمای فرآیند و جنس قطعه‌کار، میزان کرنش ضخامتی بیشینه (مثبت یا منفی) تعیین می‌گردد. با افزایش دمای فرآیند شکل‌دهی، مواد نرم‌تر شده و قابلیت شکل‌پذیری بالایی پیدا می‌کنند. از طرفی، افزایش بیش از حد دمای فرآیند باعث افزایش مصرف انرژی و کاهش رفتار کرنش‌سختی در ماده شده و به همین دلیل، بیشینه کرنش ضخامتی در محصول تولید شده افزایش یافته و حتی می‌تواند منجر به پارگی محصول شود. مطابق با نمودارهای موجود در شکل 4، افزایش دما بر روی ناحیه کف محصول تقریباً بی‌تأثیر است. دلیل این امر، افزایش میزان اصطکاک بین سنبه و ورق و کاهش تغییر شکل ناحیه مزبور در اثر چسبندگی به وجود آمده می‌باشد. نرم شدن ماده در دمای بالاتر (کاهش تنش سیلان)، افزایش قابلیت کشش در دیواره فنجان و تماس ناحیه لبه سنبه با گوشه نمونه تغییر شکل یافته باعث شده که با افزایش دما، بیشینه کرنش ضخامتی در این ناحیه از محصول نهایی افزایش قابل توجهی یابد. از آنجایی‌که در ناحیه دیواره، ورق تحت کشش (به واسطه حرکت سنبه) و خمش (در اثر تماس با دهانه

نمونه‌های تولید شده جهت انجام آزمایش سختی به ترتیب برابر 15 مگا پاسکال، 250 درجه سانتی‌گراد و 22 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند.

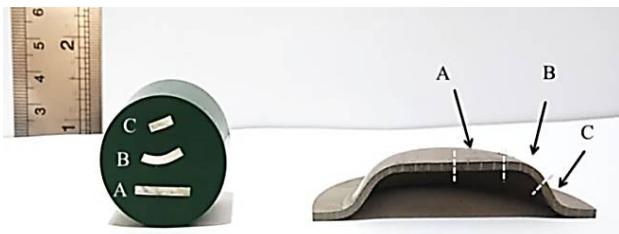


Fig. 5 A view of the cut and divided cross section of a sample in different areas for metallography

شکل 5 نمایی از مقطع برش خورده و تقسیم شده یک نمونه به نواحی مختلف جهت انجام متالوگرافی

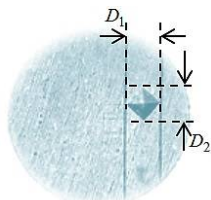


Fig.6 A view of the location of hardness effect on the workpiece surface

شکل 6 نمایی از محل اثر سختی به وجود آمده بر روی سطح قطعه کار

جدول 2 محدوده مقادیر به دست آمده برای ابعاد اثر سختی ایجاد شده در نواحی مختلف از سطح مقطع قطعه کار

Table 2 The range of values obtained for the dimensions of the hardness effect created in different areas of the cross section of the workpiece

میزان D_2	میزان D_1	ناحیه
33/00 – 34/50	35/50 - 37/00	A
33/00 – 34/00	34/50 – 36/50	B
32/50 – 33/50	33/00 – 34/50	C

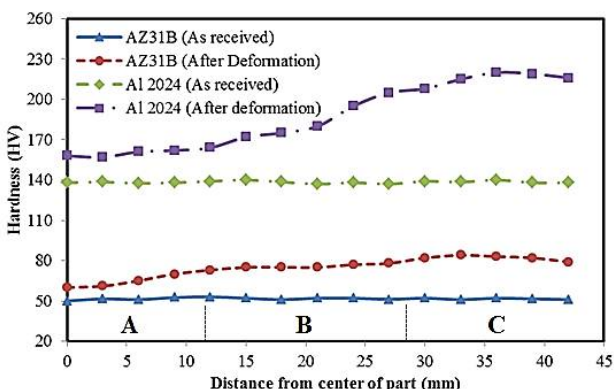


Fig. 7 Effect of sheet hydroforming process in different drawing depth and process temperature on hardness of 2024 aluminum and AZ31B magnesium alloys

شکل 7 تأثیر فرآیند هیدروفرمینگ ورق در عمق کشش و دمای متفاوت فرآیند بر میزان سختی آلایزهای آلومینیم 2024 و منیزیم AZ31B

در شکل 5، نمایی از سطح مقطع برش خورده یک نمونه تغییر شکل یافته آورده شده است. بر این اساس، سطح مقطع نمونه تولید شده به سه ناحیه مجزا (A، B و C) تقسیم‌بندی شده است. پس از برش قطری و ایجاد یک سطح مقطع از نمونه تولید شده مطابق شکل 5، یک قاچ به عمق 3 میلی‌متر از این بخش نمونه جدا شده و سه تیکه A، B و C روی یک پایه نصب شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، سنباده‌زنی آن‌ها برای بررسی ریزساختار ماده مطابق استاندارد ASTM E3-11 انجام گردید [19]. برای این کار، سطح نمونه مورد نظر به وسیله کاغذ سنباده با شماره‌های به ترتیب 60، 120، 180، 280، 400، 600، 800، 1200، 2000 و 3000 مسطح گردیده و در نهایت با استفاده از دستگاه پولیش و ساینده پودر آلومینا، سطح شفاف از مقطع نمونه به دست آمد.

بررسی تغییرات سختی در سطح یک نمونه می‌تواند بیان‌گر میزان بهبود خواص مکانیکی و همچنین درجه همگنی کرنش اعمال شده به نمونه باشد. به همین دلیل و در این تحقیق، از آزمون میکروسختی ویکرز طبق استاندارد ASTM E384-99 [20] استفاده شد. آزمایش سختی بر روی آلایژی آلومینیم 2024 با اعمال نیروی 100 گرم و زمان اثر 20 ثانیه [21] و آلایژی منیزیم AZ31B با اعمال نیروی 100 گرم و زمان اثر 15 ثانیه [22] با استفاده از دستگاه سختی سنج Buehler Ltd انجام گردید. به دلیل وجود امکان خطاهایی ناشی از وجود عیوب در ناحیه آزمایش و خطای قرائت میزان سختی، در هر مقطع سه مرتبه سختی‌سنجی انجام شده و میانگین مقادیر به دست آمده محاسبه گردید. در شکل 6، نمایی از محل اثر سختی بر روی سطح نمونه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، محل اثر سختی دارای دو قطر D_1 و D_2 می‌باشد. میزان سختی محاسبه شده در هر ناحیه، از رابطه (2) به دست آمده است [23]:

$$H_V = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

که در این رابطه، d اندازه قطر میانگین اثر سختی ایجاد شده (میانگین D_1 و D_2) و F بیان‌گر میزان نیروی اعمال شده در واحد کیلوگرم می‌باشد. در جدول 2، بازه تغییرات ابعاد اثر سختی در نواحی مختلف از سطح مقطع برش خورده آورده شده است. در شکل 7، نمودار توزیع سختی بر حسب فاصله از مرکز قطعه کار برای نمونه‌های آلومینیمی و منیزیمی به کار گرفته شده در این تحقیق آورده شده است. مقادیر پارامترهای بیشینه فشار سیال، درجه حرارت مجموعه قالب و عمق کشش برای

بررسی ریزساختار این آلیاژ انتخاب گردید. محلول پیکریک اسید از ترکیب 35 میلی‌لیتر اتانول، 5 میلی‌لیتر آب مقطر، 5 میلی‌لیتر استیک اسید و میزان 2/1 گرم پیکریک اسید به دست می‌آید [26]. زمان نگهداری نمونه منیزیمی در این محلول حدود کمتر از 15 ثانیه محاسبه شد.

به‌منظور مشاهده دانه‌بندی و اندازه دانه‌ها، از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی⁵ و میکروسکوپ نوری⁶ استفاده گردیده و عکس‌ها با بزرگنمایی‌های مختلف طبق استاندارد ASTM E883-11 از سطح مقطع نمونه گرفته شده‌اند [27]. در شکل 8، تصاویر ریزساختار به دست آمده از نواحی A (بزرگترین میانگین اندازه دانه) و C (کوچکترین میانگین اندازه دانه) برای دو نمونه آلومینیمی و منیزیمی آورده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر فوق برای نمونه‌های شکل گرفته با عمق کشش 22 میلی‌متر در دمای 250 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین اندازه دانه برای نواحی مختلف از سطح مقطع قطعه‌کار با استفاده از روش تقاطع خطی⁷ محاسبه شده و در ناحیه A و C برای ورق آلومینیمی به ترتیب 15 و 12 میکرون و برای ورق منیزیمی به ترتیب 7 و 4 میکرون به دست آمدند. علت کمتر بودن میانگین ابعاد دانه‌ها در ناحیه C نسبت به ناحیه A را می‌توان به مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی⁸ نسبت داد. در ناحیه C، کار مکانیکی بیشتر (که خود را به صورت کشش در دیواره فنجان نشان می‌دهد) و دمای کاری بالای فرآیند (بالا تر از نصف دمای ذوب نمونه اولیه) می‌توانند به عنوان دو عامل محرک رخ دادن تبلور مجدد دینامیکی معرفی شوند. به‌منظور برقراری ارتباط بین اندازه دانه و میزان استحکام ماده، از رابطه هال-پیچ⁹ استفاده شده که بیان ریاضی آن به صورت رابطه (3) است [13]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-0.5} \quad (3)$$

که در آن d و σ_y به ترتیب بیان‌گر اندازه قطر دانه و استحکام تسلیم بوده و k و σ_0 جزو ثوابت ماده بوده و به ترتیب معرف ضریب هال-پیچ و مقاومت کل شبکه در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها می‌باشند. بر اساس رابطه هال-پیچ، اندازه دانه با استحکام و به تبع آن با میزان سختی ماده رابطه عکس دارد. مقایسه تصاویر ریز ساختار ماده (ابعاد دانه) با نحوه تغییرات مقادیر سختی موجود در شکل 7 به‌ازای نواحی مختلف، صحت نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند.

اصطکاک تماسی بین ورق و ماتریس در ناحیه فلنج (ناحیه C) میزان کرنش ایجاد شده را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، با افزایش میزان اصطکاک، تنش برشی بزرگ‌تری در آن محل به وجود آمده و در نتیجه ایجاد تنش‌های بزرگ‌تر منجر به نازک‌شدگی بیشتر شده و احتمال پارگی در ناحیه مزبور را افزایش می‌دهد. با توجه به این‌که پس از انجام فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی، بیشترین و کمترین میزان نازک‌شدگی به ترتیب در ناحیه دیواره فنجان (C) و کف محصول (A) به وجود می‌آید، لذا منطقی است که سختی قطعه‌کار در این دو ناحیه به ترتیب بیشترین و کمترین میزان را دارا باشد. میانگین میزان سختی در سطح مقطع ورق از جنس آلیاژ آلومینیم 2024 و در مرحله قبل از تغییر شکل $138 H_v$ به دست آمد. میانگین مقادیر سختی در نمونه تغییر شکل یافته آلومینیمی در نواحی A، B و C به ترتیب $161 H_v$ ، $184 H_v$ و $221 H_v$ به دست آمدند. برای نمونه منیزیمی، میزان سختی قبل از انجام فرآیند شکل‌دهی برابر $52 H_v$ بود. برای ورق منیزیمی نیز بیشترین و کمترین میزان افزایش سختی نسبت به نمونه اولیه به ترتیب در نواحی C (حدود 58%) و A (حدود 27%) به دست آمد. افزایش چشم‌گیر سختی ماده در ناحیه دیواره محصول نسبت به کف آن نشان‌دهنده حساسیت ناحیه مزبور به تغییر شکل پلاستیک در دماهای 200 و 250 درجه سانتی‌گراد است.

در این بخش، هدف بررسی ریزساختار به دست آمده در سطح مقطع یک نمونه تغییر شکل یافته و ارتباط آن با میزان سختی در آن ناحیه است. برای بررسی ریزساختار آلیاژ آلومینیم 2024 تلاش بسیاری صورت گرفت و محلول‌های اچ¹ مختلفی آزمایش شدند. به‌منظور انجام فرآیند اچ فلزات مطابق استاندارد ASTM E 407-2015 عمل شده است [24]. از بین محلول‌های بررسی شده، محلول بارکر² دانه‌بندی را با وضوح بیشتری برای آلیاژ آلومینیم 2024 مشخص نمود. این محلول از ترکیب 5 میلی‌لیتر اسید فلوروبوریک³ در 200 میلی‌لیتر آب به دست می‌آید [25]. زمان نگهداری نمونه آلومینیمی در محلول اچ تازه درست شده به میزان حدود 60 ثانیه در نظر گرفته شد. پس از انجام فرآیند اچ، دانه‌بندی نمونه‌ها مورد مشاهده و بحث قرار گرفت. به‌منظور مشاهده نحوه دانه‌بندی و محاسبه اندازه دانه در آلیاژ منیزیم AZ31B، محلول‌های مختلفی بررسی شده و در نهایت، محلول اسید پیکریک⁴ به‌عنوان محلول اچ مناسب جهت

⁵ Scanning Electron Microscope (SEM)

⁶ Optical Microscope (OM)

⁷ Linear Intercept Method (LIM)

⁸ Dynamic recrystallization (DRX)

⁹ Hall-Petch

¹ Etch

² Barker

³ Fluoroboric acid (HBF₄)

⁴ Picric acid

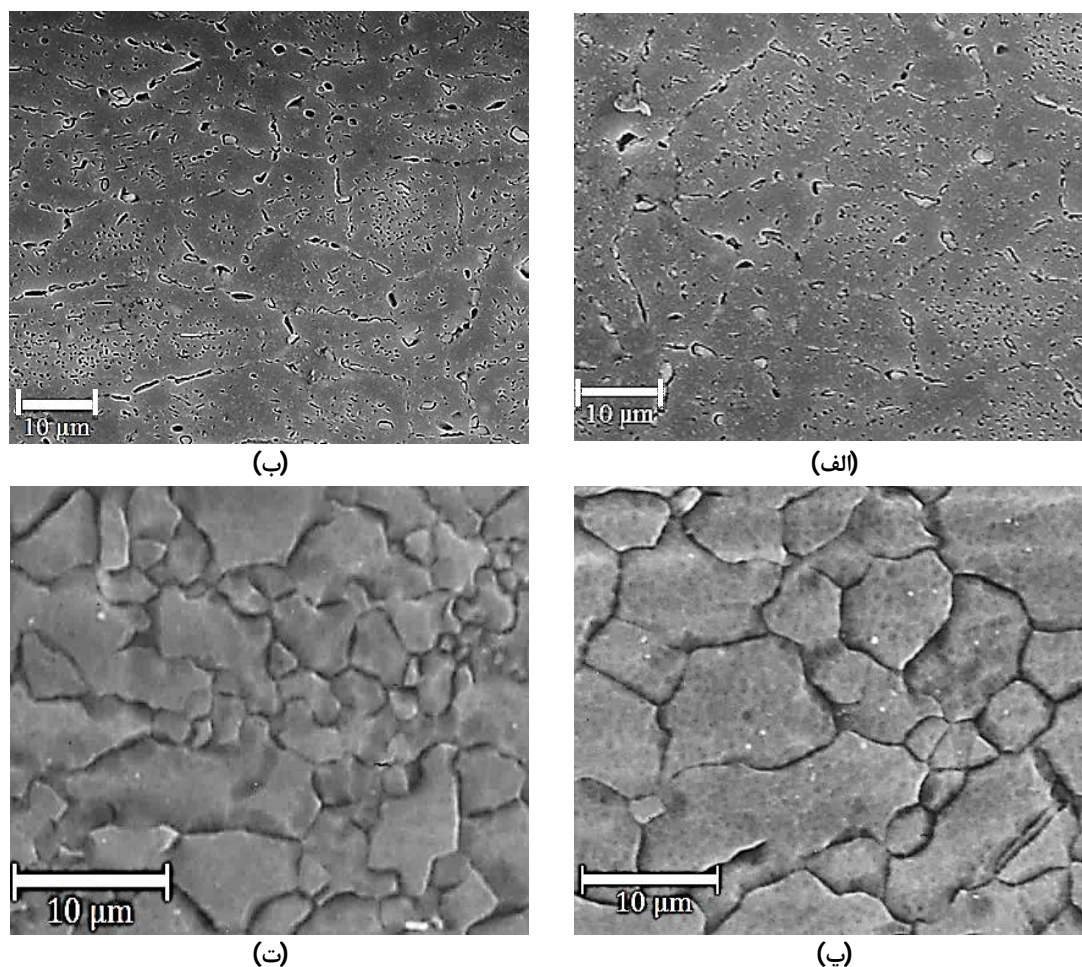


Fig. 8 Microstructural images from different areas of the final product, a- region A (Al), b- region C (Al), c- region A (Mg) and d- region C (Mg)

شکل 8 تصاویر ریز ساختار از نواحی مختلف محصول نهایی، الف- ناحیه A آلومینیم، ب- ناحیه C آلومینیم، پ- ناحیه A منیزیم و ت- ناحیه C منیزیم

سطح مقطع نمونه تغییر شکل یافته به دست آمده‌اند. در این ارتباط، نتیجه‌گیری‌های مهم به‌طور خلاصه در زیر آورده شده است:

- برای هر دو آلایژ مورد استفاده در این پژوهش، بیشترین میزان کرنش ضخامتی ورق در ناحیه تماس با نوک سنبه و دیواره محصول نهایی (ناحیه تحت کشش و خمش هم‌زمان) به وجود آمده و در ناحیه کف نمونه به دلیل افزایش میزان اصطکاک بین سنبه و ورق و کاهش تغییر شکل ناحیه مزبور در اثر چسبندگی به وجود آمده، تغییرات کرنش ضخامتی ناچیز بود.

- با افزایش دمای انجام فرآیند شکل‌دهی، مواد نرم‌تر شده و قابلیت شکل‌پذیری بیشتری پیدا می‌کنند. از طرفی، افزایش بیش از حد دمای فرآیند می‌تواند در محصول تولید شده، بیشینه درصد نازک‌شدگی را افزایش داده و ضمن کاهش میزان یکنواختی نمونه تولید شده، حتی منجر به پارگی آن

از آنجایی که بیشترین میزان کرنش ضخامتی و در نتیجه ریز شدن اندازه دانه در ناحیه C از ورق تغییر شکل یافته به وجود می‌آید، لذا منطقی است که به‌ازای تمام شرایط آزمایشگاهی و بدون توجه به جنس قطعه‌کار، بیشترین و کمترین تعداد دانه به ترتیب در نواحی C و A تجمع داشته باشند. روند تغییرات افزایش تعداد دانه در واحد سطح مشابه نمودار تغییرات سختی بوده که با توجه به رابطه (3) نتایج منطقی به نظر می‌رسد.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های آلایژی سبک از جنس آلومینیم 2024 و منیزیم AZ31B در دمای بالا مورد بررسی قرار گرفت. فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در دو دمای 200 و 250 درجه سانتی‌گراد انجام شده و تصاویر ریز ساختار و نتایج آزمایش سختی از نواحی مختلف

- Vol. 92, No. 9-12, pp. 4457-4472, 2017.
- [9] F. Marandi, A. Jabbari, M. Sedighi, R. Hashemi, An experimental, analytical, and numerical investigation of hydraulic bulge test in two-layer Al-Cu sheets, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139, No. 3, pp. 31-41, 2017.
- [10] S. Yaghoubi, F. Fereshteh-saniee, An investigation on the effects of optimum forming parameters in hydromechanical deep drawing process using the genetic algorithm, *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 49, No. 1, pp. 54-62, 2018.
- [11] S. Yaghoubi, F. Fereshteh-Saniee, Optimization of the geometrical parameters for elevated temperature hydro-mechanical deep drawing process of 2024 aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 2, pp. 151-161, 2021.
- [12] D. Raja Satish, D. Ravi Kumar, Formability of AA6061 alloy sheets in warm forming temperature range, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 233, No. 3, pp. 413-425, 2019.
- [13] A. A. Ghafar, A. B. Abdullah, J. I. Mahmood, Experimental and numerical prediction on square cup punch-die misalignment during the deep drawing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 379-388, 2021.
- [14] H. Wang, X. Shen, A novel hydrodynamic deep drawing utilizing a combined floating and static die cavity, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-11, 2021.
- [15] J. Xing, X. Yang, H. Miura, T. Sakai, Mechanical properties of magnesium alloy AZ31 after Severe Plastic Deformation, *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 1, pp. 69-75, 2008.
- [16] S.R. Westbrook, Guidance Document for Alternative Diesel Fuels Proposed as Drop-In Fuels to Displace Diesel Fuels as Specified By ASTM Specification D975, *Southwest Research INST SAN ANTONIO TX TARDEC Fuels and Lubricants Research*, 2014.
- [17] S. Yaghoubi, F. Fereshteh-Saniee, An investigation on the effects of the process parameters of hydro-mechanical deep drawing on manufacturing high-quality bimetallic spherical-conical cups, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 110, No. 7, pp. 1805-1818, 2020.
- [18] E. Afshin, M. Kadkhodayan, An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes, *Materials & Design*, Vol. 87, pp. 25-35, 2015.
- [19] A. S. f. ASTM E3-01, *Testing Materials*, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, Vol. 104, 2001.
- [20] E. ASTM, 384, *Effect of Heat Input on the*
- نیز شود. بر اساس نتایج به دست آمده، دمای مناسب جهت انجام فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی آلایژی آلومینیم 2024 و آلایژی منیزیم AZ31B به ترتیب 250 و 200 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.
- ناحیه‌ای از ورق که در هنگام انجام فرآیند بین دیواره مخزن و سنبه قرار دارد (ناحیه C)، دچار بیشترین میزان کشیدگی شده و کرنش پلاستیک ایجاد شده در این ناحیه بیشتر از سایر نواحی است. در ناحیه مزبور، کرنش‌های خمشی بالایی به وسیله لبه ماتریس در قطعه کار ایجاد شده و با وجود اصطکاک تماسی بین ورق و ماتریس در ناحیه فلنج، میزان کرنش افزایش می‌یابد. بر همین اساس، اندازه دانه برای هر دو ورق آلایژی در ناحیه C (آلومینیم و منیزیم به ترتیب 12 میکرون و 4 میکرون) نسبت به A (آلومینیم و منیزیم به ترتیب 15 میکرون و 7 میکرون) کوچک‌تر و به تبع آن میزان سختی در ناحیه C نسبت به ناحیه A (برای آلومینیم و منیزیم به ترتیب 37% و 24%) بیشتر به دست آمد.

5- مراجع

- [1] M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus, Manufacturing of lightweight components by metal forming. *CIRP annals*, Vol. 52, No. 2, pp. 521-542, 2003.
- [2] M. Koç, *Hydroforming for advanced manufacturing*, Elsevier, 2008.
- [3] L. Lang, Z. Wang, D. Kang, S. Yuan, S. H. Zhang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 165-177, 2004.
- [4] S. H. Zhang, J. Danckert, Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1, pp. 14-25, 1998.
- [5] M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, M. Elyasi, *Developments in sheet hydroforming for complex industrial parts. In: Metal Forming-Process, Tools, Design*, IntechOpen, 2012.
- [6] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1, No. 166, pp. 150-161, 2005.
- [7] P. Groche, R. Huber, J. Dörr, D. Schmoeckel, Hydromechanical deep-drawing of aluminium-alloys at elevated temperatures, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 215-218, 2002.
- [8] C. G. Dengiz, K. Yıldızlı, Experimental and numerical study of process limits for deep drawing of dome-structured sheet metals, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

- microetching metals and alloys*, ASTM standards, Vol. 3, pp. 465-85, 1999.
- [25] H. K. Pabandi, H. R. Jashnani, M. Paidar, Effect of precipitation hardening heat treatment on mechanical and microstructure features of dissimilar friction stir welded AA2024-T6 and AA6061-T6 alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 214-220, 2018.
- [26] C. Ha, N.-J. Park, Effect of rolling direction on the development of microstructure, texture, and mechanical properties of AZ31B alloys, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, No. 9, pp. 1955-1959, 2014.
- [27] S. A. Hosseini, S. M. Abbasi, K. Z. Madar, H. M. K. Yazdi, The effect of boron and zirconium on wrought structure and γ - γ' lattice misfit characterization in nickel-based superalloy ATI 718Plus, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 211, pp. 302-311, 2018.
- Microstructure and Toughness*, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, , Vol. 279, 2005.
- [21] B. Yang, J. Yan, M. A. Sutton, A. P. Reynolds, Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds: Part I. Metallurgical studies, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 364, No. 1-2, pp. 55-65, 2004.
- [22] S. B. Behraves, H. Jahed, S. Lambert, Characterization of magnesium spot welds under tensile and cyclic loadings, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 4890-4900, 2011.
- [23] M. Tiegel, R. Hosseinabadi, S. Kuhn, A. Herrmann, C. Rüssel, Young's modulus, Vickers hardness and indentation fracture toughness of alumino silicate glasses, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 6, pp. 7267-7275, 2015.
- [24] E. ASTM, 407, *Standard practice for*