



بررسی تأثیر فرایند پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع (ECAP) و عملیات حرارتی پس از آن بر رفتار مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075

امیر عبدالعزیزی¹، علیرضا فلاحی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 4413-15875، Afallahi@aut.ac.ir

کلیدواژگان

چکیده

پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع آلومینیوم 7075
انحلال
پیرسازی

فرایندهای تغییر شکل موم‌سان شدید از جمله فرایندهایی هستند که به منظور ریزدانه شدن ساختار مواد و بهبود خواص مکانیکی کاربرد دارند. روش پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع یا ECAP از جمله مهم‌ترین روش‌های مرسوم تغییر شکل موم‌سان شدید برای نمونه‌های حجیم است. هدف از تحقیق جاری بررسی تأثیر ECAP و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075 است. پس از عملیات حرارتی انحلال، ECAP در دمای اتاق بر روی نمونه‌ها انجام شده و کاهش متوسط اندازه دانه‌ها و کشیدگی آن‌ها در راستای طولی مشاهده گردید. مقایسه سختی قبل و بعد از ECAP، افزایش قابل توجه سختی در اثر این عملیات را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر زمان عملیات انحلال بر سختی، نمونه‌ها به مدت 5، 10 و 15 ساعت در دمای 500 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زمان انحلال از 5 به 15 ساعت، موجب کاهش سختی نمونه‌ها از 45 به 39 HRB شده است. علت این امر افزایش میزان انحلال ذرات رسوبی در مرحله تشکیل محلول جامد است که توسط تصاویر متالوگرافی مشاهده شد. عملیات حرارتی پیرسازی به منظور بهبود سختی آلیاژ پس از ECAP در دماهای 80 و 120 درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. نتایج پیرسازی پس از ECAP نشان‌گر افزایش سختی در اثر رسوب‌گذاری، در کلیه نمونه‌ها است. افزایش زمان انحلال، تشکیل محلول جامدی غنی از عناصر آلیاژی را در پی دارد و سختی بیشینه نمونه در اثر افزایش زمان انحلال از 5 به 15 ساعت، از 92 به 98 HRB، طی پیرسازی در دمای 120 درجه، افزایش یافته است.

Effect of ECAP and heat treatment on mechanical properties of 7075 Al alloy

Amir Abdolazizi, Alireza Fallahi*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 4413-15875 Tehran, Iran, afallahi@aut.ac.ir

Keywords

ECAP
Solution Treatment
Aging
7075 Aluminum Alloy

Abstract

Severe Plastic Deformation (SPD) processes are widely used in order to decrease the grain size and improve mechanical properties of engineering alloys. Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) is one of such processes that can be performed on bulk materials. In this paper effect of ECAP and heat-treatment coupling on 7075 Aluminum alloy was investigated. ECAP was performed on samples after solution treatment. Considerable grain size decrease was observed. Sample's hardness was increased after ECAP. In order to investigate the effect of solution treatment time on hardness, samples were solution treated at 500° degrees for 5, 10 and 15 hours. It was shown that increasing the solution treatment time from 5 to 15 hours decreases the hardness in solid solution state from 45 to 39 HRB due to increase in the solution of the initial precipitates. Aging treatment at 80 and 120 degrees was performed to further harden the alloy. It was observed that aging treatment after ECAP increases the hardness of all samples. Increasing the solution treatment time from 5 to 15 hours increases the maximum hardness in aging state at 120 degrees from 92 to 98 HRB.

1- مقدمه

تغییر شکل پلاستیک شدید¹ راهی نوین برای بهبود استحکام این آلیاژهاست. در میان این فرایندها، روش پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع² با استفاده از تجهیزات ساده، سرعت بالا و اعمال کرنش پلاستیک متمرکز، امکان بهبود خواص

آلیاژهای آلومینیوم استحکام بالا، با داشتن نسبت استحکام به وزن مناسب در سازه‌های مهندسی و در صنایع فضایی کاربرد گسترده‌ای دارند. به همین علت بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از فرایندهای

1. Severe Plastic Deformation (SPD)

2. Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

Please cite this article using:

A. Abdolazizi, A. Fallahi, Effect of ECAP and Heat treatment on Mechanical properties of 7075 Al Alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-10, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پس از ECAP افزایش 5 تا 7 درصدی در استحکام نهایی مشاهده شده است. آن‌ها همچنین کاهش زمان رسیدن به سختی بیشینه در مرحله پیرسازی و کاهش میزان آن را با افزایش دمای پیرسازی گزارش کردند.

کیم⁴ و همکارانش [9] برای آلیاژ آلومینیوم 2024 تولید شده توسط ECAP افزایش استحکام تسلیم و رسیدن به میزان قابل قبول نرمی را در اثر پیرسازی پس از ECAP گزارش نمودند. ژنگ و همکارانش [10] اثر پیرسازی در دمای پایین پس از ECAP را بر رفتار مکانیکی آلومینیوم 7050 بررسی و افزایش استحکام این آلیاژ را گزارش نمودند. پانیگرایی⁵ و همکارانش [11] تأثیر دماها و زمان‌های متفاوت پیرسازی را بر رفتار مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075 تولید شده به روش نورد در دمای تبریدی مورد آزمایش قرار دادند.

پژوهش جاری با هدف بررسی کیفی و کمی هم‌افزایی استحکام ناشی از ECAP و عملیات حرارتی بر روی آلیاژ آلومینیوم 7075 صورت گرفته است. همچنین تلاش شد شرایط بهینه عملیات حرارتی برای این منظور شناسایی و ارائه شود. برای این منظور پس از عملیات انحلال، فرایند ECAP در دمای اتاق انجام شده و سپس عملیات پیرسازی تحت دماهای متفاوتی صورت گرفته است. از متالوگرافی به کمک میکروسکوپ نوری، آزمون سختی و کشش برای بررسی تأثیر این فرایندها استفاده شده است.

2- شرح آزمون‌ها

ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM B221 آلیاژ مورد استفاده نزدیک به آلومینیوم 7075 می‌باشد [1]. در ابتدا نمونه‌ها در دمای 500°C به مدت 10 و 15 ساعت تحت عملیات انحلال قرار گرفته و با کوئنچ کردن در آب سرد محلول جامد فوق اشباع⁶ تولید شده است. قطر نمونه‌های اولیه $19/3\text{ mm}$ و طول آن‌ها 90 mm بوده است. این نمونه قبل از انجام فرایند ECAP به مدت کوتاهی در دمای پایین (ظرف یخ) نگهداری شده و فرایند ECAP در قالب با زاویه کانال‌های $\varphi=90^{\circ}$ و زاویه‌ی گوشه $\psi=20^{\circ}$ انجام شده است (شکل 1).

استحکامی این آلیاژها را فراهم می‌کند. آلیاژهای آلومینیوم پس از ECAP دارای میکروساختاری ریزدانه و مرزدانه‌های کم‌زاویه¹ می‌باشند [1]. مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر عملیات ECAP بر آلیاژهای آلومینیوم انجام شده که از جمله آن‌ها می‌توان به آلیاژهای Al-Mg [۲،۳] و آلیاژهای Al-Zn-Mg که کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های مهندسی دارند، اشاره نمود [4]. از آن‌جا که این آلیاژها قابلیت پیرسازی داشته و خواص آن‌ها به شدت وابسته به تشکیل و رشد ذرات رسوبی است [5]، انگیزه‌های فراوانی در اضافه نمودن اثر افزایش استحکام ناشی از پیرسازی به افزایش استحکام ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید وجود دارد. انجام این فرایندها بر روی آلیاژهای آلومینیوم سری 7 هزار، افزایش چشمگیر کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مهندسی را به دنبال خواهد داشت.

فلزات و آلیاژهای فوق ریز دانه² تولید شده با فرایندهای SPD، بهبود قابل توجه استحکام و همین‌طور کاهش شدیدی در قابلیت تغییر شکل پلاستیک را به خصوص بعد از پاس اول تجربه می‌کنند [6]. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی بر روی تأثیر عملیات حرارتی پس از ECAP بر استحکام، نرمی و سایر خواص صورت گرفته است. شاعری و همکارانش تأثیر عملیات ECAP در چند پاس به همراه پیرسازی متعاقب بر رفتار مکانیکی آلیاژ 7075 را بررسی نموده‌اند [7]. طبق مشاهدات آن‌ها تأثیر پاس اول بر سختی آلیاژ بیشتر از پاس‌های متعاقب است. همچنین نمونه پس از یک پاس افزایش سختی بیشتری در اثر پیرسازی، نسبت به نمونه‌هایی که دو یا سه پاس ECAP شده‌اند، از خود نشان می‌دهد. علت این امر افزایش نسبت رسوب‌گذاری دینامیک (تحت اثر کرنش مضاعف) و کاهش نسبت رسوبات استاتیک عنوان شده است. آن‌ها همچنین کاهش متوسط اندازه دانه در اثر ECAP و کشیدگی دانه در راستای طولی به کمک میکروسکوپ نوری را مشاهده و گزارش کرده‌اند.

کیم³ و همکارانش تأثیر تلفیق عملیات حرارتی و فرایند ECAP تک پاس را بر رفتار مکانیکی آلیاژ 7075 بررسی کرده‌اند [8]. مطابق نتایج آن‌ها استحکام چشمگیر در اثر پرس نمونه در حالت محلول جامد در نمونه ایجاد می‌شود. این استحکام بیشتر از استحکام نمونه‌ای بوده که 4 بار پرس شده ولی در شرایط آنیل قرار داشته است. علت این امر جلوگیری عناصر محلول از بازیابی دینامیک عنوان شده است. با پیرسازی

4. Kim
5. Panigrahi
6. Super Saturated Solid Solution (SSSS)

1. Low Angle Grain Boundaries
2. Ultra Fine Grained (UFG)
3. Kim

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ

Table 1 Alloy's Chemical composition

AL	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
پایه	0/4	0/36	1/15	0/13	2/02	5/04	0/29	0/03



Fig. 1 ECAP's die and specimens

شکل 1 تصویر قالب ECAP و نمونه‌ها پس از پرس

دمای 500 درجه به مدت 5، 10 و 15 ساعت قرار گرفتند. نتایج حاصل از سختی آن‌ها بلافاصله بعد از کوئنچ، نشانگر کاهش سختی نمونه‌ها پس از عملیات انحلال با افزایش زمان انحلال است. (جدول 2) این روند را می‌توان با درشت‌دانه شدن نمونه در اثر افزایش زمان انحلال و همچنین افزایش میزان انحلال ذرات رسوبی مرتبط دانست. شکل 3 مربوط به تصاویر متالوگرافی این نمونه‌هاست که به ترتیب 5 و 15 ساعت تحت عملیات انحلال قرار گرفته‌اند. مقایسه تصاویر افزایش اندازه دانه و کاهش ذرات رسوبی با افزایش زمان انحلال را مشخص می‌سازد.

تحقق مناسب انحلال، تشکیل محلول جامد غنی از عناصر آلیاژی را به همراه دارد. در تحقیقات مرتبط، بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم با بهینه‌سازی شرایط انحلال گزارش شده است [13، 14].

3-2- تأثیر ECAP بر ریزساختار

به منظور بررسی تأثیر ECAP بر ریز ساختار نمونه، عملیات متالوگرافی، قبل و بعد از پرس صورت گرفته و تصاویر به دست آمده در شکل 4 نشان داده شده است.

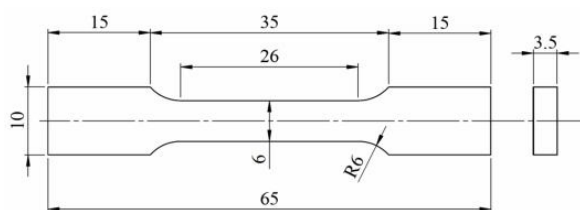


Fig. 2 Tensile test specimen dimensions

شکل 2 ابعاد نمونه‌ی کشش

جدول 2 تأثیر زمان انحلال بر سختی نمونه‌ها

Table 2 Effect of solution treatment time on sample's hardness

مدت زمان مرحله انحلال (ساعت)	5	10	15
میزان سختی (HRB)	44/7	41/3	39

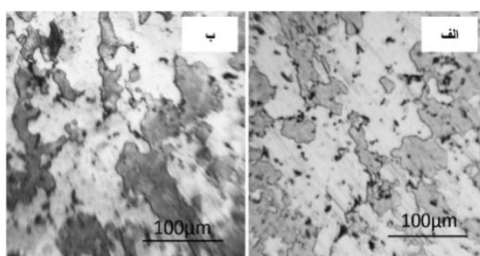


Fig. 3 Alloy's microstructure after solution treatment at 500 degrees for a) 5 and b) 15 hours

شکل 3 ریزساختار آلیاژ پس از عملیات انحلال در دمای 500 درجه (الف) به مدت 5 ساعت (ب) به مدت 15 ساعت

در این شرایط کرنش مؤثر در هر پاس تقریباً برابر با 1 می‌باشد [12]. از روغن MoS_2 به عنوان روان‌کار استفاده شده است. این فرایند در دمای اتاق انجام شده و سرعت حرکت سنبه 1mm/s بوده است. از آن‌جا که نمونه قابلیت پرس مجدد پس از پاس اول را نداشته و در پاس دوم تحت نیروی سنبه خرد می‌شد، فرایند ECAP روی کلیه نمونه‌ها برای یک پاس صورت گرفت. در ادامه برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی¹ بر رفتار مکانیکی آلیاژ مورد نظر، این عملیات در دماهای 80 و $120^{\circ}C$ روی نمونه‌ها انجام شد. فاصله زمانی پرس و پیرسازی کمتر از دو ساعت بوده و نمونه‌ها در این فاصله برای جلوگیری از رسوبگذاری در ظرف یخ نگهداری شدند. به منظور بررسی سختی، از روش سختی سنجی راکول B استفاده شده است. تست سختی نمونه‌ها روی صفحه‌ای در راستای سطح مقطع و با میانگین گرفتن از سختی شش نقطه در نقاط پراکنده انجام شد. برای آزمون میکروسختی از دستگاه مربوطه با الماس هرمی شکل از نوع ویکرز² با زاویه قاعده 136 درجه استفاده شد. آزمون‌های کشش نیز در دمای اتاق و نرخ کرنش 5×10^{-2} 1/s انجام گردید. ابعاد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM E8 در شکل 2 نشان داده شده است.

3- نتایج و ارزیابی

3-1- تأثیر افزایش زمان مرحله انحلال

به منظور بررسی تأثیر افزایش زمان انحلال بر کیفیت تشکیل محلول جامد، سه نمونه از آلیاژ 7075 تحت عملیات انحلال در

1. Artificial aging
2. Vickers

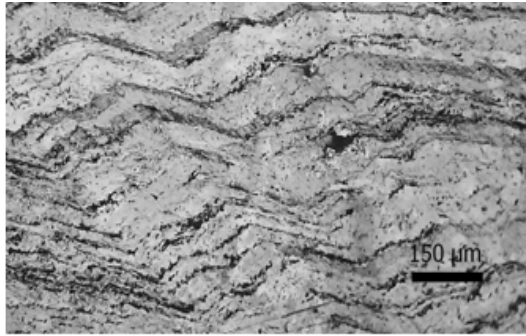


Fig. 5 Alloy's microstructure after single pass ECAP (longitudinal section view)

شکل 5 ریزساختار نمونه پس از یک پاس ECAP (در راستای طولی)

مطابق این آزمون‌ها ریزساختار نمونه به صورت تقریباً لایه‌ای، مشابه آنچه در شکل 5 مشاهده می‌شود گزارش شده است.

3-3- تأثیر فرایند ECAP و پیرسازی بر سختی

جدول 3 خلاصه نتایج سختی نمونه‌ها بعد از ECAP و پیرسازی را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، نتایج تحقیقات قلعه‌بندی و همکاران نیز درج شده است [18]. آن‌ها عملیات انحلال را به مدت 5 ساعت روی نمونه مشابه انجام داده و پس از ECAP تحت پیرسازی قرار داده‌اند. این نتایج در ردیف آخر درج شده است. همان‌گونه که در این جدول نیز خلاصه شده است، انجام فرایند ECAP پس از انحلال به همراه عملیات پیرسازی در پی آن، افزایش قابل توجهی در میزان سختی نمونه‌ها ایجاد می‌کند. این افزایش سختی، محصول دو ساز و کار استحکام‌بخش است. اول، اثر سخت شدن ناشی از ریزدانه شدن به همراه افزایش چگالی نابجایی‌ها در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و دوم سخت شدن دینامیکی (حین تغییر شکل) و استاتیکی (حین عملیات حرارتی) ناشی از شکل‌گیری ذرات رسوب به عنوان موانعی در برابر لغزش نابجایی‌ها.

3-3-1- تأثیر ECAP

مقایسه سختی بلافاصله قبل و بعد از عملیات ECAP نشان از افزایش 128، 113 و 93 درصدی میزان سختی به ترتیب برای نمونه‌هایی که به مدت 15، 10 و 5 ساعت تحت عملیات انحلال قرار گرفته بودند دارد. همان‌طور که اشاره شد، علل افزایش سختی طی تغییر شکل، علاوه بر ریزدانه شدن و افزایش چگالی نابجایی‌ها، تشکیل رسوباتی است که به صورت دینامیک و بر اثر اعمال کرنش در نمونه در دمای پایین (در این مورد دمای اتاق) شکل می‌گیرند.

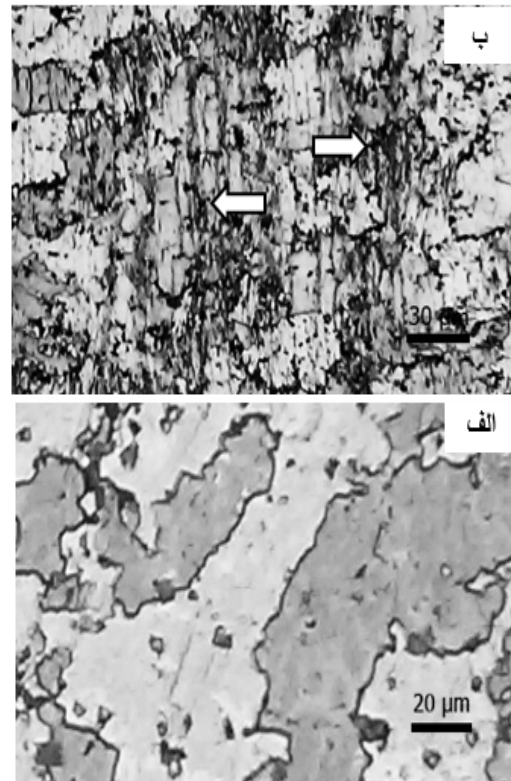


Fig. 4 Alloy's microstructure a) after solution treatment and before ECAP b) after single pass ECAP (cross section view)

شکل 4 ریزساختار نمونه: الف) پس از عملیات انحلال و قبل از ECAP ب) پس از یک پاس ECAP (در راستای سطح مقطع)

مقایسه تصاویر شکل 4-الف (بعد از عملیات انحلال و قبل از ECAP) و شکل 4-ب (بعد از ECAP) کاهش متوسط اندازه دانه نمونه را به خوبی مشخص می‌سازد. از طرفی تشکیل خطوط مرتبط با باندهای لغزش در ریزساختار نمونه پس از ECAP در شکل 4-ب مشخص است. این خطوط که با فلش مشخص شده‌اند حاصل کرنش برشی وارده حین ECAP بوده و از مشخصه‌های فرایند ECAP می‌باشند [15]. لازم به ذکر است که این تصاویر برگرفته از نواحی مرکزی نمونه می‌باشند. با این وجود شکل ریزساختار و ابعاد دانه در اکثر نقاط سطح مقطع یکسان بوده است. در تحقیقات مشابه صورت گرفته در این زمینه نیز ریزساختاری همگن و یکنواخت برای آلومینیوم و آلیاژهای آن مشاهده و گزارش شده است. علت این امر را باید انرژی نقص انباشت بالای این مواد دانست که منجر به فعال شدن مکانیزم‌های بازیابی در اثر کرنش وارده می‌گردد [16]. شکل 5 تصویر ریزساختار نمونه را در راستای عمود بر سطح مقطع نشان می‌دهد. کشیدگی دانه‌ها در جهت جریان ECAP قابل مشاهده است. ریزساختار با کیفیت یاد شده در آلیاژهای آلومینیوم که یک پاس تحت عملیات ECAP قرار می‌گیرند نیز گزارش شده است [17، 18].

جدول 3 خلاصه نتایج سختی نمونه‌ها بعد از ECAP و پیرسازی

Table 3 Sample's hardness after ECAP and aging

پیرسازی در دمای 80		پیرسازی در دمای 120		مرحله ECAP		مرحله انحلال
زمان رسیدن رسیدن به سختی بیشینه (Hour)	سختی بیشینه (HRB)	زمان رسیدن رسیدن به سختی بیشینه (Hour)	سختی بیشینه (HRB)	پس از ECAP (HRB)	سختی در انتهای مرحله انحلال و پیش از ECAP (HRB)	زمان انحلال (Hour)
344*	95	71	97/6	88/8	39	15
344*	95	49	97/5	87/8	41/3	10
142*	94/7	28	92/2	86/3	44/7	5

* میزان سختی که تا این زمان حاصل شده به عنوان سختی بیشینه گزارش شده است.

رسوبی درشت‌دانه و در نتیجه تشکیل ذرات رسوبی ریز و پرتعداد در مرحله پیرسازی است.

شکل 6- ب نتایج پیرسختی در دمای 80 درجه را نشان می‌دهد. افزایش سختی برای کلیه نمونه‌ها در اثر پیرسختی مشهود بوده و میزان آن برای نمونه‌هایی که 10، 15 و 5 ساعت در دمای انحلال قرار داشته‌اند به ترتیب برابر 8، 9 و 8 درصد بوده است. مطابق شکل نمونه با زمان انحلال 5 ساعت سختی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها تا زمانی که مورد مطالعه قرار گرفته از خود نشان می‌دهد. علت این امر حضور ذرات رسوبی نسبتاً درشت در ساختار این نمونه است که زمان 5 ساعت برای انحلال آن‌ها کافی نبوده است.

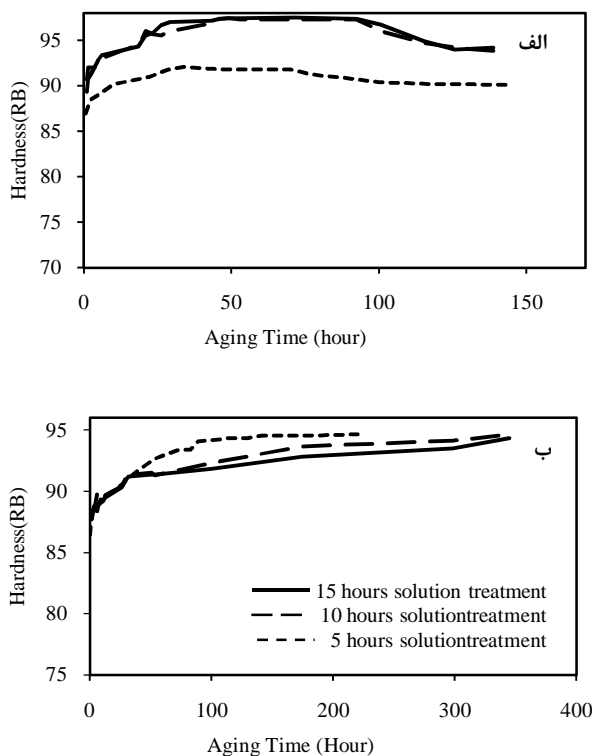


Fig. 6 Sample's hardness during aging at a) 120 degrees b) 80 degrees

شکل 6 سختی نمونه‌ها طی مرحله پیرسازی (الف) در دمای 120 درجه (ب) در دمای 80 درجه

در مطالعات مشابه بر روی آلیاژهای Al-Mg-Cu-Zn که قبل از تغییر فرم تحت عملیات انحلالی قرار گرفته‌اند، تشکیل نواحی GP با نرخ بسیار بالاتر نسبت به رسوب‌گذاری استاتیکی و با اندازه مشابه و متعاقباً افزایش سختی ناشی از آن گزارش شده است [۲۰، ۱۹]. مطابق یک تحقیق که در رابطه با پیرسازی آلیاژ 7075 پس از عملیات ECAP صورت گرفته، افزایش رسوبات دینامیکی پس از پاس‌های دوم و سوم و تهی شدن نسبی فاز زمینه از عناصر آلیاژی، به عنوان عامل کاهش قابلیت پیرسازی پس از ECAP عنوان شده است [15].

3-3-2- تأثیر پیرسازی

به منظور بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از ECAP، عملیات پیرسازی روی آن‌ها انجام شده است. تأثیر عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی بر سختی نمونه‌ها در دماهای 80 و 120°C مورد بررسی قرار گرفت. نمودار مربوط به تغییرات سختی در پیرسازی مصنوعی نمونه‌ها پس از ECAP در دمای 120°C در شکل 6- الف ارائه شده است. نمودار مربوط به 5 ساعت زمان انحلال حاصل تحقیقات پیشین روی نمونه مشابه است [18]. سختی کلیه نمونه‌ها در اثر پیرسازی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. پس از رسیدن به بیشینه، سختی کلیه نمونه‌ها روند نزولی پیدا کرد. کاهش سختی در این شرایط ناشی از رشد ذرات و پیرسازی بیش از حد می‌باشد.

حین پیرسازی آلیاژها پس از تغییر شکل پلاستیک شدید، افت سختی محتمل است [11]. به طوری که در دماهای بالا و با افزایش زمان، کاهش سختی ناشی از درشت شدن دانه‌ها بر افزایش سختی ناشی از شکل‌گیری ذرات رسوب غلبه کرده و سختی نمونه کاهش می‌یابد. مطابق شکل نمونه‌هایی که برای 10 و 15 ساعت تحت عملیات انحلال بوده‌اند به سختی بیشتری نسبت به نمونه‌ای که برای 5 ساعت تحت عملیات انحلال بوده می‌رسند. علت این امر افزایش انحلال ذرات

دانست [25].

با گذشت مدت زمان سه ماه و طی مرحله پیرسازی طبیعی در محل‌های مناسب رسوباتی تشکیل شده که حضور آن‌ها توسط پراش اشعه ایکس (شکل 7- نمودار ب) قابل تشخیص است. پیک‌هایی که در $2\theta \cong 20$ مشاهده می‌شود مطابق نتایج تحقیقات مشابه به نواحی $3GP$ با ترکیب شیمیایی $MgZn_2$ نسبت داده می‌شود. تشکیل این رسوب در تحقیقات مشابهی که فرایند ECAP را در دمای اتاق انجام داده‌اند گزارش شده است [15]. جابه‌جایی نسبی پیک از $2\theta = 20$ را می‌توان به کرنش وارده تحت ECAP مرتبط دانست. ضمن اینکه انحراف نسبی الگوی پراش از حالت عمومی در شبکه‌های کریستالی در هر دو الگو به ویژه الگوی ب دیده می‌شود [24]

3-4- آزمون کشش

به منظور بررسی تأثیر عملیات انحلال، ECAP و پیرسازی آزمون کشش بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. مشخصات نمونه‌های کشش در جدول 4 و نتایج این آزمون در جدول 5 مشخص شده است. برای مقایسه بهتر، نتایج تحقیقات قلعه-بندی و همکاران نیز درج شده است [18]. آن‌ها نمونه‌ها را پس از عملیات انحلال به مدت 5 ساعت در دمای 500 درجه و ECAP در دمای 80 و 100 درجه تحت پیرسازی قرار داده و سپس آزمون کشش روی آن‌ها صورت گرفته است. (نمونه‌های شماره 2 و 4) مطابق نتایج استحکام تسلیم نمونه شماره 2 با 5 ساعت زمان انحلال از نمونه مشابه با 10 ساعت زمان انحلال بیشتر است. (نمونه شماره 1) علت این امر را باید حضور ترکیبات بین فلزی درشت‌دانه در نمونه شماره 2 دانست که زمان 5 ساعت برای انحلال کامل آن‌ها کافی نبوده است.

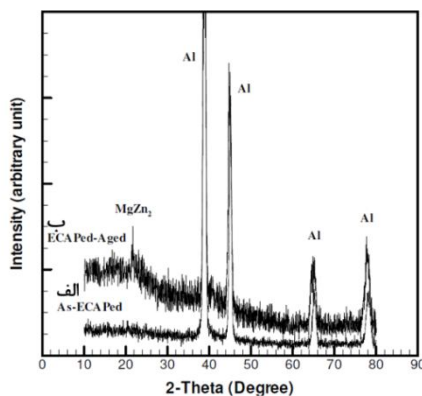


Fig. 7 XRD results a) before b) after natural aging for 3 months [24]
شکل 7 پراش اشعه ایکس نمونه الف) قبل و ب) پس از پیرسازی طبیعی به مدت سه ماه [24]

هر دو نمودار شکل 6- الف و شکل 6- ب روند مشابهی را در مورد زمان رسیدن به سختی بیشینه گزارش می‌کنند. در هر دو نمودار مقادیر بیشینه سختی در زمان‌های طولانی‌تری برای نمونه‌های با زمان انحلال 15 و 10 ساعت به نسبت نمونه با زمان انحلال 5 ساعت حاصل شد. علت این امر را می‌توان با میزان انحلال ذرات رسوبی در مرحله تشکیل محلول جامد مرتبط دانست (شکل 3). انحلال بیشتر ذرات بین فلزی در مرحله تشکیل محلول جامد، منجر به افزایش زمان لازم برای رسوب‌گذاری مجدد آن‌ها در مرحله پیرسازی می‌گردد.

با کاهش دمای پیرسازی، زمان رسیدن به سختی بیشینه و میزان آن افزایش یافته است (مورد دوم در نمونه‌ای که به مدت 5 ساعت تحت عملیات انحلال بوده). این روند در تحقیقاتی که توسط کیم¹ و همکاران [21]، دادبخش و همکاران [22]، آنجلا² و همکاران [23] بر پیرسازی آلیاژ آلومینیوم بعد از ECAP صورت گرفته نیز مشاهده می‌شود. زیرا اگر چه کم شدن دمای پیرسازی سبب کاهش نرخ شکل‌گیری ذرات رسوب خواهد شد، اما کاهش اندازه و افزایش تعداد ذرات رسوب را به دنبال خواهد داشت. این امر با توجه به کاهش متوسط فاصله ذرات رسوب، سبب افزایش سختی و خواص استحکامی آلیاژ می‌گردد [11]. همچنین با کاهش دمای پیرسازی اثر درشت دانه شدن نیز کاهش خواهد یافت که این موضوع نیز می‌تواند در رسیدن به بیشترین میزان سختی مؤثر باشد. اگرچه این افزایش در نمونه‌های با 10 و 15 ساعت زمان انحلال مشاهده نمی‌شود، اما با توجه به شیب صعودی نمودار سختی آن‌ها در دمای پیرسازی 80 درجه و کندی نسبی فرایند پیرسازی در این دما، می‌توان روند مشابهی را در زمان‌های طولانی‌تر برای این نمونه‌ها نیز متصور بود.

3-3-3- تحلیل پراش اشعه ایکس

شکل 7 نتایج حاصل از پراش اشعه آلیاژ 7075 که به مدت 5 ساعت تحت عملیات انحلال در دمای 500 درجه بوده را نشان می‌دهد [24]. مطابق شکل در نمودار الف که الگوی پراش اشعه ایکس نمونه بلافاصله بعد از ECAP را نشان می‌دهد، فاز آلومینیوم به تنهایی فاز غالب نمونه بوده و میزان سایر فازها در محدوده قابل تشخیص برای دستگاه وجود ندارد. علت این موضوع را می‌توان انحلال نسبی ذرات رسوبی و همچنین کاهش تأثیر آن‌ها بر الگوی پراش، بر اثر خرد شدن تحت کرنش شدیدی که حین تغییر شکل بر نمونه وارد می‌شود،

1. Kim
2. Angella

3. Guinier-Preston

جدول 4 مشخصات نمونه‌های کشش

Table 4 Tensile test samples specifications

شماره نمونه	زمان انحلال (ساعت)	دمای پیرسازی (درجه سانتیگراد)	زمان پیرسازی (ساعت)
1	10	80	350
2	5	80	150
3	10	120	48
4	5	100	100

جدول 5 نتایج تست کشش

Table 5 Tensile test results

شماره نمونه	1	2	3	4
استحکام تسلیم (MPa)	513	525	515	495
استحکام نهایی (MPa)	575	562	566	538
تغییر طول نسبی نهایی (%)	9/6	9	10	10/4

است، ناهمگونی توزیع ترکیبات بین فلزی در نقاط مختلف ریزساختار است. تحقیقات متعدد روی آلیاژ 7075 حاکی از تأثیر شرایط مراحل انحلال و پیرسازی بر تمرکز عناصر آلیاژی در نواحی مرزدانه می‌باشد [26،27]. مطابق این تحقیقات، دمای مراحل انحلال و پیرسازی مهمترین عوامل کنترل‌کننده نسبت عناصر آلیاژی در نقاط مختلف ریزدانه، به خصوص در مرزدانه می‌باشند. در این بین دمای مرحله انحلال مهمترین عامل در این زمینه به شمار می‌رود [28]. با توجه به موارد یادشده و امکان ایجاد تغییرات در خواص مکانیکی آلیاژ 7075 در نواحی مرزدانه‌ای، آزمون میکروسختی در نواحی یاد شده برای بررسی کیفیت این پدیده صورت گرفت. نمونه مورد مطالعه پس از 10 ساعت عملیات انحلال در دمای 500 درجه تحت ECAP و پیرسازی در دمای 120 درجه برای 48 ساعت قرار گرفته است.

جدول 6 میزان بار اعمالی در هریک از نواحی دانه و مرزدانه و عمق آثار حاصل را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، بار 15 گرم عمق اثر کمتری در نواحی نزدیک به مرز دانه ایجاد کرده است. این امر نشان دهنده سختی نسبی این نواحی است. تغییرات سختی این نواحی در شکل 9 قابل مشاهده است. علت تفاوت میزان سختی در نواحی مجاور مرزدانه را باید ناهمگونی توزیع عناصر آلیاژی در سطح دانه دانست.

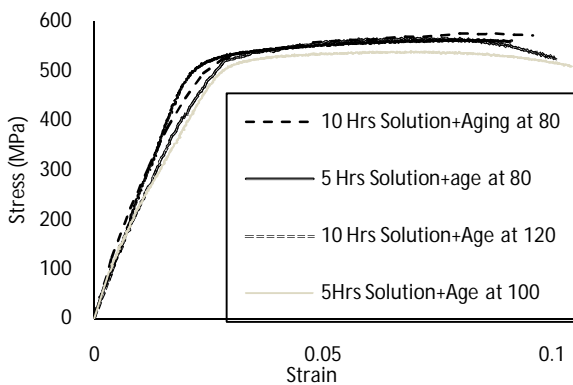


Fig. 8 Tensile test results

شکل 8 نتایج آزمون کشش

جدول 6 بار اعمالی در هریک از نواحی دانه و مرزدانه و عمق آثار حاصل

Table 6 Loading force and indentation depth in central and boundary regions

عمق نفوذ در مرکز دانه (μm)	عمق نفوذ در مرز دانه (μm)	بار (gf)
1/788	1/832	15
2/213	2/218	25
3/098	3/104	50
5/521	5/545	100

شکل 8 نمودارهای حاصل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل نمونه شماره 4 که پس از 5 ساعت عملیات انحلال در دمای 100 درجه تحت پیرسازی قرار گرفته است، استحکام تسلیم و نهایی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. علت این امر درشت دانه شدن در دمای پیرسازی است. نمونه‌ها پس از پیرسازی در دمای 80 درجه استحکام تسلیم بیشتری نشان می‌دهند. استحکام نمونه شماره 4 با کاهش دمای پیرسازی به 80 درجه، از 495 به 525 MPa افزایش می‌یابد. (نمونه شماره 2) علت این امر را باید تشکیل رسوبات ریز و کندی درشت‌دانه شدن در نمونه‌هایی که در دمای 80 درجه پیر شده‌اند دانست. سختی این نمونه نیز به همین علت بیشتر از نمونه شماره 4 است. (94/6 در برابر 93 HRB) استحکام تسلیم نمونه شماره 3 با کاهش دمای پیرسازی افزایش پیدا نکرد. (نمونه شماره 1) علت این امر عدم رسوب‌گذاری کامل نمونه شماره 1 است. افزایش تغییر طول نهایی در نمونه‌هایی که در دمای بالاتر تحت پیرسازی قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود. افزایش دمای پیرسازی از 80 به 120 درجه (نمونه‌های شماره 1 و 3) و از 80 به 100 (نمونه‌های شماره 2 و 4) به ترتیب سبب افزایش 0/4 و 1/4 درصدی تغییر طول نسبی نهایی گشته که ممکن است علت آن افزایش متوسط اندازه دانه باشد.

3-5- میکروسختی

متعاقب آن‌چه ذکر شد عملیات حرارتی از عوامل مهم تأثیرگذار بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد. حوزه دیگری که متأثر از عملیات حرارتی به ویژه عملیات انحلال

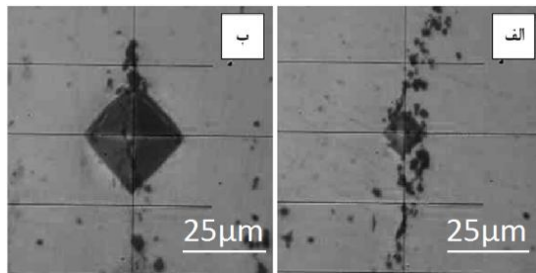


Fig. 10 Impression in boundary region under a) 15 grf and b) 100 gf loading

شکل 10 بارگذاری در نواحی مرزی: الف) بار 15 گرم ب) بار 100 گرم

افزایش زمان عملیات انحلال از 5 به 10 و 15 ساعت، سبب افزایش انحلال فازهای رسوبی و در نتیجه سبب کاهش سختی می‌شود.

پیرسازی در دمای 120 درجه سبب افزایش سختی کلیه نمونه‌ها تا حد مشخصی شده و پس از آن با بیش از حد پیر شدن نمونه‌ها، سختی رو به کاهش می‌گذارد. سختی بیشینه برای نمونه‌ها با زمان انحلال 5، 10، و 15 ساعت به ترتیب برابر 92/2، 97/5 و HRB97/6 بوده و به ترتیب پس از 28، 49 و 71 ساعت پس از آغاز عملیات پیرسازی حاصل شده است. مورد آخر حاکی از بیشترین میزان سختی بوده که طی تحقیق جاری در نمونه حاصل شده و به عنوان شرایط بهینه عملیات حرارتی پیشنهاد می‌گردد.

با افزایش زمان انحلال نمونه‌ها، سختی بیشینه حاصل طی پیرسازی در دمای 120 درجه افزایش می‌یابد. علت این امر انحلال بیشتر ذرات رسوبی درشت در مرحله انحلال و تشکیل رسوباتی پراکنده در مرحله پیرسازی است.

پیرسازی در دمای 80 درجه سبب افزایش سختی کلیه نمونه‌ها می‌گردد ولی با توجه به کند بودن نسبی فرایند در این دما، افت سختی در اثر پیرسازی بیش از حد مشاهده نمی‌شود.

نتایج میکروسختی در نواحی مرکزی و مجاور مرزدانه نشان از سختی نسبی مرزدانه دارد که ناشی از ناهمگونی پراکندگی ذرات بین فلزی در ریزساختار و تجمع آن‌ها در ناحیه مرز دانه است.

5- تقدیر و تشکر

با تشکر از آقای مهندس محمود قلعه‌بندی برای مساعدت در طی انجام پژوهش و خانم مهندس سارا عبدالعزیزی برای ویراستاری متن و کمک‌های بی‌دریغشان.

6- مراجع

[1] S. R. Kumar, K. Gudimetl, P. Venkatachalam, B.

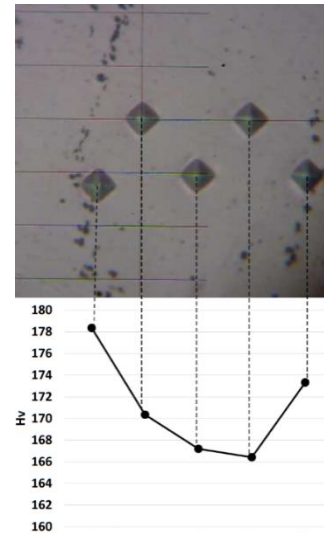


Fig. 9 Hardness gradient in a sample's grain after solution treatment at 500 degrees for 10 hours, ECAP and aging at 120 degrees for 48 hours

شکل 9 تغییرات سختی در یک دانه مورد مطالعه، پس از 10 ساعت انحلال در دمای 500 درجه، ECAP و پیرسازی در دمای 120 درجه برای 48 ساعت

توزیع عناصر آلیاژی در ریزساختار آلیاژ 7075 پس از عملیات انحلال و پیرسازی متعاقب یکنواخت نبوده و ممکن است بسیار پیچیده باشد. بسته به شرایط دمایی این دو مرحله، مرزدانه‌ها ممکن است محل تمرکز نسبی عناصر منیزیم، روی، مس، آهن و یا سیلیسیوم باشند [26].

با اعمال بار بیشتر از 15 گرم، اختلاف عمق حاصل در نواحی مرکزی و مجاور مرزدانه کاسته می‌شود. مطابق شکل 10 ضخامت نواحی مجاور مرزدانه محدود است و از آنجا که افزایش بار، افزایش مساحت اثر را در پی دارد، مساحت اثر حاصل از بارگذاری با بارهای 25 گرم و بالاتر، بیشتر شامل نواحی خارج از مرزدانه شده و نشان دهنده سختی مرزدانه نمی‌بود.

4- جمع‌بندی

نمونه آلیاژ آلومینیوم 7075 پس از عملیات انحلال و یک پاس ECAP افزایش قابل توجهی در میزان سختی نشان می‌دهد که این امر علاوه بر ایجاد ساختاری ریزدانه، ناشی از تشکیل رسوباتی است که به صورت دینامیک، تحت اثر کرنش وارده در حین تغییر فرم، در نمونه ایجاد می‌شود.

بررسی میکروساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که عملیات ECAP روی نمونه آلیاژ آلومینیوم 7075 سبب تشکیل ساختار ریزدانه در سطح مقطع و ساختاری کشیده در راستای طولی می‌گردد.

- for the processing of UFG materials, *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146, 1996.
- [13] C. Kammer, *Aluminium Handbook Fundamentals and Materials*, vol.1, First Edition, Aluminium-Zentrale, Dusseldorf, 1999.
- [14] Totten, G. E.; MacKenzie, D. S.; *Handbook of aluminum physical metallurgy and processes*, Volume 7, Marcel Dekker Inc, 2003.
- [15] Shaeri, M.H.; Shaeri, M.; Salehi, M.T.; Seyyedain, S.H.; Abutalebi, M.R.; Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 25, pp. 159–168, 2015.
- [16] Ruslan Z.V.; Terence, G. L.; Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, Vol 51, pp. 881–981, 2006.
- [17] Komura, S.; Horita, Z.; Nemoto, M.; Langdon, T. G.; Influence of stacking fault energy on microstructural development in equal-channel angular pressing, *Materials Research*, Vol. 14, No. 10, pp. 4044-4050, 1999.
- [18] Ghalehbandi, S. M.; Fallahi Arezoodar, A.; Hosseini-Toudeshky, H.; Influence of aging on mechanical properties of equal channel angular pressed aluminum alloy 7075, *Engineering Manufacture*, 2015
- [19] Sitdikov, V.D.; Chizhov, P.S.; Murashkin, M.Yu.; Goldenko, A.A.; Valiev, R.Z.; X-ray studies of dynamic aging in an aluminum alloy subjected to severe plastic deformation, *Materials Characterization*, Vol. 110, pp. 222–227, 2015.
- [20] Angle x-ray scattering study of dynamic precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Philosophical Magazine*, Vol. 83, No. 6, pp. 677–692, 2003.
- [21] Kim, W. J.; Chung, C. S.; Ma, D. S.; Hong, S. I.; Kim, H. K., Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging, *Scripta Materialia*, Vol. 49, pp. 333–338, 2003.
- [22] Dadbakhsha, S.; Taheria, A.K.i.; Smith, C.W.; Strengthening study on 6082 Al alloy after combination of aging treatment and ECAP process, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4758–4766, 2010.
- [23] Angella, G.; Bassani, P.; Tuissi, A.; Vedani, M.; Aging behaviour and mechanical properties of a solution treated and ECAP processed 6082 alloy, *Materials Transactions*, Vol. 45, No. 7, pp. 2282–2287, 2004.
- [24] Ghalehbandi, S. M.; Arezoodar, A. F.; Hosseini-Toudeshky, H.; Fatigue crack growth resistance of 7075 Al alloy after equal channel angular pressing, *Engineering Manufacture*, 2016.
- [25] Kumar, S. R.; Gudimetl, K.; Venkatachalam, P.; Ravisankar, K. Jayasankar, Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A* 533, pp. 50-54, 2012.
- [2] D. G. Morris, M. A. Munoz-Morris, Microstructure of severely deformed Al–3Mg and its evolution during annealing, *Acta Materialia* 50, pp. 4047–4060, 2002.
- [3] S. Lee, A. Utsunomiya, H. Akamatsu, K. Neishi, M. Furukawa, Z. Horita, Influence of Scandium and Zirconium on grain stability and superplastic ductilities in UFG Al-Mg alloys, *Acta Materialia* 50, pp. 553–564, 2002.
- [4] C. M. Cepeda-Jimenez, J. M. Garcia-Infanta, A. P. Zhilyaev, O. A. Ruano, F. Carreno, Mechanical properties at room temperature of an Al–Zn–Mg–Cu alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, pp. 636–643, 2011.
- [5] W. F. Smith; editor, *Structure and properties of engineering alloys*, New York: McGraw-Hill; p. 214 [Chapter 5–9], 1993.
- [6] Z. Horita, T. Fujinami, M. Nemoto, T. G. Langdon, Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing, *Metallurgical and Materials Transactions* 117, pp. 288-292, 2001.
- [7] M.H. Shaeri, M.T. Salehi, S.H. Seyyedain, M.R. Abutalebi, J.K. Park, Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment, *Materials and Design* 57, pp. 250–257, 2014.
- [8] W. J. Kim, J. K. Kim, H. K. Kim, J. W. Park, Y. H. Jeong, Effect of post equal-channel-angular-pressing aging on the modified 7075 Al alloy containing Sc, *Journal of Alloys and Compounds*. 450, pp. 222–228, 2008.
- [9] W. J. Kim, C. S. Chung, D. S. Ma, S. I. Hong, H. K. Kim, Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging, *Scripta Materialia*, 49, pp. 333–338, 2003.
- [10] L. J. Zheng, C. Q. Chen, T. T. Zhou, P. Y. Liu, M. G. Zeng, Structure and properties of ultrafine-grained Al-Zn-Mg-Cu and Al-Cu-Mg-Mn alloys fabricated by ECAP, *Material Characterization* 49, pp. 455-461, 2003.
- [11] S. K. Panigrahi, R. Jayaganthan, Effect of ageing on microstructure and mechanical properties of bulk, cryorolled and room temperature rolled Al 7075 alloy, *Journal of Alloys and Compounds*. 509, pp. 9609–9616, 2011.
- [12] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, Principle of equal channel angular pressing

- [27] Shastry, C. R.; Levy, M.; Joshi, A.; Effect of solution treatment temperature on stress corrosion susceptibility of 7075 aluminium alloy, *Corrosion Science*, Vol. 21, No. 9, pp. 673-688, 1981.
- [28] Ibrahim, M.F.; Samuel, A.M.; Samuel, F.H.; A preliminary study on optimizing the heat treatment of high strength Al-Cu-Mg-Zn alloys, *Materials and Design*, Vol. 57, pp. 342-350, 2014.
- Ravisankar, B.; Jayasankar, K.; Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering*, A 533, pp. 50-54, 2012.
- [26] Joshi, A.; Shastry, C. R.; Levy, M.; Effect of heat treatment on solute concentration at grain boundaries in 7075 aluminum alloy, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21, pp. 673-688, 1981.