



مطالعه تجربی اثر دما بر خواص مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تولید شده به کمک فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار

جواد عیسی‌آبادی¹، محمد صدیقی²، رامین هاشمی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114، rhashemi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 آذر 1397

پذیرش: 14 خرداد 1398

ارائه در سایت: بهمن 1398

کلیدواژه‌ها:

نورد در کانال همسان زاویه‌دار

آلیاژ آلومینیوم 5083

خواص مکانیکی

میکروسکوپ الکترونی روبشی

دما

فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید می‌باشد که به منظور دستیابی به مواد فوق ریزدانه مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، به بررسی اثر دمای فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5083 در پاس‌های مختلف پرداخته شد. فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دماهای محیط، 200 و 300 سانتی‌گراد و با استفاده از روان‌کار در پاس‌های مختلف بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. خواص مکانیکی و شکست نمونه‌ها به وسیله آزمون کشش تک محوره، آزمون میکروسختی و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در یک دمای مشخص استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و میکروسختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش در پاس‌های ابتدایی با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد، در حالی که تغییر طول نمونه تا شکست کاهش می‌یابد. با مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها بعد از انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در یک پاس مشخص در دماهای مختلف مشاهده شد که با افزایش دما استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و میکروسختی نمونه‌ها نسبت به دمای محیط اندکی کاهش یافته ولی مقدار تغییر طول نمونه تا شکست و به دنبال آن شکل‌پذیری نمونه‌ها بهبود یافته است. به طوری که در پایان پاس سوم، استحکام تسلیم و سختی نمونه‌های عبور داده شده در دمای 300 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط به ترتیب 14/8% و 8/5% و کاهش و درصد تغییر طول نمونه تا شکست 22/2% افزایش می‌یابد.

Experimental study of the effect of temperature on mechanical properties of aluminium sheets produced by equal channel angular rolling process

Javad Eisaabadi Bozcheloei, Mohammad Sedighi, Ramin Hashemi*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 21 December 2018
Accepted 4 June 2019
Available February 2020

Keywords:

ECAR
Aluminum alloy 5083
Mechanical properties
SEM
Temperature

Abstract

The equal channel angular rolling (ECAR) process is one of the methods of severe plastic deformation that is considered to obtain ultrafine-grain materials (UFG). In this study, the effect of equal channel angular rolling (ECAR) process temperature on the mechanical properties of aluminum alloy 5083 was investigated. Equal channel angular rolling process was performed using lubricant in different passes on the samples at the ambient temperature, and also at 200°C and 300°C. The evaluation of mechanical properties and fracture mode of the samples was performed using uniaxial tensile test, micro-hardness test and scanning electron microscope (SEM). The results revealed that by increasing number of ECAR passes at a specific temperature, tensile strength, Ultimate tensile strength and micro-hardness increased in a way that increasing rate at initial passes is more than last passes, while the elongation to fracture decreases. Also, by comparing the mechanical properties of the samples after applying the ECAR process in a specified pass at different temperatures observed that by increasing the temperature, the yield strength, ultimate tensile strength and micro-hardness of the samples decreased in comparison with the ambient temperature. However, the elongation to fracture as well as the formability was improved. So that, at the end of the third pass, the yield strength and micro-hardness of the passed samples at 300°C decreased by 14.8% and 8.5% in comparison with ambient temperature, respectively, and the elongation to fracture in the sample increased by 22.2%.

1- مقدمه

زمین می‌باشد. آلیاژهای آلومینیوم به دو دسته، عملیات حرارتی

پذیر و غیرقابل عملیات حرارتی تقسیم‌بندی می‌شوند [1]. آلیاژ آلومینیوم فلزی نرم، سبک و سومین عنصر فراوان در پوسته

Please cite this article using:

J. Eisaabadi Bozcheloei, M. Sedighi, R. Hashemi, Experimental study of the effect of temperature on mechanical properties of aluminium sheets produced by equal channel angular rolling process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 13- 24, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آلومینیوم 5083 غیرقابل عملیات حرارتی بوده و استحکام آن تنها از طریق کارسختی افزایش می‌یابد. از این آلیاژ بیشتر در ساخت مخازن تحت فشار، زیر دریایی‌ها، اجزای موشک و تجهیزات حمل و نقل استفاده می‌شود. همچنین قابلیت شکل‌دهی خوبی در کار سرد و گرم دارد [2].

در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های تولید و خواص مکانیکی مواد با اندازه دانه نانومتری یا بسیار ریزدانه موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی علم مواد و علوم مرتبط با آن بوده است [3]. فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید¹ به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. اصول این روش، اعمال کرنش‌های شدید به ماده فلزی بدون تغییر در ابعاد ظاهری آن است [4، 5]. در این فرایندها با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشمگیری می‌یابد. با توجه به کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش استحکام نمونه‌های تولید شده با روش‌های مذکور، به نظر می‌رسد، فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مواد فلزی با اندازه دانه میکرومتر و نانومتری در مقیاس صنعتی باشد [6، 7].

فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار² یکی جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که در آن ورق‌های فلزی با تغذیه نورد به داخل کانال قالب تحت کرنش شدید پلاستیکی قرار می‌گیرند [8]. فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار همانند فرایند پرس در کانال همسان زاویه‌دار³، فرآیندی است که به کمک آن می‌توان بدون تغییر در سطح مقطع قطعه، کرنش‌های بزرگی را به ماده اعمال نمود. تحت یک هندسه مناسب کانال، کرنش‌ها حدود 1- 0/5 در یک مرحله عبور از قالب اعمال می‌گردد. هر چند فرایند پرس در کانال همسان زاویه‌دار، فرایند مهمی برای تولید مواد با خواص مکانیکی عالی می‌باشد، ولی همچنان در مقیاس آزمایشگاهی باقی مانده است، زیرا فرایندی غیرپیوسته بوده و همچنین عدم توانایی به کارگیری ورق‌های نازک نیز از ناکارآمدی این فرایند به شمار می‌رود. اما فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار توانایی اعمال کرنش پلاستیک بر ورق‌های فلزی نازک و طولانی بدون تغییر در ابعاد را دارد و می‌توان آن را به صورت پیوسته به کار گرفت [9].

تاکنون مواد زیادی با استفاده از فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار تولید شده و خواص مکانیکی، ریزساختار، تنش

پسماند و بافت آن مورد بررسی قرار گرفته است. لی تأثیر فرایند ECAR را بر میکروساختار نوار آلومینیومی AI-1050 بررسی نموده است و میزان نرخ کرنش در هر عبور و نیز کرنش کلی را بیان کرده است. همچنین در مورد تأثیر دما بر ریزدانه سازی این فرآیند، بحث شده است. وی در تحقیق خود از مدل سازی اجزاء محدود نیز کمک گرفته است [10]. نام تأثیر رسوب‌ها را بر ارزیابی میکروساختاری آلیاژ AI-7050 طی فرایند ECAR مطالعه نموده است. به طوری که دو نمونه رسوب شامل نوع بشقابی $MgZn_2$ و ریز کروی Al_2Zr در آلیاژ وجود دارد. با انجام متعدد این فرایند، این رسوب‌ها تکه تکه شده و در نتیجه دانه نیز ریزتر می‌شود. در این حالت اندازه دانه 600nm می‌رسد [11]. هان تأثیر کرنش‌های تجمعی را روی جهت‌گیری دانه‌ها در این فرآیند با کانال‌های نابرابر بررسی نموده است. وی در این تحقیق با انجام 32 عبور بر روی ورق AI-1050 کرنشی در حدود 19 به ماده اعمال نموده است [12، 13]. هان همچنین در تحقیقی دیگر، تأثیر جهت‌گیری اولیه دانه‌ها قبل از انجام فرایند بر ارزیابی جهت‌گیری دانه‌های نهایی را مورد بررسی قرار داده و به پیش‌بینی تکسچر دانه‌های نهایی (بعد از فرایند) پرداخته است [14]. هون چانگ کنترل یکنواختی ضخامت را در فرایند ECAR مطالعه نموده است. با توجه به اصطکاک موجود بین ورق و دیواره قالب، ضخامت ورق به طور یکنواختی افزایش می‌یابد. وی با کنترل فاصله خروجی قالب با یک واحد الاستیک، ضخامت ورق خروجی را یکنواخت نموده است [15]. یانگ چنگ قابلیت کشش ورق AZ31 که با فرایند ECAR در دمای اتاق تولید شده را مورد بررسی قرار داده است. وی نرخ کشش حدی این ورق را با اعمال فرایند از 1/2 به 1/6 افزایش داده که به خاطر تغییر جهت کریستالی تحت تغییر شکل برشی شدید می‌باشد. لذا با کنترل جهت دانه می‌توان قابلیت کشش را تغییر داد [16]. همچنین به مطالعه تأثیر جهت کریستالی بر روی چکش‌خواری ورق AZ31 پرداخته است [17]. وی در بررسی دیگر تأثیر لقی قالب بر روی جهت کریستالی از پراش اشعه X و نیز اجزای محدود FEM کمک گرفته است. لذا بحث در مورد تغییرات زاویه بین جهت کریستالی و صفحه بالا پرداخته است. ولی لقی مناسب را به صورت $c = H/t$ معرفی نموده که H اندازه دهانه کانال و t ضخامت ورق است [18]. چنگ همچنین در تحقیقی که بر روی بهبود قابلیت کشش انجام داد، مشخص شد که دانه‌ها زیاد ریز نشده همچنین تنش بالا و چکش‌خواری کم نمونه ECAR شده به خاطر حضور دوقلوبی‌ها می‌باشد [19]. حسنی و همکارانش تأثیر فرایند ECAR را بر روی آلیاژ AZ31 جهت رسیدن به ساختار نانو مورد مطالعه قرار دادند [20].

¹ Sever Plastic Deformation (SPD)

² Equal Channel Angular Rolling (ECAR)

³ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

بیشتر بر روی نمونه‌ها برای بهبود خواص مکانیکی وجود نداشت [25].

انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار بر روی آلیاژ آلومینیوم 5083 در دمای محیط باعث افزایش استحکام و کاهش تغییر طول نمونه تا شکست (شکل‌پذیری) می‌شود [25]. هدف از این پژوهش، مطالعه تأثیر تغییرات دما بر روی خواص مکانیکی ورق‌های فلزی بعد از انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار می‌باشد که بتوان ضمن اعمال پاس بیشتر بر روی نمونه‌ها، با انجام فرایند در دمای بالا استحکام را به صورت ناچیز کاهش داده و میزان تغییر طول نمونه تا شکست (شکل‌پذیری) را افزایش داد و به نوعی به یک حالت بهینه‌ای از استحکام و شکل‌پذیری رسید.

از آنجایی که روند تغییرات خواص مکانیکی در دماهای مختلف برای ما اهمیت دارد و همچنین به دلیل دشوار بودن انجام فرایند و بستن قالب‌ها بر روی دستگاه نورد، فرایند در همه پاس‌ها انجام نشده است.

خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده با استفاده از فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار به وسیله آزمون کشش تک‌محوره و آزمون میکروسختی بدست آمد و همچنین مکانیزم شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

2-1- مواد تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 5083 به صورت ورق‌هایی به ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از دستگاه کوانتومتری بدست آمده و در جدول 1 ارائه شده است. نمونه‌ها قبل از انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار جهت دستیابی به ساختار کاملاً هم محور، آنیل شدند. عملیات آنیل در دمای 450 درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت و در کوره صورت گرفت. خنک‌کاری نمونه‌های آنیل شده به وسیله هوا و در کوره انجام شد.

2-2- فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار

به منظور بررسی خواص مکانیکی و شکست، نمونه‌های اولیه در ابعاد 300 میلی‌متر طول، 60 میلی‌متر عرض و 2 میلی‌متر ضخامت بریده شدند. فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار با استفاده از یک جفت غلتک به شعاع 121 میلی‌متر و دو قالب بالا و پایین که در شکل 1 نشان داده شده است، انجام شد.

حبیبی و همکارانش فرایند ECAR را بر روی مس خالص مطالعه کرده و توانستند به ساختار نانو با استحکام و هدایت الکتریکی بالا دست پیدا کنند [21]. محبعلی و کتابچی نیز، تأثیر فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار بر روی خواص مکانیکی ورق فولادی st14 را مورد مطالعه قرار دادند [22]. محمودی و همکاران تأثیر پارامترهای فرایند ECAR بر تنش‌های پسماند و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5083 را مورد مطالعه قرار دادند [23]. نعمتی و همکارانش به مطالعه عددی و تجربی آلیاژ آلومینیوم 5083 طی تغییر شکل توسط فرایند ECAR پرداختند [24]. رحیمی و همکاران نمودار حد شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم 5083 ریزدانه شده توسط فرایند ECAR را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با انجام فرایند ECAR، نمودار حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد [25]. نتایج حاصل از تحقیقات صورت گرفته بر روی مواد مختلف بالا حاکی از بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و سختی در نمونه‌های آلومینیومی، مسی و فولادی بعد از انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار می‌باشد. همچنین در این مواد بعد از انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار مواد ریزدانه شده و تغییر طول نمونه تا شکست¹ کاهش می‌یابد. تحقیقات انجام شده بر روی نمونه منیزیمی نشان می‌دهد که انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار تا 10 پاس بر روی این آلیاژ باعث کاهش استحکام و افزایش تغییر طول نمونه تا شکست شده است. این پدیده می‌تواند به دو دلیل باشد: دلیل اول اشباع سطح بالای کرنش متراکم در ماده حجیم است. در این مرحله تعداد زیادی نابجایی وجود دارند و غیرممکن است که بتوان نابجایی‌های جدیدی در این دانه‌ها ایجاد کرد. دلیل دیگر، بازگشت دینامیکی در حین تغییر شکل است [20]. این فرایند بیشتر برای فلزات سبک مانند آلومینیوم و منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا مورد توجه می‌باشد.

دشوار بودن انجام فرایند، طراحی، بستن قالب‌ها بر روی دستگاه نورد و همچنین هزینه بیشتر تحقیقات سبب شده تا مطالعات کمی در زمینه فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار انجام شود.

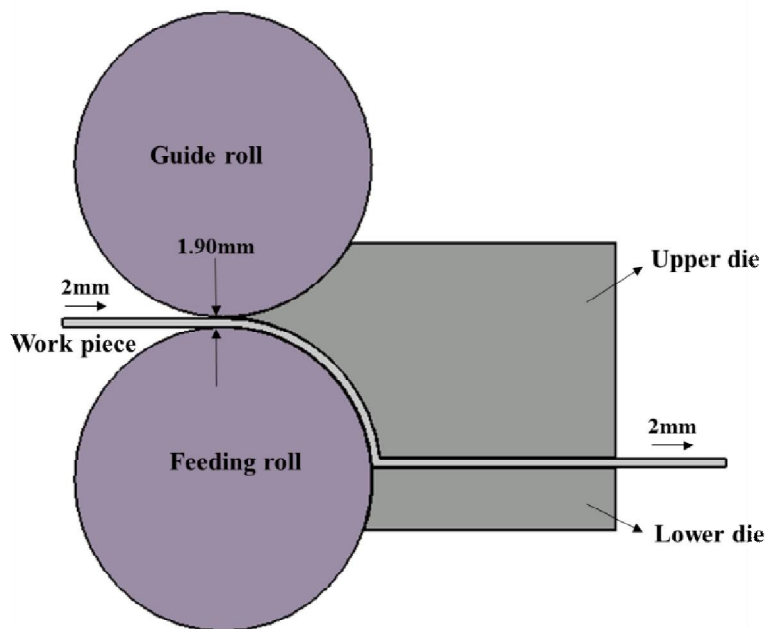
مطالعه پیشین در مورد آلیاژ آلومینیوم 5083، به بررسی خواص مکانیکی آن تحت انجام فرایند در دمای محیط بود که در آن فرایند نورد تا 3 پاس بر روی نمونه‌ها انجام شده و نمونه‌ها در پاس بعدی دچار ترک می‌شدند و امکان اعمال پاس

¹ Elongation

جدول 1 ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 5083

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of aluminum alloy 5083

استحکام تسلیم (MPa)	تغییر طول نمونه تا شکست (%)	سختی (HVN)	ابعاد ورق (l, w, t) (mm)	ترکیب شیمیایی (wt. %)	ماده
146	9/1	78/2	300, 60, 2	Al, 4.47 Mg, 0.26 Fe, 0.089 Si, 0.049 Cu, 0.55 Mn, 0.057 Cr	آلیاژ آلومینیوم 5083 آنیل شده



شکل 1 شماتیک فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار

Fig. 1 Schematic illustration of equal channel angular rolling (ECAR) process

بسته به نوع جنس ماده و دمای انجام فرایند، تعداد مرحله‌ای که می‌توان نمونه‌ها را از قالب نورد در کانال همسان زاویه‌دار عبور داد، متفاوت است و بعد از چند عبور ترک‌هایی روی سطح نمونه دیده می‌شود. با توجه به اینکه آلیاژ آلومینیوم 5083 از استحکام بالایی برخوردار است، در دمای محیط تا 4 پاس، دمای 200 درجه سانتی‌گراد تا 5 پاس و در دمای 300 درجه سانتی‌گراد تا 7 پاس، فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار ممکن گردید. در پاس 4 دمای محیط، پاس 5 دمای 200 درجه سانتی‌گراد و پاس 7 دمای 300 درجه سانتی‌گراد به علت اعمال کارسختی بیش از حد به قطعه ترک‌های بسیار شدیدی روی سطح نمونه ایجاد شد.

2-3- بررسی خواص مکانیکی و شکست

برای مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌ها، برای هر پاس دو نمونه برای آزمون کشش تک محوره در جهت نورد طبق شکل 3 آماده‌سازی شد.

برای انجام فرایند، ابتدا قالب‌ها را توسط فیکسچر به بدنه دستگاه نورد متصل می‌کنند (شکل 2). برای هر مرحله انجام فرایند، قالب بالایی توسط پیچ باز شده و نمونه‌ها از فضای بین دو قالب خارج می‌شوند. ضخامت کانال ورودی و خروجی در این فرایند متفاوت می‌باشد، به صورتی که ضخامت کانال ورودی (فاصله بین دو غلتک) 1/90 میلی‌متر و کانال خروجی (فاصله دو کفه قالب) 2 میلی‌متر است. و همچنین زاویه منفرجه در این قالب که زاویه تقاطع کانال خروجی و ورودی است، برابر 130 درجه در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد بر روی آلیاژ آلومینیوم 5083 انجام شد. بدین ترتیب که قبل از انجام هر پاس، نمونه‌ها به وسیله هیتر پیش‌گرم شدند. نمونه‌ها با سرعت 12-15 m/min در مسیر عبوری C به درون قالب تغذیه شدند. در مسیر C نمونه‌ها پس از هر بار عبور از قالب 180 درجه چرخانده می‌شوند. برای کاهش اصطکاک بین ورق و قالب، از روان کار استفاده شد.



شکل 2 دستگاه نورد مورد استفاده

Fig. 2 Used rolling machine

پس از ماند نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه گردان پولیش و با استفاده از سنباده‌های 220، 400، 600، 800، 1200 و 1500 پرداخت شد. آزمون میکروسختی ویکرز برای هر نمونه در بیش از 5 نقطه به جهت مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌ها، برای هر پاس دو نمونه برای آزمون کشش تک محوره در جهت نورد طبق شکل 3 آماده‌سازی شد. نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M-9 و با استفاده از وایرکات آماده شدند. آزمون کشش تک محوره در دمای اتاق، با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ و با استفاده از دستگاه SANTAM-STM50 انجام شد. با انجام آزمون کشش تک محوره، منحنی تنش-کرنش برای هر پاس استخراج گردید.

آزمون میکروسختی ویکرز جهت تعیین سختی نمونه‌های تولید شده با فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، با استفاده از دستگاه JENUS تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای ضخامت اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمون میکروسختی نیاز به آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها می‌باشد. بدین منظور قطعه‌هایی با ابعاد تقریبی 2 در 1 سانتی‌متر از نمونه‌ها بریده شد و در لوله‌های پلاستیکی از پیش بریده شده قرار داده شد. جهت پرداخت و سنباده زدن سطح نمونه‌ها بایستی آنها را ماند کرد. جهت ماند نمونه‌ها از روش ماند سرد استفاده شد. پس از ماند نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه گردان پولیش و با استفاده از سنباده‌های 220، 400، 600، 800، 1200 و 1500 پرداخت شد. آزمون میکروسختی ویکرز برای هر نمونه در بیش از 5 نقطه به صورت تصادفی اندازه‌گیری شد و پس از حذف نقاط پرت و با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد. سطح مقطع



شکل 3 نمونه‌های آماده شده جهت آزمون کشش تک محوره

Fig. 3 The samples prepared for uniaxial tensile test

نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M-9 و با استفاده از وایرکات آماده شدند. آزمون کشش تک محوره در دمای اتاق، با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} s^{-1}$ و با استفاده از دستگاه SANTAM-STM50 انجام شد. با انجام آزمون کشش تک محوره، منحنی تنش-کرنش برای هر پاس استخراج گردید.

آزمون میکروسختی ویکرز جهت تعیین سختی نمونه‌های تولید شده با فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، با استفاده از دستگاه JENUS تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای ضخامت اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمون میکروسختی نیاز به آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها می‌باشد. بدین منظور قطعه‌هایی با ابعاد تقریبی 2 در 1 سانتی‌متر از نمونه‌ها بریده شد و در لوله‌های پلاستیکی از پیش بریده شده قرار داده شد. جهت پرداخت و سنباده زدن سطح نمونه‌ها بایستی آنها را ماند کرد. جهت ماند نمونه‌ها از روش ماند سرد استفاده شد.

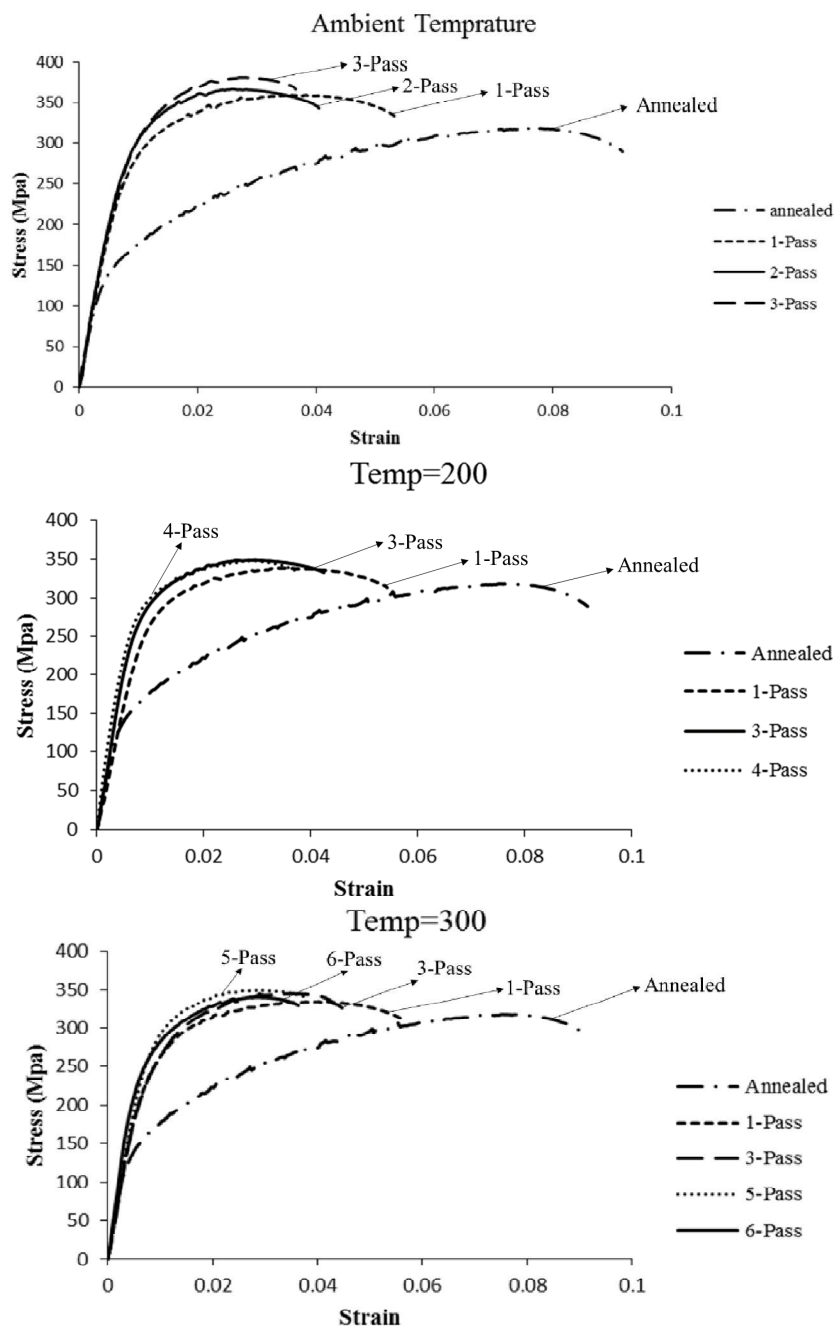
تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و تغییر طول نمونه تا شکست آلیاژ آلومینیوم 5083 عبور داده شده از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار بر حسب پاس‌های فرایند در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد و نمونه آنیل شده نشان داده شده است. در نمودارهای شکل 4 مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، استحکام کششی افزایش و تغییر طول نمونه تا شکست کاهش یافته است.

نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمایش کشش تک محوره، به منظور بررسی و تعیین مکانیزم شکست در پاس‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، VEGA TESCAN مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

1-1- خواص مکانیکی

در شکل‌های 4 و 5، به ترتیب نمودارهای تنش- کرنش حقیقی و

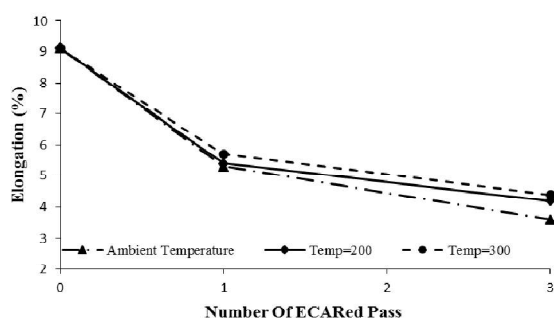
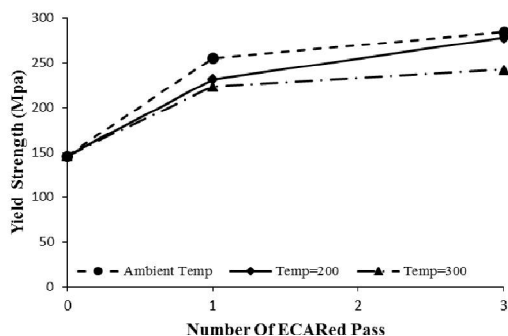


شکل 4 منحنی تنش-کرنش بدست آمده از تست کشش برای نمونه آنیل و نمونه‌های عبور داده شده از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد

Fig. 4 The stress-strain curve obtained from the uniaxial tensile tests for annealed and ECARed samples at the temperatures 25°C (room temperature), and 200 and 300°C

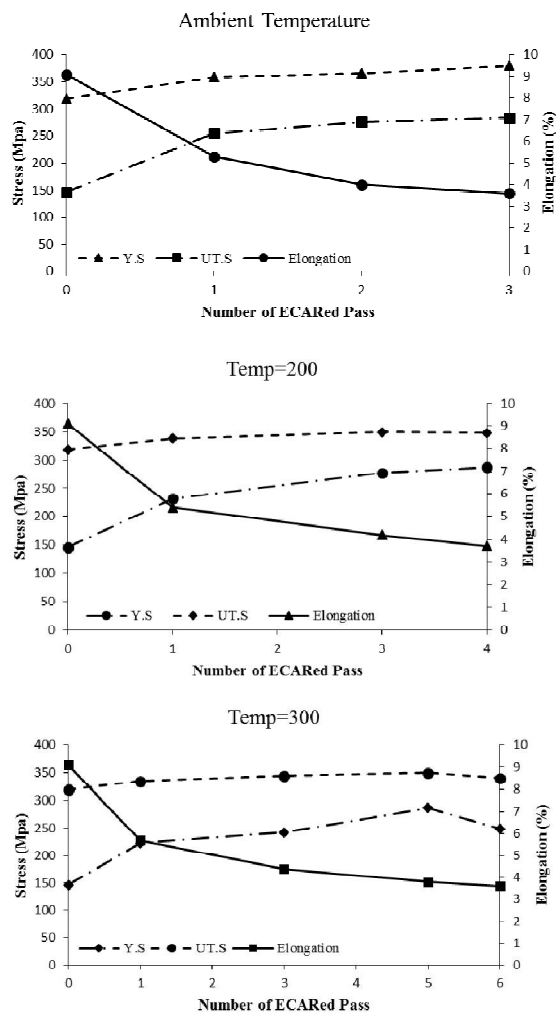
مشاهده می‌شود پیش‌گرم کردن نمونه‌های فلزی قبل از انجام فرایند باعث شده تا تعداد پاس بیشتری بر روی نمونه‌ها انجام گیرد. در پاس‌های بالاتر فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در نمونه‌ها تقریباً ثابت مانده و در پاس آخر نسبت به پاس ماقبل به دلیل اشباع شدن چگالی نابجایی‌ها و از بین رفتن اثر نرخ کرنش سختی اندکی کاهش یابد. این پدیده به دلیل رسیدن مواد به چگالی حالت پایدار نابجایی‌ها رخ می‌دهد. چگالی حالت پایدار نابجایی‌ها با یک بالانس دینامیکی بین تولید نابجایی‌ها در حین تغییر شکل پلاستیک و از بین رفتن آنها در فرایندهای برگشت دینامیکی که کمی از ریزسختی می‌کاهند، معین شده است [24].

در شکل 6 به ترتیب تغییرات استحکام تسلیم و تغییر طول نمونه تا شکست بر حسب تعداد پاس فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد تا 3 پاس نمایش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک دمای معین با افزایش تعداد پاس، مقدار استحکام تسلیم افزایش و تغییر طول نمونه تا شکست کاهش یافته است.



شکل 6 تغییرات استحکام تسلیم و تغییر طول نمونه تا شکست بر حسب تعداد عبور نمونه از قالب تا 3 پاس در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد

Fig. 6 Changes in yield strength and elongation up to 3 passes ECAR process at the temperatures 25°C (room temperature), and 200 and 300°C

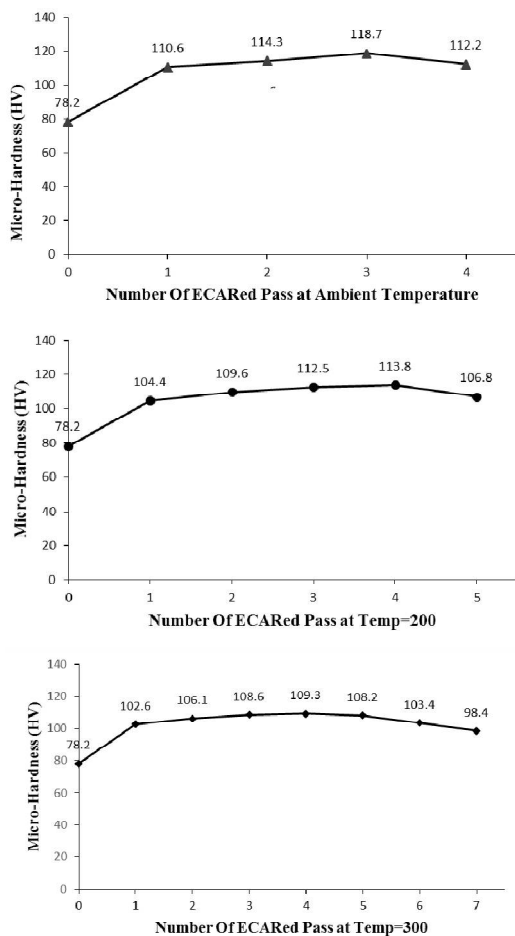


شکل 5 تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و تغییر طول نمونه تا شکست بر حسب تعداد پاس‌های فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد

Fig. 5 Changes in yield strength, ultimate tensile strength, and elongation based on the number of ECARed passes at the temperatures 25°C (room temperature), and 200 and 300°C

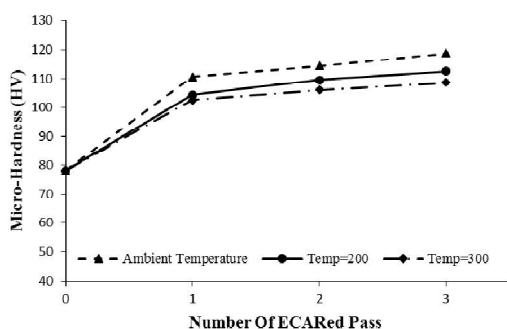
تغییرات استحکام کششی در فلزاتی که تحت تغییر شکل شدید پلاستیک قرار می‌گیرند، می‌تواند ناشی از دو دلیل مهم و اصلی، کارسختی به وسیله نابجایی‌ها و ریزشدن دانه‌ها باشد [26]. در پایان پاس اول فرایند، به علت افزایش چگالی نابجایی‌ها ناشی از کرنش سختی، اعمال کرنش زیاد و کارسرد، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی با شیب زیادی افزایش یافته و تغییر طول نمونه تا شکست با شیب تندی کاهش یافته است. در پاس‌های بعدی فرایند افزایش استحکام بیشتر به دلیل تکامل ساختار دانه (اصلاح ریزساختار) است و شکل‌گیری فوق ریزدانه‌ها و کرنش سختی اثر کمی دارند و به دنبال آن افزایش استحکام تسلیم و کاهش تغییر طول نمونه تا شکست، نسبت به پاس اول شیب کمتری دارد [27]. همان‌طور که در شکل 4

جدول 2 تغییرات میکروسختی، استحکام تسلیم و تغییر طول نمونه تا شکست با افزایش دما آورده شده است.



شکل 7 تغییرات میکروسختی ویکرز بر حسب تعداد پاس‌های فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد

Fig. 7 Changes in vickers microhardness based on the number of ECARed passes at the temperatures 25°C (room temperature), and 200 and 300°C



شکل 8 تغییرات میکروسختی بر حسب تعداد عبور نمونه از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار تا 3 پاس در دماهای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد

Fig. 8 Changes in vickers microhardness based on the number of ECARed passes up to 3 passes at the temperatures 25°C (room temperature), and 200 and 300°C

همچنین در یک پاس مشخص با افزایش دما، استحکام تسلیم کاهش و تغییر طول نمونه تا شکست افزایش یافته است. کاهش استحکام تسلیم و افزایش تغییر طول نمونه تا شکست با افزایش دما می‌تواند به دلایل زیر اتفاق بیفتد: اول، با افزایش دما اثر کرنش سختی کاهش یافته و تولید نابجایی‌ها و به دنبال آن چگالی نابجایی‌ها کاهش می‌یابد و منجر به کاهش استحکام و افزایش تغییر طول نمونه تا شکست می‌شود. دوم، با بالا رفتن دما، انرژی داخلی کافی جهت آغاز بازیابی دینامیکی و یا تبلور مجدد به وجود می‌آید. بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد هر دو به از بین بردن نابجایی‌ها کمک می‌کنند و باعث نرم شدن ماده می‌شوند. اثر ترکیبی از تبلور مجدد و بازیابی دینامیکی، تنش مورد نیاز برای تغییر شکل را پایین می‌آورد. افزایش دما باعث کاهش تنش‌های داخلی شده و استحکام را کاهش و تغییر طول نمونه تا شکست را افزایش می‌دهد [29، 28].

شکل 7 تغییرات میکروسختی ویکرز نمونه آیل شده و نمونه‌های عبور داده شده از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار بر حسب پاس‌های فرایند در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرایند، مقدار میکروسختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در پایان پاس اول، مقدار سختی با شیب تندی افزایش پیدا می‌کند که این افزایش شدید به دلیل میزان بالای افزایش چگالی نابجایی‌ها ناشی از کرنش سختی می‌باشد [30]. پس از پایان پاس اول و با افزایش پاس‌های فرایند، میزان سختی با شیب کمتری افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش اثر کرنش سختی در نمونه‌هاست.

همچنین میزان میکروسختی در پاس‌های پایانی دمای 200 و 300 درجه سانتی‌گراد به دلیل اشباع شدن چگالی نابجایی و از بین رفتن اثر نرخ کرنش سختی تقریباً ثابت می‌ماند و در پاس آخر به دلیل ایجاد ترک‌های سطحی در ورق فلزی، سختی نمونه کاهش می‌یابد [31].

شکل 8 تغییرات میکروسختی ویکرز بر حسب تعداد عبور نمونه از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار تا 3 پاس در دمای محیط، 200 و 300 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با مقایسه تغییرات میکروسختی تا 3 پاس در دماهای مختلف مشاهده می‌شود که در پاس‌های مشابه با افزایش دما مقدار سختی اندکی کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش اثر نرخ کرنش سختی با افزایش دماست. همچنین دمای تغییر شکل بالاتر و نرخ کرنش پایین‌تر، دانه‌های بزرگتری را در طی تغییر شکل تشکیل می‌دهند که منجر به کاهش سختی می‌شود [28]. در

جدول 2 تغییرات میکروسختی ویکرز، استحکام تسلیم و تغییر طول نمونه تا شکست با افزایش دما

Table 2 Changes in vickers micro-hardness, yield strength and elongation with increasing temperature

نمونه	میکروسختی (HV)	استحکام تسلیم (Mpa)	تغییر طول نمونه در درصد تغییرات میکروسختی تا شکست (%) El	نسبت به نمونه عبور داده تسلیم نسبت به نمونه عبور داده شده در دمای محیط	درصد تغییرات استحکام در صد تغییر طول نمونه تا شکست
عبور اول دمای محیط	110/6	255	5/3	-	-
عبور اول 200 °C	104/4	231	5/4	%-9/4	%2
عبور اول 300 °C	102/6	223	5/7	%-12/5	%7/5
عبور سوم دمای محیط	118/7	284	3/6	-	-
عبور سوم 200 °C	112/5	278	4/2	%-2/1	%16/6
عبور سوم 300 °C	108/6	242	4/4	%-8/5	%22/2

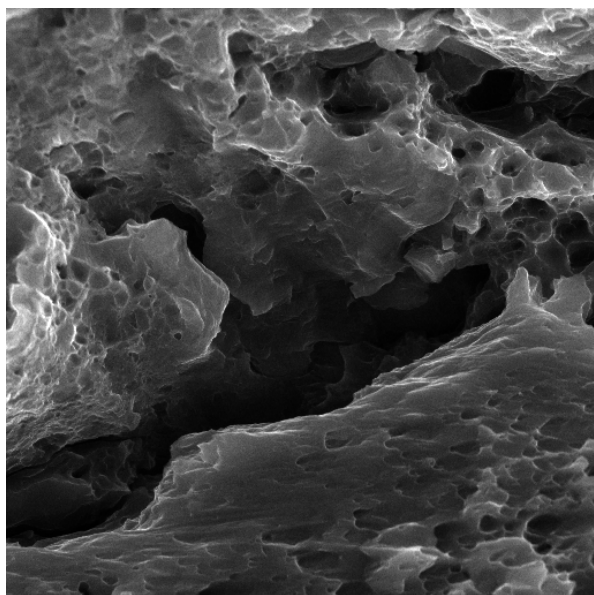
3-2- شکست نگاری

افزایش کرنش اعمالی، تعداد میکروحفرات کاهش می‌یابد و میکروحفرات با شعاع کمتر دیده می‌شود که از علل اصلی این تغییرات، کاهش مقدار ازدیاد طول در نمونه کشش نسبت به نمونه اولیه است. همچنین به دلیل اعمال کرنش‌های غیریکسان در جهات مختلف، میکروحفرات در پاس‌های بالاتر یکنواخت نیست و در جهات مختلف کشیده شده‌اند.

در این تحقیق برای بررسی مکانیزم شکست نمونه‌های عبور داده شده از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، از میکروسکوپ الکترونی روبشی و تصویربرداری از سطح مقطع شکست نمونه‌ها در پاس و دماهای مختلف استفاده شده است.

مکانیزم غالب شکست در فلزاتی که دارای ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار (FCC) هستند، تشکیل حفره¹ و سپس شکست نرم است. شکست نرم² در بیشتر مواد به صورت حفره‌های هم‌محور یا نیم کره‌ای ظاهر می‌شود. این نوع شکست با تشکیل میکروحفرات، پیوستگی، انتشار ترک و سپس شکست برشی در زاویه‌ای نسبتاً در راستای جهت کشش رخ می‌دهد. آلیاژهای مختلف آلومینیم به دلیل ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار همواره در شرایط مختلف دارای شکست نرم می‌باشند. یکی از مشخصه‌های مکانیزم شکست نرم، شکل‌گیری میکرودمپل‌ها یا میکروحفرات در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست می‌باشد. به صورت کلی پس از موضعی شدن نمونه، میکروحفرات در نقاط دارای آخال، تخلخل و تمرکز تنش شکل می‌گیرند و با افزایش مقدار نیرو، میکروحفرات رشد کرده و بهم می‌رسند تا تحت یک زاویه 45 درجه نسبت به نیروی اعمال شده، رشد ترک و سپس شکست ایجاد شود. در صورتی که در شکست ترد سطح مقطع شکست، سطح صاف، تقریباً بدون تغییر شکل و حفرات است.

همان‌طور که در شکل‌های 9 تا 11 مشاهده می‌شود مکانیزم شکست همواره نرم است و با افزایش کرنش (تعداد پاس فرایند) و دما تغییر در مکانیزم دیده نشده و شکست همراه با ایجاد میکروحفرات در سطح مقطع نمونه‌ها پس از آزمون کشش رخ می‌دهد. البته تفاوت اصلی در شکل‌های 9 تا 11، اندازه، شکل و تعداد میکروحفرات در نمونه‌های مختلف است، به طوری که با



شکل 9 تصویر SEM از سطح شکست نمونه بعد از 3 پاس فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای 300 °C

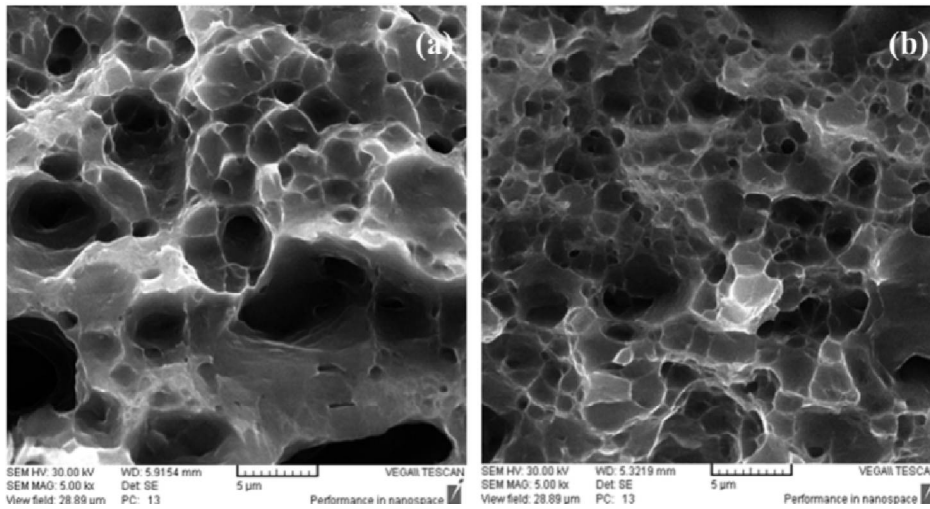
Fig. 9 SEM image of fracture surface of sample after 3 passes ECAR process at 300°C

معمولاً این نوع مکانیزم شکست که با ایجاد میکروحفرات کشیده شده در جهات مختلف است، اصطلاحاً شکست نرم برشی گفته می‌شود و در همه‌ی فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید با اعمال کرنش مشاهده می‌شود. مطابق با شکل‌های 9 تا 11، اثر دما بر روی مکانیزم شکست کاملاً متفاوت از اثر کرنش

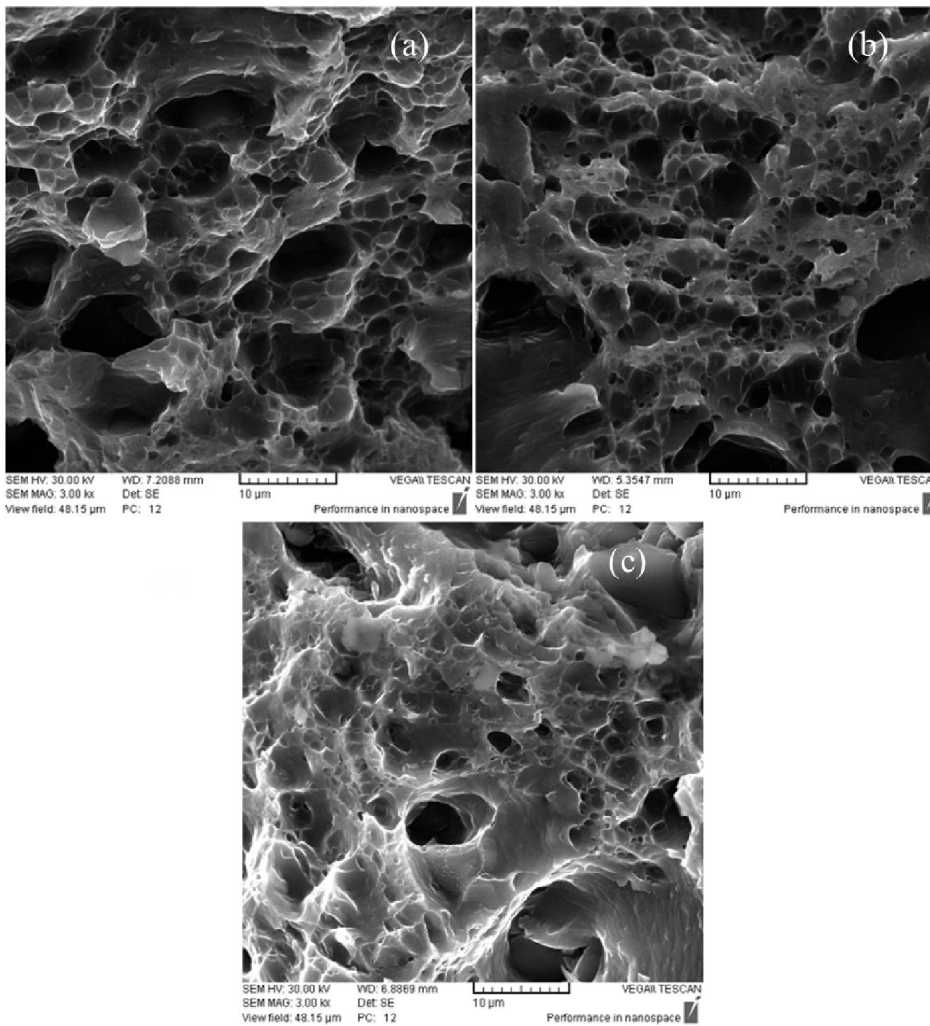
¹ Dimple
² Ductile failure

تایید کننده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و تأثیر فزاینده دما بر شکل‌پذیری است.

است و با افزایش دمای فرایند، میکرو حفرات هم‌محور بیشتری در سطح شکست مشاهده می‌شود و نتایج آزمون کشش نیز



شکل 10 تصویر SEM سطح شکست (a) نمونه آنیل (b) پس از یک بار عبور از قالب فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در دمای محیط
Fig. 10 SEM image of fracture surface of (a) initial sample (b) after 1 pass ECAR process at ambient temperature



شکل 11 تصویر SEM سطح شکست پس از عبور از قالب فرایند در دمای 300 °C (a) پاس اول، (b) پاس سوم و (c) پاس پنجم
Fig. 11 SEM image of fracture surface of (a) after 1 pass, (b) after 3 passes and (c) after 5 passes ECAR process at 300°C

4- نتایج

می‌دهد.

در این تحقیق خواص مکانیکی و مکانیزم شکست آلومینیوم 5083 تولید شده از طریق فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار در پاس‌های مختلف در دمای بالا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

1- با افزایش تعداد پاس‌های فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد که این افزایش در پاس‌های ابتدایی به دلیل کارسرد و اثر کرنش سختی شیب بیشتری دارد و در مراحل بعدی این نرخ افزایش کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در دمای محیط در پاس سوم و به ترتیب 284 مگاپاسکال و 380 مگاپاسکال می‌باشد. در مقایسه با نمونه آنیل استحکام تسلیم 94 درصد و استحکام کششی نهایی 19 درصد افزایش یافته است.

2- با بررسی نمودار تنش-کرنش در دمای محیط مشاهده شد که با انجام فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار، تغییر طول نمونه تا شکست کاهش می‌یابد. در دمای محیط، در پایان پاس سوم در مقایسه با نمونه آنیل، تغییر طول نمونه تا شکست (چکش‌خواری) 60 درصد کاهش می‌یابد.

3- با مقایسه مقدار میکروسختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های عبور داده شده از قالب در دماهای مختلف تا پاس سوم مشاهده شد که در پاس‌های مشابه با افزایش دما مقدار میکروسختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که در پایان پاس سوم در دمای 300 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط مقدار میکروسختی و استحکام تسلیم به ترتیب 8/5% و 14/8% کاهش یافته است.

4- با مقایسه تغییر طول نمونه تا شکست در دماهای مختلف تا پایان پاس سوم مشاهده شد که در پاس‌های مشابه با افزایش دما تغییر طول نمونه تا شکست افزایش می‌یابد. به طوری که در پایان پاس سوم در دمای 300 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط تغییر طول نمونه تا شکست 22/2% افزایش یافته است.

5- عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند نورد در کانال همسان زاویه‌دار حفرات کم عمق‌تر و کوچک‌تر شده‌اند. وجود حفره‌های کم عمق‌تر و کوچک‌تر نشان دهنده نوع شکست نرم برشی است و شبیه به شکست در نمونه اولیه است با این تفاوت که کم عمق‌ترند. این امر بالاتر بودن استحکام کششی و پایین‌تر بودن تغییر طول نمونه تا شکست در نمونه‌های عبور داده شده از قالب نسبت به نمونه اولیه (آنیل شده) را نشان

5- مراجع

- [1] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding, *International Journal of Materials Research*, Vol. 108, No. 12, pp. 1036-1044, 2017.
- [2] M. Javidikia, R. Hashemi, Analysis and simulation of parallel tubular channel angular pressing of Al 5083 tube, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 70, No. 10, pp. 2547-2553, 2017.
- [3] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, B. Mohammadi, T. Shojaee, Experimental evaluation of the plane stress fracture toughness for ultra-fine grained aluminum specimens prepared by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 708, pp. 301-310, 2017.
- [4] S. Lee, Y. Saito, T. Sakai, H. Utsunomiya, Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1-2, pp. 228-235, 2002.
- [5] Y. H. Chung, J. woo Park, K. H. Lee, An analysis of accumulated deformation in the equal channel angular rolling (ECAR) process, *Metals and Materials International*, Vol. 12, No. 4, pp. 289-292, 2006.
- [6] K. Hanazaki, N. Shigeiri, N. Tsuji, Change in microstructures and mechanical properties during deep wire drawing of copper, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21-22, pp. 5699-5707, 2010.
- [7] A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D. Yang, F. Micari, G. Lahoti, et al., Severe plastic deformation (SPD) processes for metals, *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 2, pp. 716-735, 2008.
- [8] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, No. 1-2, pp. 82-87, 2000.
- [9] A. Habibi, M. Ketabchi, Enhanced properties of nano-grained pure copper by equal channel angular rolling and post-annealing, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 483-487, 2012.
- [10] J. C. Lee, H. K. Seok, J. Y. Suh, Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 16, pp. 4005-4019, 2002.
- [11] C. Nam, J. Han, Y. Chung, M. Shin, Effect of precipitates on microstructural evolution of 7050 Al alloy sheet during equal channel angular rolling, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 347, No. 1-2, pp. 253-257, 2003.
- [12] J. H. Han, H. K. Seok, Y. H. Chung, M. C. Shin, J. C. Lee, Texture evolution of the strip cast 1050 Al alloy processed by continuous confined strip shearing and

- [23] M. Mahmoodi, M. Sedighi, D. A. Tanner, Experimental study of process parameters' effect on surface residual stress magnitudes in equal channel angular rolled aluminium alloys, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 12, pp. 1592-1598, 2014.
- [24] R. Nemati Chari, B. Mollaei Dariani, and A. Fallahi Arezodar, Numerical and experimental studies on deformation behavior of 5083 aluminum alloy strips in equal channel angular rolling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 0954405416661005, 2016.
- [25] H. Rahimi, M. Sedighi, R. Hashemi, Forming limit diagrams of fine-grained Al 5083 produced by equal channel angular rolling process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 1464420716655560, 2016.
- [26] M. Zhan, Y. Li, W. Chen, W. Chen, Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy sheets severely deformed by accumulative roll-bonding, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 6, pp. 9256-9261, 2007.
- [27] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta materialia*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221-1227, 1998.
- [28] H. McQueen, J. Jonas, Recovery and recrystallization during high temperature deformation, *Treatise on Materials Science & Technology*. Vol. 6, pp. 393-493, 1975.
- [29] G. Rajaram, S. Kumaran, T. S. Rao, High temperature tensile and wear behaviour of aluminum silicon alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 1, pp. 247-253, 2010.
- [30] M. Shaarbaaf, M. R. Toroghinejad, Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1-2, pp. 28-33, 2008.
- [31] M. Alizadeh, M. Samiei, Fabrication of nanostructured Al/Cu/Mn metallic multilayer composites by accumulative roll bonding process and investigation of their mechanical properties, *Materials & Design*, Vol. 56, pp. 680-684, 2014.
- [32] M. Naseri, A. Hassani, M. Tajally, Fabrication and characterization of hybrid composite strips with homogeneously dispersed ceramic particles by severe plastic deformation, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 3, pp. 3952-3960, 2015.
- its formability evaluation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 323, No. 1-2, pp. 342-347, 2002.
- [13] J. H. Han, K. H. Oh, J. C. Lee, Effect of accumulative strain on texture evolution in 1050 Al alloys processed by continuous confined strip shearing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 387, pp. 240-243, 2004.
- [14] J. H. Han, M. Huh, J. Y. Suh, J. C. Lee, Controlling the textures of the Al alloy sheet via dissimilar channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 394, No. 1-2, pp. 60-65, 2005.
- [15] Y. H. Chung, J. W. Park, K. H. Lee, Controlling the thickness uniformity in equal channel angular rolling (ECAR), *Materials science forum*, pp. 2872-2877, 2007.
- [16] Y. Q. Cheng, Z. H. Chen, W. J. Xia, Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature, *Materials characterization*, Vol. 58, No. 7, pp. 617-622, 2007.
- [17] Y. Q. Cheng, Z. H. Chen, W. J. Xia, T. Zhou, Effect of channel clearance on crystal orientation development in AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling, *Journal of materials processing technology*, Vol. 184, No. 1-3, pp. 97-101, 2007.
- [18] Y. Q. Cheng, Z. H. Chen, W. J. Xia, Effect of crystal orientation on the ductility in AZ31 Mg alloy sheets produced by equal channel angular rolling, *Journal of materials science*, Vol. 42, No. 10, pp. 3552-3556, 2007.
- [19] Y. Q. Cheng, Z. H. Chen, W. J. Xia, T. Zhou, Improvement of drawability at room temperature in AZ31 magnesium alloy sheets processed by equal channel angular rolling, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 17, No. 1, pp. 15-19, 2008.
- [20] F. Hassani, M. Ketabchi, Nano grained AZ31 alloy achieved by equal channel angular rolling process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 21, pp. 6426-6431, 2011.
- [21] A. Habibi, M. Ketabchi, M. Eskandarzadeh, Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 6, pp. 1085-1090, 2011.
- [22] S.S.M. Mohebali, M. Ketabchi, Effect of ECAR Process on The Properties of St14 steel sheet, *4th National Conference Of Metals and Materials Forming (MATFORM)*, Sharif University Of Technology.