مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 323-332

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی و مطالعه تجربی تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژ آلومینیوم 7075 با استفاده از فرایند پرس- اکستروژن مکرر

بهزاد بینش[1*]، مهرداد آقایی خفری[2]، محمد دانشی کهنی[3]

1- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بناب، بناب
2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران
3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران
* بناب، صندوق پستی 5551761167، b.binesh@bonabu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 اردیبهشت 1396
پذیرش: 28 تیر 1396
ارائه در سایت: 20 مرداد 1396

کلید واژگان:
تغییر شکل پلاستیک شدید
مواد فوق‌ریزدانه
پرس- اکستروژن مکرر
خواص مکانیکی

چکیده

در این پژوهش، تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژ آلومینیوم 7075 با استفاده از یک فرایند جدید و براساس ترکیب فرایندهای مرسوم پرس و اکستروژن مستقیم بررسی شد. در این فرایند که تحت عنوان پرس- اکستروژن مکرر نامیده می‌شود، نمونه‌های استوانه‌ای ابتدا تحت فرایند پرس و سپس اکستروژن در دمای 250 °C به تعداد سیکل‌های مختلف قرار گرفتند. طراحی قالب با در نظر گرفتن امکان انجام هر دو فرایند پرس و اکستروژن توسط یک قالب صورت پذیرفت و فرایند به‌طور موفقیت‌آمیز به تعداد حداکثر چهار سیکل بر روی نمونه‌ها آزمایش شد. از روش المان محدود به‌منظور شبیه‌سازی رفتار تغییر شکل آلیاژ در حین فرایند پرس- اکستروژن مکرر استفاده شد و توزیع کرنش برای نمونه‌های تغییر شکل بدست آمد. نتایج شبیه‌سازی المان محدود مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج مشاهدات ریزساختاری نشان داد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بیشترین میزان کرنش مؤثر مربوط به ناحیه مرکزی نمونه‌ها می‌باشد. رفتار تغییر شکل و الگوی سیلان نمونه‌ها درحین فرایند پرس- اکستروژن مکرر براساس نتایج تجربی و شبیه‌سازی بحث شد. علاوه بر این، تأثیر میزان کرنش اعمالی بر خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های تغییر شکل یافته با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس- اکستروژن مکرر افزایش پیدا کرد.

Simulation and experimental study of severe plastic deformation of 7075 Al alloy processed by repetitive upsetting-extrusion

Behzad Binesh[1*], Mehrdad Aghaie-Khafri[2], Mohammad Daneshi-kohani[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
2- Department of Materials Science and Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3- Department of Aerospace Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 5551761167, Bonab, Iran, b.binesh@bonabu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 May 2017
Accepted 19 July 2017
Available Online 11 August 2017

Keywords:
Severe Plastic Deformation
Ultrafine-Grained Materials
Repetitive Upsetting-Extrusion Process
Mechanical Properties

ABSTRACT

In this study, severe plastic deformation of 7075 aluminum alloy was investigated using a new method based on the combination of conventional upsetting and direct extrusion. In this process, which is called repetitive upsetting-extrusion, cylindrical samples were first subjected to upsetting and were subsequently subjected to extrusion at 250 °C with various processing cycles. Die design was carried out considering the possibility of conducting both upsetting and extrusion by using a single die and the maximum of four RUE cycles was successfully performed on the samples. Finite element method was used to simulate the deformation behavior of 7075 alloy during repetitive upsetting-extrusion processing and the strain distribution was obtained for the deformed samples. The finite element simulation results correlated fairly well with the microstructural observations. Based on the simulation results, the maximum effective strain was observed at the central region of the samples. The deformation behavior and the flow pattern were discussed based on the experimental and the simulation results. In addition, the effect of applied strain on mechanical properties of processed samples was studied. Tensile strength and elongation of deformed samples increased with extending the number of repetitive upsetting-extrusion cycles.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مواد فلزی فوق‌ریزدانه و نانو ساختار به‌عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح شده‌اند که دارای خواص ویژه فیزیکی و مکانیکی نسبت به مواد درشت‌دانه می‌باشند. تاکنون روش‌های متعددی نظیر فشرده‌سازی توسط گاز[1] و آسیاب‌کاری گلوله‌ای[2] جهت تهیه مواد فوق‌ریزدانه توسعه پیدا کرده است [1]. روش‌های مذکور دارای قابلیت بالایی در تولید مواد فوق‌ریزدانه و نانو ساختار می‌باشند اما برخی معایب ازجمله ایجاد تخلخل و

[1] Gas condensation
[2] Ball milling

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Binesh, M. Aghaie-Khafri, M. Daneshi-kohani, Simulation and experimental study of severe plastic deformation of 7075 Al alloy processed by repetitive upsetting-extrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 323-332, 2017 (in Persian)

ناخالصی در ساختار پس از فرایند ساخت و مشکل بودن تولید قطعات حجیم توسط این روش‌ها، کاربرد آن‌ها را با محدودیت مواجه ساخته است. در طی سال‌های اخیر، به‌منظور غلبه بر این مشکلات فرآوری مواد فوق‌ریزدانه با اعمال روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید[1] (SPD) به‌طور قابل ملاحظه‌ای از سوی محققین مورد توجه قرار گرفته است [3,2]. فلزات و آلیاژهای فوق‌ریزدانه که با روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید تهیه می‌شوند از خواص مکانیکی عالی از قبیل استحکام و چقرمگی بالا و در عین‌حال قابلیت شکل‌پذیری بهتر برخوردار هستند [4].

اولین تحقیقات صورت گرفته در مورد فرآوری مواد فلزی فوق‌ریزدانه با استفاده از تغییر شکل پلاستیک شدید مربوط به اوایل دهه نود میلادی می‌باشد [1]. در این پژوهش‌ها امکان دستیابی به مواد حجیم فوق‌ریزدانه با ساختار دانه‌ای یکنواخت و هم‌محور با کسر زیادی از مرزهای بزرگ زاویه[2] از طریق اعمال کرنش‌های شدید به اثبات رسیده است. براساس گزارش‌های منتشر شده [4]، با استفاده از روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توان به اندازه دانه‌ای در حدود چند ده نانومتر دست یافت. پس از پژوهش‌های ابتدایی صورت گرفته در این زمینه، کار بر روی روش‌ها و تکنیک‌های مختلف در سال‌های اخیر ادامه یافته و تاکنون فرایندهای مختلفی معرفی و توسعه پیدا کرده است. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: پرس در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار[3] (ECAP) [6,5]، پیچش تحت فشار بالا[4] (HPT) [7]، فشار-اکستروژن تناوبی[5] (CEC) [8]، اکستروژن پیچشی[6] (TE) [9]، نورد تجمعی[7] (ARB) [10]، فورج چند محوری[8] (MDF) و فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی[9] (FSP) [11]. یکی دیگر از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید که اخیراً توسعه پیدا کرده است، فرایند پرس-اکستروژن مکرر[10] (RUE) می‌باشد [12]. با توجه به این‌که این فرایند تلفیقی از فرایندهای پرس و اکستروژن بوده و به تعداد سیکل‌های دلخواه قابلیت تکرار دارد، لذا مقدار کرنش‌های بزرگی را می‌تواند در ساختار ماده ایجاد نماید [14-12]. این موضوع می‌تواند به نحو مؤثری جهت دستیابی به ساختارهای فوق‌ریزدانه مورد استفاده قرار گیرد. بااین‌حال تحقیقات کمی بر روی فرایند پرس-اکستروژن مکرر و خواص ریزساختاری و مکانیکی نمونه‌های تغییر شکل داده شده توسط آن صورت گرفته است.

فرایند پرس-اکستروژن مکرر مطابق "شکل 1"، شامل دو مرحله اصلی پرس و اکستروژن می‌باشد. در این فرایند ابتدا یک نمونه استوانه‌ای در معرض پرس قرار گرفته و سپس تحت اکستروژن قرار می‌گیرد. در حین مرحله پرس، طول نمونه استوانه‌ای کاهش یافته و سطح مقطع آن افزایش پیدا می‌کند. در ادامه با انجام اکستروژن، طول نمونه افزایش و سطح مقطع آن کاهش می‌یابد. سیکل‌های پرس و اکستروژن می‌توانند به تعداد دفعات دلخواه جهت دستیابی به مقدار کرنش مؤثر موردنظر تکرار شوند [13]. قالب پرس-اکستروژن مکرر را می‌توان به سه ناحیه مختلف شامل حجم‌های V_1، V_2 و V_3، مطابق "شکل 1"، تقسیم نمود. قسمت‌های مختلف قالب به‌گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که $V_1 + V_2 = V_2 + V_3$. در حین پرس، نمونه حجم V_{up} $(V_1 + V_2)$ و در حین اکستروژن حجم V_{ex} $(V_2 + V_3)$ را پر می‌نماید. بنابراین، حجم نمونه موردنظر (V_w) برابر خواهد بود با $V_w = V_1 + V_2 = V_2 + V_3$. کرنش مؤثر در این فرایند برابر است با مجموع کرنش‌های ایجاد شده در مرحله پرس و اکستروژن. مقدار کرنش ایجاد شده در مرحله پرس برابر با $\varepsilon_{up} = 2\ln(D/d)$ و به‌طور مشابه مقدار آن در مرحله اکستروژن برابر $\varepsilon_{ex} = 2\ln(D/d)$ می‌باشد. لذا، مقدار کرنش مؤثر برای تعداد n سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر از رابطه زیر به‌دست می‌آید [14]:

$$\varepsilon = 4n\ln(\frac{D}{d}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، D قطر محفظه پرس، d قطر محفظه اکستروژن و n تعداد سیکل‌های تکرار فرایند می‌باشد.

فرایند پرس-اکستروژن مکرر برای اولین بار توسط آیزاوا و توکیموتو [13] جهت شکل‌دهی مواد پودری توسعه پیدا کرد و از سوی لیانکسی و همکارانش [12] به‌منظور شکل‌دهی نمونه حجیم آلیاژ آلومینیوم LY12 مورد استفاده قرار گرفت. اخیراً نیز بالاسوندار و راقو [15] با استفاده از فرایند پرس-اکستروژن مکرر و طرح قالب مناسب موفق به ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه در مس خالص و همچنین حذف عیوب ساختاری نظیر حفرات محوری و تاخوردگی شدند. تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های آلومینیوم خالص با انجام فرایندهای اکستروژن و سپس پرس در قالب‌های مجزا توسط زاهاریا و همکارانش [14] بررسی شد و مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در حین فرایند مورد مطالعه قرار گرفت.

آلیاژهای آلومینیوم سری 7xxx به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا، انعطاف‌پذیری مطلوب و خواص مقاومت به خوردگی عالی در کاربردهای هوافضا و اتومبیل‌سازی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژ 7075 به‌عنوان یکی از مهمترین آلیاژهای این سری، کاربرد وسیعی در ساخت قطعات حساس تحت تنش‌های بالا پیدا کرده است [16]. در طی سال‌های اخیر، تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژ 7075 با استفاده

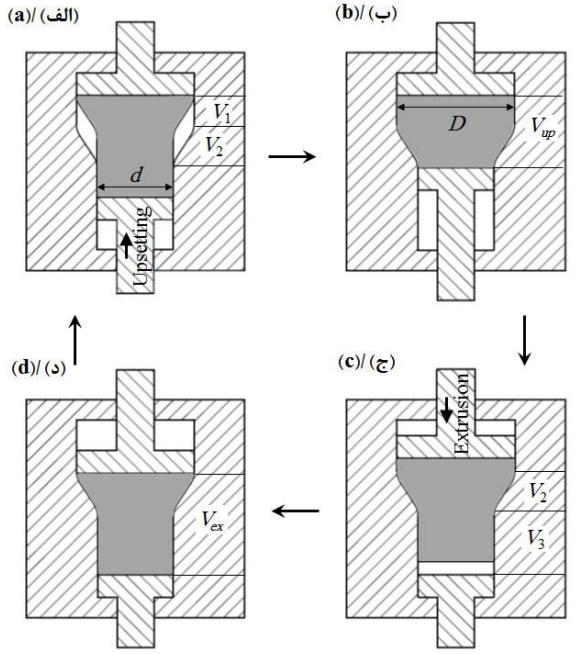

Fig. 1 Schematic illustration of the RUE process: (a) upsetting, (b) finishing of upsetting, (c) extrusion and (d) finishing of extrusion

شکل 1 شماتیک فرایند پرس- اکستروژن مکرر: (الف) پرس، (ب) اتمام مرحله پرس، (ج) اکستروژن، و (د) اتمام مرحله اکستروژن

[1] Severe plastic deformation
[2] High angle grain boundaries
[3] Equal channel angular pressing
[4] High pressure torsion
[5] Cyclic extrusion compression
[6] Twist extrusion
[7] Accumulative roll bonding
[8] Multi-directional forging
[9] Friction stir processing
[10] Repetitive upsetting extrusion

از فرایندهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است [17,11]. اما تاکنون تغییر شکل پلاستیک آن توسط فرایند جدید پرس- اکستروژن مکرر مطالعه نشده است.

با توجه به اینکه هر سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر شامل دو مرحله پرس و اکستروژن است، انجام بدون وقفه فرایند به‌ویژه در حالت گرم، نیازمند طراحی مناسب قالب و استفاده از حداقل تعداد قطعات می‌باشد. در این پژوهش، با طراحی و ساخت قالب جدید، فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژ آلومینیوم 7075 به روش پرس-اکستروژن مکرر برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار و الگوی تغییر شکل نمونه‌ها در طی فرایند بر اساس نتایج بررسی‌های ریزساختاری و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- مواد

در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم 7075 کار شده در حالت T6 و با ترکیب شیمیایی اسمی مطابق جدول 1 مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 30 و ارتفاع 45 میلی‌متر از ماده اولیه تهیه شده و سپس در دمای 485 °C به مدت 3 ساعت در کوره تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفتند. پس از کامل شدن زمان عملیات حرارتی، نمونه‌ها در داخل کوره سرد شدند.

2-2- طراحی و ساخت قالب پرس- اکستروژن مکرر

طراحی مجموعه قالب پرس-اکستروژن مکرر با توجه به فراهم نمودن امکان اجرای فرایند با استفاده از دستگاه پرس تک جهته انجام گرفت. بر این اساس، مجموعه قالب متشکل از پنج قسمت مختلف شامل نگهدارنده قالب، قالب، نگهدارنده سنبه، سنبه پرس و سنبه اکستروژن مطابق "شکل 2" طراحی و ساخته شد. اجزای مختلف قالب از جنس فولاد گرم‌کار H13 ساخته شده و سپس تحت عملیات حرارتی سخت‌کاری قرار گرفتند. سختی اجزای قالب پس از عملیات حرارتی برابر 55 راکول C بدست آمد.

ابعاد محفظه قالب جهت ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید در نمونه‌های استوانه‌ای مطابق "شکل 3" می‌باشد. طراحی محفظه قالب به‌منظور جلوگیری از تشکیل عیوب نظیر حفره و تاخوردگی درحین مرحله اکستروژن با در نظر گرفتن حداقل مقادیر مطابق روابط (2) و (3) به ترتیب برای ارتفاع (h_2) و زاویه (θ) منطقه تغییر شکل قالب (Vol#2 در شکل 3) انجام گرفت [18].

$$h_2 \geq \frac{d}{2} \qquad (2)$$

$$\theta \geq \tan^{-1}\left(\frac{r}{h_2}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{D-d}{2}}{\frac{d}{2}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{D-d}{d}\right) \qquad (3)$$

2-3- پرس - اکستروژن مکرر نمونه‌های 7075

جهت انجام فرایند پرس-اکستروژن مکرر ، قطعات مختلف قالب بر روی یک دستگاه پرس هیدرولیک تک محوری 250 تن و با در نظر گرفتن تجهیزات

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 7075 (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of 7075 Al alloy (wt.%).

Si	Cr	Mn	Fe	Mg	Cu	Zn	Al
0.14	0.13	0.28	0.28	2.41	1.58	5.31	فلز پایه

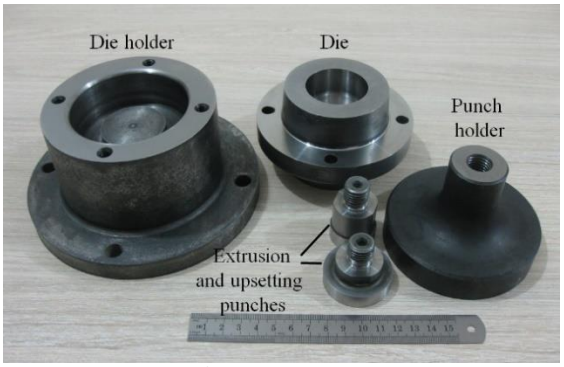

Fig. 2 RUE die part made from H13 tool steel

شکل 2 اجزاء قالب پرس-اکستروژن مکرر ساخته شده از جنس فولاد ابزار H13

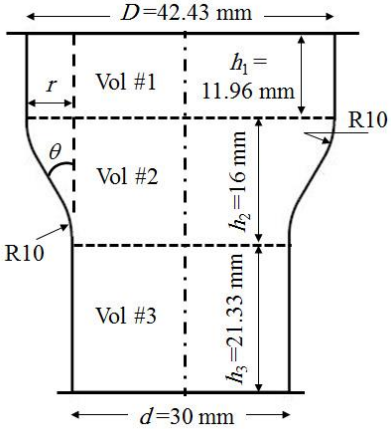

Fig. 3 Design and dimensions of RUE die cavity

شکل 3 طرح و ابعاد محفظه قالب پرس-اکستروژن مکرر

مناسب (کفشک و راهنما) نصب شد (شکل 4-الف و ب). قبل از انجام فرایند، نمونه‌ها با استفاده از یک کوره مقاومتی و قالب توسط یک کویل القایی با توان حدود 1 kW به مدت 30 دقیقه در دمای 250 °C پیش گرم شدند. از اسپری دی‌سولفید مولیبدن (MoS_2) به‌عنوان روان‌ساز جهت کاهش میزان اصطکاک بین نمونه‌ها و قالب در حین شکل‌دهی استفاده شد. نمونه‌ها بلافاصله پس از فرایند شکل‌دهی در آب خنک شدند. در این پژوهش، نمونه-های استوانه‌ای ابتدا تحت پرس و سپس اکستروژن قرار گرفتند. بدین ترتیب که ابتدا نمونه‌ی استوانه‌ای در درون قالب قرار داده شده و با اعمال نیروی پرس کاهش ارتفاع پیدا کرد. در ادامه به‌منظور اکسترود نمونه، تنظیمات قالب و سنبه تغییر داده شده و نمونه تحت عملیات اکستروژن قرار گرفت. با تکرار عملیات مذکور، فرایند پرس-اکستروژن مکرر به تعداد سیکل‌های یک، دو، سه و چهار سیکل بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و مرحله آخر در هر سیکل، فرایند اکستروژن در نظر گرفته شد.

2-4- شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی فرایند پرس-اکستروژن مکرر از روش المان محدود بهره گرفته شد. شبیه‌سازی المان محدود دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار دِفرم[1]-2D نسخه 10 انجام شد. ابتدا قطعات توسط نرم‌افزار سه بعدی کتیا[2] مدل شده و سپس وارد نرم‌افزار دفرم شدند. هدف از شبیه‌سازی مطالعه رفتار سیلان مواد در طی فرایند پرس-اکستروژن مکرر و همچنین تحلیل توزیع کرنش مؤثر بر

[1] Deform
[2] Catia

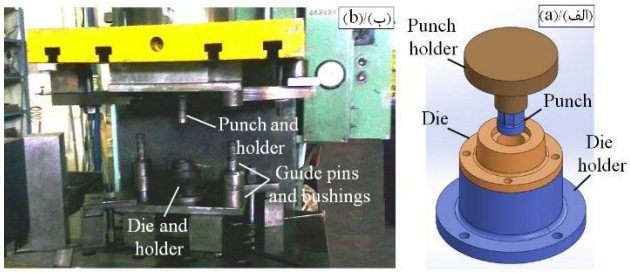

Fig. 4 (a) Schematic illustration and (b) set-up of RUE die on hydraulic press apparatus

شکل 4 (الف) شماتیک و (ب) مجموعه تنظیم شده قالب پرس-اکستروژن مکرر بر روی دستگاه پرس هیدرولیک

روی سطح مقطع نمونه‌ها در دمای 250 °C بوده است. با توجه به اینکه فرایند پرس- اکستروژن مکرر و همچنین هندسه نمونه‌های استوانه‌ای مورد آزمایش متقارن می‌باشند، اجزای قالب فرایند شامل سنبه‌ها، قالب و نمونه پیش فرم به‌صورت دوبعدی و مطابق "شکل 5" جهت شبیه‌سازی فرایند مدل‌سازی شد. پیش فرم مدل‌سازی شده، تغییر شکل‌پذیر و قالب و سنبه‌ها صلب فرض شدند. سپس مجموعه قالب و نمونه پیش فرم توسط المان‌های چهارگوش با چهار گره به‌صورت یکنواخت مش‌بندی شدند. مش‌بندی نمونه استوانه‌ای اولیه توسط 2000 المان صورت گرفت. شرایط اصطکاکی بین نمونه و قالب براساس مدل کولمب و با ضریب اصطکاک برابر 0.25 در نظر گرفته شد. در حین شبیه‌سازی و به‌علت تغییر شکل زیاد از تکنیک مش‌بندی تطبیقی جهت مش‌بندی مجدد خودکار استفاده شد. شبیه‌سازی برای چهار سیکل متوالی و هر سیکل شامل یک مرحله پرس و یک مرحله اکستروژن انجام پذیرفت. نتایج فرآیند شبیه‌سازی در انتهای هر مرحله و هر سیکل مورد بررسی قرار گرفت.

2-5- بررسی ریزساختاری و آزمایش‌های مکانیکی

از روش متالوگرافی استاندارد جهت مطالعه درشت ساختار و ریزساختار نمونه‌ها قبل و بعد از فرایند پرس-اکستروژن مکرر استفاده شد. نمونه‌های تغییر شکل یافته در راستای جهت اکستروژن مقطع زده شده و متالوگرافی شدند. نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سنباده SiC تا شماره 2000 سنباده‌زنی شده و درنهایت توسط خمیر الماسه 0.25 µm پولیش شدند. جهت بررسی درشت ساختار نمونه‌ها از محلول اچ چهار درصد HF استفاده شد. به‌منظور مشاهده ریزساختار و مطالعه سیلان مواد در نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر، از

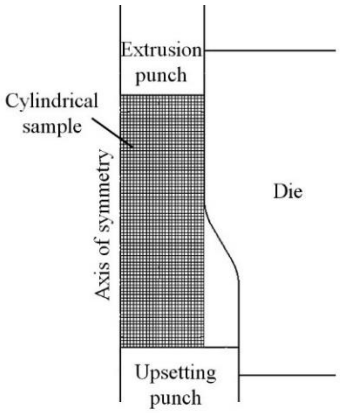

Fig. 5 Symmetric finite element model of RUE process

شکل 5 مدل المان محدود متقارن فرایند پرس-اکستروژن مکرر

محلول‌های اچ کِلر اصلاح شده[1] با ترکیب 2 - HNO_3 20 ml - H_2O 175 ml - HF 3 ml - HCl 1 ml و وِک[2] با ترکیب 100 ml - NaOH 1 g - $KMnO_4$ 4 g - H_2O بهره گرفته شد. بدین ترتیب که نمونه‌ها ابتدا به مدت 30 ثانیه با محلول کلر و سپس به مدت 20 ثانیه توسط محلول وک اچ شدند.

میکروسکوپ نوری مدل نئوفوت[3] 32 و میکروسکوپ الکترونی روبشی[4] (SEM) با تفنگ گسیل میدانی (FESEM) میرا تری تسکان[5] مجهز به سیستم طیف نگار تفکیک انرژی[6] (EDS) جهت بررسی‌های ریزساختاری و آنالیز فازها بکار گرفته شد و به منظور تعیین اندازه دانه نمونه‌ها، روش ترسیم خطوط متقاطع[7] مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور بررسی خواص استحکام کششی، آزمون کشش در دمای محیط مطابق استاندارد ASTM E8/E8M-09 انجام گرفت. برای انجام آزمون کشش، نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد نزدیک به نمونه‌های آزمایش با قطر 7 و طول 40 میلی‌متر توسط واترجت از نمونه‌های موردنظر تهیه شدند. پس از این مرحله نمونه‌های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E6 و E6M-09 از نمونه-های مذکور ساخته شدند. "شکل 6" نقشه ساخت نمونه‌های کشش را نشان می‌دهد. از دستگاه کشش 5 تن مدل سنتام اس تی ام[8] 600 جهت تعیین خواص کششی نمونه آلیاژ 7075 کارشده و نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر استفاده شد. جهت اطمینان از صحت نتایج، آزمون کشش سه مرتبه و با استفاده از سه نمونه تکرار شد.

اندازه‌گیری سختی به روش ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل ولپرت[9] صورت پذیرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار نمونه کارشده و همگن‌سازی شده

"شکل 7"، تصاویر میکروسکوپ نوری آلیاژ آلومینیوم 7075 کارشده و همگن-سازی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 7-الف" مشاهده می-شود، ریزساختار نمونه کارشده شامل دانه‌های بلوری کشیده شده در جهت فرایند اکستروژن اولیه و برخی رسوبات درشت که به‌طور عمده در امتداد مرزدانه‌ها جهت یافته‌اند، می‌باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDS بهره گرفته شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، این رسوبات شامل فازهای بین‌فلزی Al_2CuMg، $Al_6(Cu,Fe)$، Al_7Cu_2Fe و Mg_2Si می‌باشند. عناصر Zn، Mg و Cu به‌عنوان عناصر آلیاژی اصلی در آلیاژ آلومینیوم 7075، نقش مهمی در تشکیل رسوبات ایفا می‌کنند.

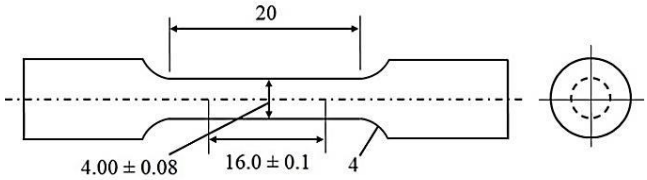

Fig. 6 Tensile test specimen according to ASTM E6 (dimensions in mm)

شکل 6 نمونه آزمون کشش براساس استاندارد ASTM E6 (ابعاد برحسب میلی‌متر)

[1] Modified Keller
[2] Weck
[3] Neophot
[4] Scanning electron microscope
[5] Mira3Tescan
[6] Energy dispersive spectroscopy
[7] Intercept method
[8] Santam STM
[9] Wolpert

در آلیاژهای سری 7xxx آلومینیوم، رسوبات ریز ($MgZn_2$ (η عامل اصلی استحکام بالای این گروه از آلیاژها می‌باشند [19]. این رسوبات با توجه به ابعاد نانومتری تنها با استفاده از میکروسکوپ TEM قابل مشاهده می‌باشند.

تصویر میکروسکوپ نوری نمونه همگن‌سازی شده (شکل 7-ب) نشان می‌دهد که پس از عملیات حرارتی ساختار دانه‌بندی جهت‌دار از بین رفته و دانه‌های هم‌محور در ریزساختار تشکیل می‌شوند. همچنین عملیات حرارتی منجر به ایجاد توزیع تقریباً یکنواختی از ذرات رسوب درشت در ریزساختار شده که با توجه به نتایج آنالیز SEM-EDS، این ذرات مشابه نمونه کارشده اولیه شامل رسوبات درشت بین‌فلزی Al_2CuMg، $Al_6(Cu,Fe)$، Al_7Cu_2Fe و Mg_2Si می‌باشند. علاوه بر این، ذرات رسوب $MgZn_2$ که ابعاد آن‌ها در اثر عملیات حرارتی درشت‌تر شده‌اند نیز در ریزساختار مشاهده شد. از آنجایی‌که این رسوبات دارای توزیع یکنواختی در ریزساختار می‌باشند، در حین تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توانند به‌عنوان مکان‌های مستعد جهت انباشت انرژی کرنشی عمل کنند. این امر می‌تواند به میزان قابل‌توجهی بر فرایند تبلور مجدد آلیاژ در حین عملیات حرارتی بعدی و ریز شدن اندازه دانه‌ها تأثیرگذار باشد [20].

3-2- الگوی سیلان و درشت ساختار

الگوی سیلان نمونه استوانه‌ای آلیاژ 7075 پس از چهار مرحله پرس و اکستروژن در طی فرایند پرس-اکستروژن مکرر در "شکل 8" نشان داده شده است. مطابق "شکل 8-الف"، پرس منجر به فشرده شدن خطوط سیلان در راستای محور تقارن می‌گردد (ناحیه Q). همچنین سیلان در راستای افقی نمونه جهت پر شدن حجم ناحیه 2 قالب باعث ایجاد انحنا در خطوط سیلان افقی و عمودی می‌شود. علاوه بر این، خطوط سیلان افقی در زیر ناحیه Q به شکل محدب درمی‌آیند. به محض اینکه نمونه در اثر فشار وارد منطقه پرس می‌شود (V_{up})، ماده مجاور دیواره قالب شروع به سیلان در جهت افقی می‌کند. درحالی‌که ماده در ناحیه مرکزی یا در راستای محور تقارن ابتدا در جهت عمودی حرکت کرده و سپس شروع به سیلان در راستای جهت افقی می‌نماید. این تغییر در رفتار تغییر شکل آلیاژ به علت شکل هندسی ناحیه 2 (V_2) می‌باشد که باعث می‌شود خطوط سیلان افقی به شکل محدب درآیند.

الگوی سیلان نمونه پرس شده در حین مرحله اکستروژن سیکل چهارم فرایند پرس-اکستروژن مکرر در "شکل 8-ب" نشان داده شده است. هنگامی‌که نمونه پرس شده با حرکت سنبه بزرگ اکسترود می‌شود، نمونه از نواحی 1 و 2 به‌تدریج خارج و وارد ناحیه 3 می‌شود. براساس جهت‌گیری خطوط سیلان افقی، نمونه اکسترود را می‌توان به سه منطقه P، Q و R، مطابق "شکل 8-ب" تقسیم نمود. با کاهش قطر نمونه در حین اکستروژن، جریانی از ماده از نواحی لبه به سمت مرکز یا محور تقارن سیلان پیدا می‌کند. این امر منجر به کاهش ارتفاع المان‌ها و افزایش پهنای آن‌ها در نواحی کناری و برعکس افزایش ارتفاع المان‌ها و کاهش پهنای آن‌ها و انحنا خطوط سیلان افقی در نواحی مرکزی نمونه (ناحیه P در شکل 8-ب) می‌شود. وقتی که نمونه به‌طور کامل از ناحیه 1 خارج شده و ناحیه 2 را در حین اکستروژن پر می‌کند، خطوط سیلان افقی در جهت اکستروژن امتداد می‌یابد (ناحیه R در شکل 8-ب). این امر به این خاطر است که تنها نواحی کناری نمونه تغییر شکل می‌دهد. همچنین ناحیه Q که درحین مرحله پرس با فشرده شدن المان‌ها به یکدیگر ایجاد شده است، همچنان در مرحله اکستروژن نیز با افزایش محسوسی در ارتفاع مش‌ها حفظ می‌شود.

در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی المان محدود، درشت ساختار بدست آمده توسط ماکرو اچ نمونه آلومینیوم 7075 پس از چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر با الگوی سیلان شبیه‌سازی شده مقایسه شد. "شکل 9" الگوی سیلان دانه‌ها را در قسمت‌های مختلف نمونه چهار سیکل به همراه الگوی تغییر شکل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی تغییر شکل شبیه‌سازی شده به‌خوبی با جهت‌گیری مکانیکی دانه‌ها که در حین فرایند پرس-اکستروژن مکرر ایجاد شده است، مطابقت دارد. البته لازم به توضیح است که برخی خطاهای ناشی از اثر اصطکاک نیز می‌تواند بر نتایج شبیه‌سازی تأثیرگذار باشد. اما با توجه به اینکه اختلاف فاحشی بین نتایج شبیه‌سازی المان محدود و نتایج تجربی مشاهده نمی‌شود، می‌توان گفت که این خطاها قابل چشم پوشی است.

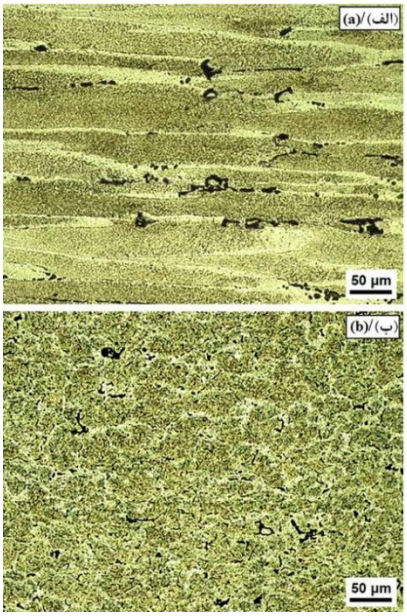

Fig. 7 Optical micrographs of (a) the wrought and (b) the homogenized 7075 alloy

شکل 7 تصاویر نوری آلیاژ 7075 (الف) کار شده و (ب) همگن‌سازی شده

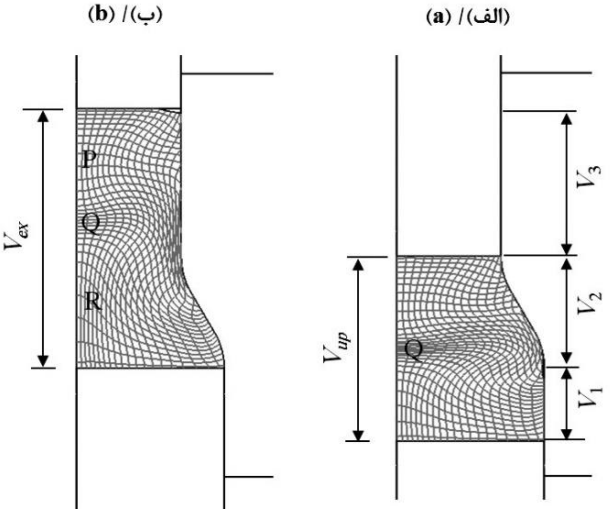

Fig. 8 Flow pattern of four-cycle RUE-processed sample after (a) upsetting and (b) extrusion

شکل 8 الگوی سیلان نمونه چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر پس از مرحله (الف) پرس و (ب) اکستروژن

3-3- توزیع کرنش

"شکل 10" توزیع کرنش مؤثر را در سطح مقطع نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر با تعداد سیکل‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاصل به صورت سه بعدی نشان داده شده است و به‌منظور راحتی نمایش کانتورهای کرنش مؤثر، قالب و سنبه‌ها حذف شده است. اختلاف رنگ کانتورهای کرنش نشان دهنده توزیع کرنش پلاستیک غیرهمگن در نقاط مختلف سطح مقطع می‌باشد. در نمونه یک سیکل، کمترین و بیشترین مقدار کرنش مؤثر به ترتیب برابر 0.17 و 1.78 بوده و مقدار کرنش مؤثر میانگین برابر 0.87 می‌باشد. با افزایش تعداد سیکل پرس-اکستروژن مکرر، مقدار کرنش مؤثر در نقاط مختلف سطح مقطع افزایش می‌یابد. پس از چهار سیکل، مقدار کرنش مؤثر میانگین به 3.34 افزایش یافته و مقادیر کمینه و بیشینه آن به ترتیب برابر 0.63 و 6.28 می‌باشند. بیشترین مقدار کرنش مؤثر در محل تلاقی نواحی 2 و 3 قالب (شکل 1) مشاهده می‌شود و قسمت‌های پایین و بالای نمونه‌های شکل‌دهی شده کمترین میزان کرنش را در مقایسه با مناطق دیگر تجربه می‌کنند. برای نمونه‌های دو و سه سیکل، مقادیر بیشینه کرنش مؤثر به ترتیب برابر 3.16 و 4.73 می‌باشند. نتایج به‌دست آمده به‌خوبی با مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه (1) مطابقت دارد. اختلاف جزئی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج محاسبه شده مربوط به برخی خطاهای شبیه‌سازی از جمله اثر اصطکاک است.

4-3- ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر

به‌منظور بررسی غیرهمگنی در ریزساختار نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر، شش نقطه (A تا F) در نواحی مختلف سطح مقطع نمونه چهار سیکل مطابق "شکل 11" انتخاب شد. ریزساختار این مناطق در "شکل‌های 11-الف" تا و [20] نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار در اغلب مناطق و به‌ویژه در مناطق نزدیک لبه نمونه دارای بافت (ساختار جهت-دار) است. این جهت‌گیری ریزساختار عمدتاً در طی مرحله اکستروژن و به علت اصطکاک شدید بین نمونه استوانه‌ای و قالب ایجاد می‌شود. دانه‌ها در نواحی کناری نمونه (ناحیه A) دارای پهنای کم بوده و به شکل کشیده می-باشند که به‌تدریج با حرکت به سمت نواحی مرکزی نمونه (ناحیه B تا C) به شکل هم‌محور درمی‌آیند. ناحیه D شامل ریزساختاری با بافت موجی شکل است که کاملاً با کانتور کرنش مشاهده شده در این ناحیه همخوانی دارد. در نواحی E و F نیز ریزساختار شامل دانه‌های کشیده شده در جهت اکستروژن می‌باشد، با این تفاوت که دانه‌ها در این مناطق در مقایسه با ناحیه A دارای پهنای بیشتر و کشیدگی بیشتری بوده و به عبارتی ریزساختار در نواحی E و F درشت‌تر است.

لیانکسی و همکارانش [12] مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در حین فرایند پرس-اکستروژن مکرر را بدین صورت تشریح نمودند که با وجود زاویه 45 درجه صفحه برش با راستای محور نمونه درحین مراحل پرس یا اکستروژن، جهت تغییر شکل دانه یا سلول توسط هر یک از این دو فرایند تغییر شکل کاملاً متفاوت است. در مرحله اکستروژن، تغییر شکل دانه‌ها به علت محدودیت قالب اکستروژن موازی محور نمونه می‌باشد. درحالی‌که، این تغییر شکل در حین مرحله پرس عمود بر محور نمونه است. این موضوع را می‌توان از روی الگوی سیلان شبیه‌سازی شده مطابق "شکل‌های 8-الف و ب" به وضوح مشاهده کرد. این امر باعث تشکیل ساختارهای سلولی و دانه‌های ریز هم‌محور در اثر تکرار فرایندهای پرس و اکستروژن می‌شود. همچنین زاهاریا و

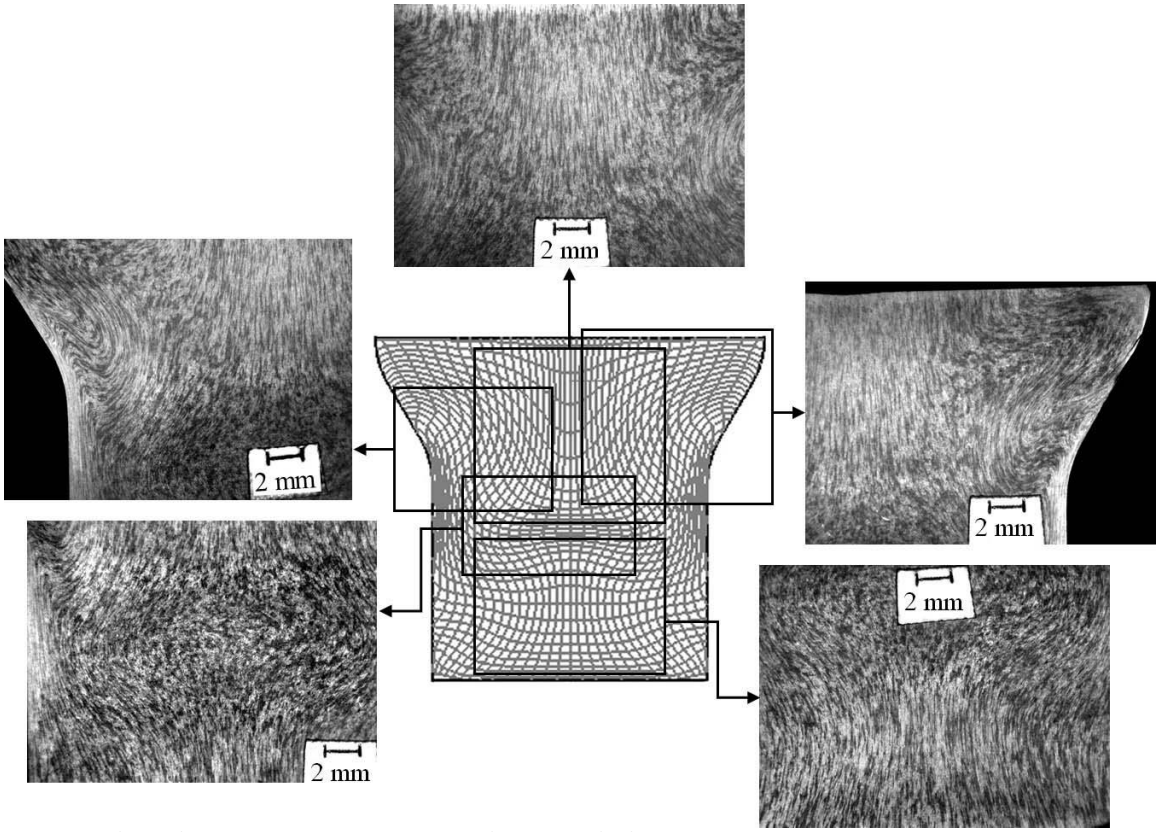

Fig. 9 Comparison of FEM flow pattern and experimental grain flow pattern for four cycle RUE-processed sample

شکل 9 مقایسه الگوی سیلان شبیه‌سازی شده و الگوی سیلان تجربی نمونه چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر

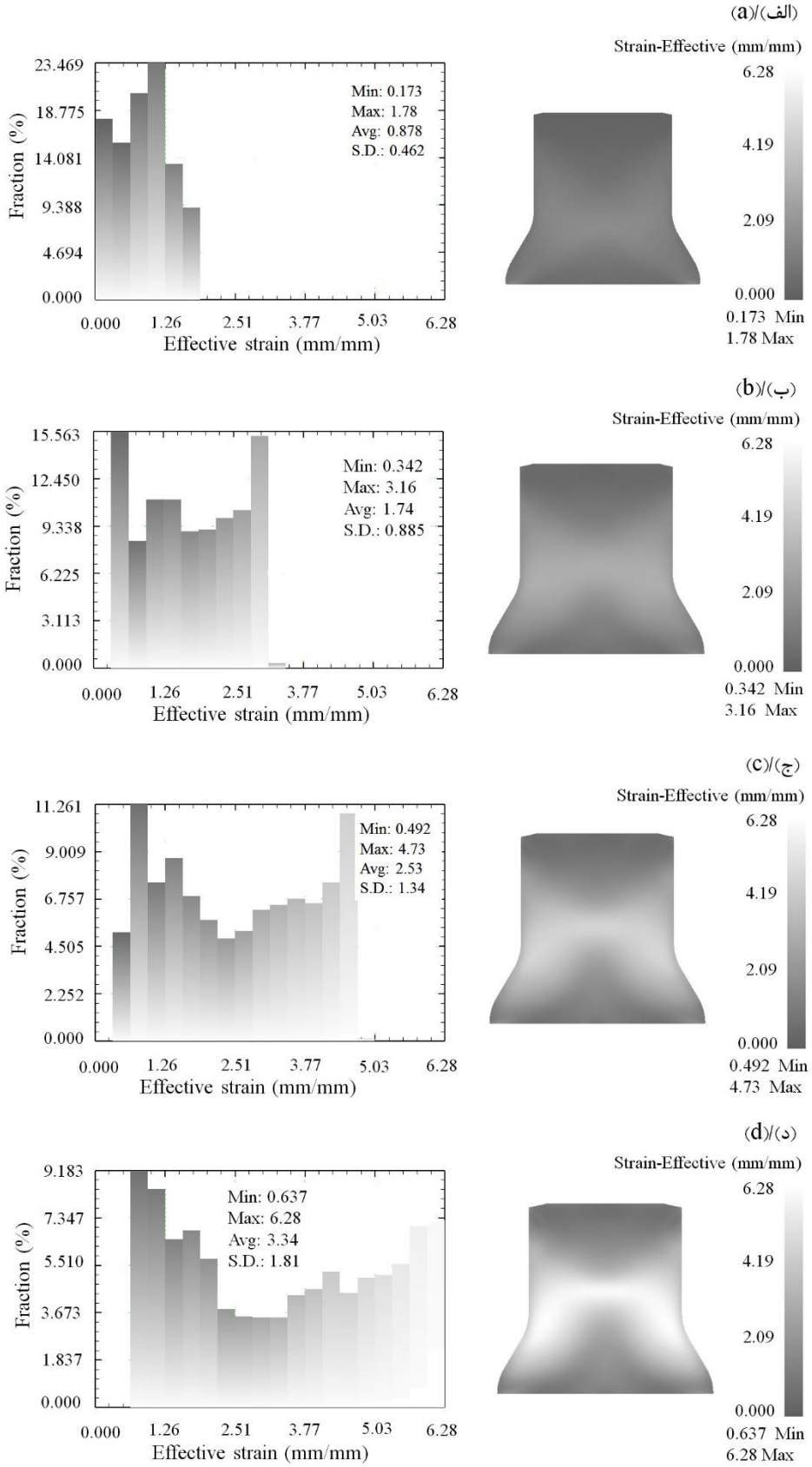

Fig. 10 Effective strain distribution of 7075 alloy: (a) RUE-1cycle, (b) RUE-2cycles, (c) RUE-3cycles and (d) RUE-4cycles

شکل 10 توزیع کرنش مؤثر نمونه‌های 7075: (الف) یک سیکل، (ب) دو سیکل، (ج) سه سیکل و (د) چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر

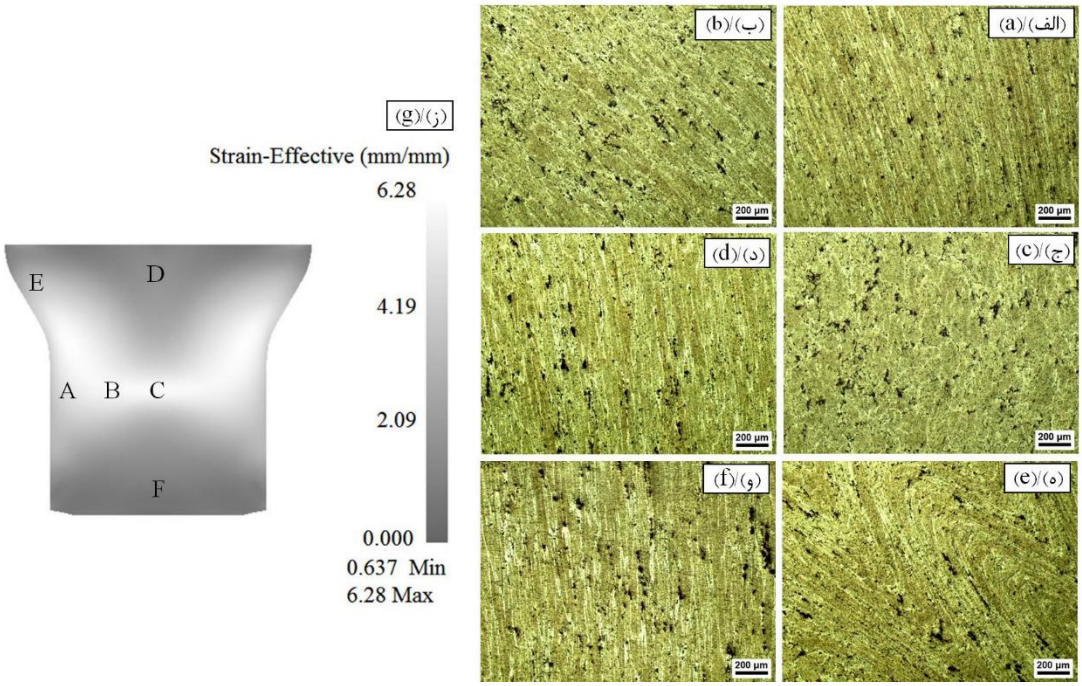

Fig. 11 Optical micrographs of (a) A, (b) B, (c) C, (d) D, (e) E, (f) F regions of a four cycle RUE-processed sample in (g) [20]

شکل 11 تصاویر میکروسکوپ نوری ناحیه (الف) A، (ب) B، (ج) C، (د) D، (ه) E، (و) F نمونه چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر در قسمت (ز) [20]

همکارانش [14] مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در حین فرایند اکستروژن و پرس مکرر را با استفاده از سطوح ناپیوستگی سرعت[1] و میدان خطوط لغزش[2] مطالعه نمودند. آنها پیشنهاد نمودند که ریز شدن دانه‌ها توسط سه مکانیزم اصلی صورت می‌گیرد: 1) کشیده شدن در طی مرحله اکستروژن، 2) ایجاد مرزهای جدید در داخل دانه زمانی که دانه‌ها از سطوح ناپیوستگی سرعت عبور می‌کنند و 3) خرد شدن و شکستن دانه‌ها در اثر تنش مماسی که باعث ایجاد نیروی برشی بر روی خطوط لغزش در حین فرایند پرس می‌شود.

"شکل 12" نتایج سختی نقاط مختلف سطح مقطع (1 تا 5 در شکل 12-ب) در راستای محور نمونه چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه مرکزی سطح مقطع دارای بیشترین مقدار سختی در مقایسه با سایر نقاط می‌باشد. این موضوع را می‌توان به میزان کرنش بیشتر ایجاد شده در ناحیه مرکزی نمونه تغییر شکل یافته نسبت داد. به‌طوری کلی با در نظر گرفتن پروفیل سختی و توزیع کرنش (شکل 10) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سختی با مقدار کرنش ایجاد شده در نقاط مختلف نمونه متناسب است.

"شکل 13" منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی نمونه همگن‌سازی شده و نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر را پس از اعمال تعداد سیکل‌های مختلف نشان می‌دهد. مقادیر استحکام کششی نهایی (UTS)، استحکام تسلیم (YS) و درصد ازدیاد طول قبل از شکست نمونه‌های مذکور در "شکل 14" با یکدیگر مقایسه شده است. نمونه همگن‌سازی شده در مقایسه با نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر دارای کمترین مقدار استحکام کششی نهایی و تسلیم می‌باشد. اما درصد ازدیاد طول آن به میزان قابل‌توجهی بیشتر از نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر است. با اعمال کرنش‌های بزرگ در ساختار آلیاژ در اثر فرایند پرس-اکستروژن مکرر دانسیته نابجایی‌ها در ساختار افزایش پیدا کرده و خود این نابجایی‌ها به عنوان مانع در مقابل حرکت یکدیگر عمل می‌کنند [20]. این عامل تغییر شکل بیشتر ماده را که توسط حرکت نابجایی‌های آزاد کنترل می‌شود، مشکل‌تر نموده و در نهایت منجر به افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری در مقایسه با نمونه همگن‌سازی شده اولیه می‌گردد.

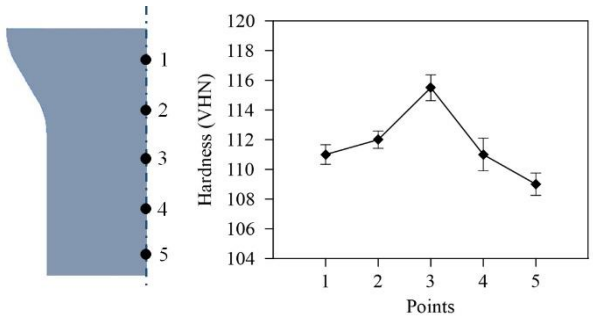

Fig. 12 Hardness of 1 to 5 points along the axis of four cycle RUE-processed sample

شکل 12 سختی نقاط 1 تا 5 در راستای محور نمونه چهار سیکل پرس-اکستروژن مکرر

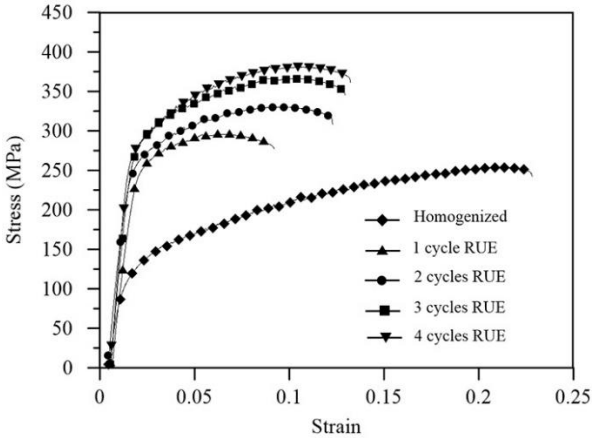

Fig. 13 Stress-strain curves of RUE-processed samples

شکل 13 منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های پرس-اکستروژن مکرر

[1] Velocity discontinuities surfaces
[2] Slip line field

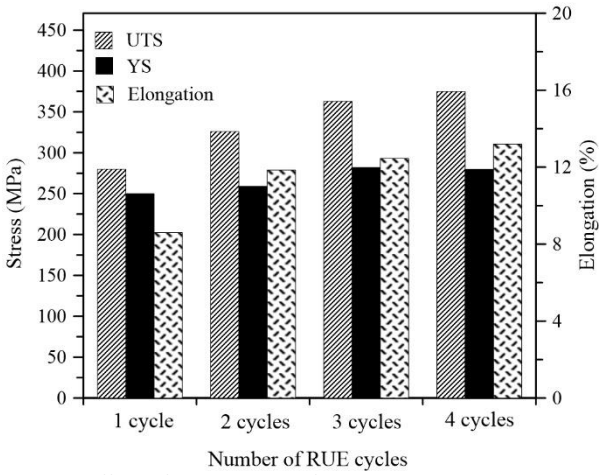

Fig. 14 Effect of the number of RUE cycles on UTS, YS and elongation

شکل 14 تأثیر تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر بر روی استحکام کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول

همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استحکام نهایی و استحکام تسلیم با افزایش تعداد سیکل پرس-اکستروژن مکرر افزایش پیدا می‌کند و این افزایش خواص استحکامی همراه با افزایش درصد ازدیاد طول می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، مقادیر استحکام نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه یک سیکل پرس-اکستروژن مکرر به ترتیب از 280 MPa، 250 MPa و 8.6% به 360 MPa، 280 MPa و 13.2% برای نمونه چهار سیکل افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر، مقدار کرنش و تغییر شکل بیشتری در ساختار آلیاژ ایجاد می‌گردد که این امر منجر به افزایش دانسیته نابجایی‌ها در ساختار ماده و درنتیجه افزایش استحکام می‌شود.

"شکل 15" تغییرات متوسط اندازه دانه ناحیه مرکزی نمونه‌ها با تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با افزایش تعداد سیکل و لذا افزایش میزان کرنش اعمالی اندازه دانه‌ها کاهش پیدا می‌کند. متوسط اندازه دانه برای نمونه یک سیکل برابر 54 µm بوده که این مقدار پس از انجام چهار سیکل به حدود 9 µm می‌رسد. براساس رابطه هال-پچ[1] [21]، استحکام تسلیم با مجذور اندازه دانه رابطه عکس دارد، بدین معنی که کاهش اندازه دانه منجر به افزایش استحکام تسلیم می‌شود. هنگامی‌که اندازه دانه کاهش می‌یابد، نابجایی‌ها مسافت کمتری را قبل از برخورد با مرزدانه‌ها می‌توانند طی کنند و پس از برخورد با این موانع (مرزدانه‌ها)، انباشت نابجایی در پشت مرزدانه‌ها اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش استحکام می‌شود.

بهبود میزان انعطاف‌پذیری با افزایش تعداد سیکل پرس-اکستروژن مکرر و همزمان با افزایش استحکام را می‌توان به این صورت توجیه نمود که با افزایش بیشتر کرنش ساختار، دانسیته نابجایی‌ها تا حد اشباع افزایش می‌یابد به نحوی که ساختار قادر به تحمل دانسیته بالاتر نابجایی نبوده و تشکیل ساختار سلولی نابجایی و مرزدانه‌های فرعی شروع می‌گردد. این سلول‌ها با افزایش بیشتر کرنش تبدیل به دانه‌های جدید با مرزهای بزرگ زاویه می‌شوند [22]. این امر علیرغم کاهش اندازه دانه با افزایش میزان کرنش (شکل 15)، باعث از بین رفتن و کاهش دانسیته نابجایی‌ها می‌شود. در نتیجه ادامه تغییر شکل ماده راحت‌تر صورت پذیرفته و انعطاف‌پذیری بهبود پیدا می‌کند. این

[1] Hall-Petch

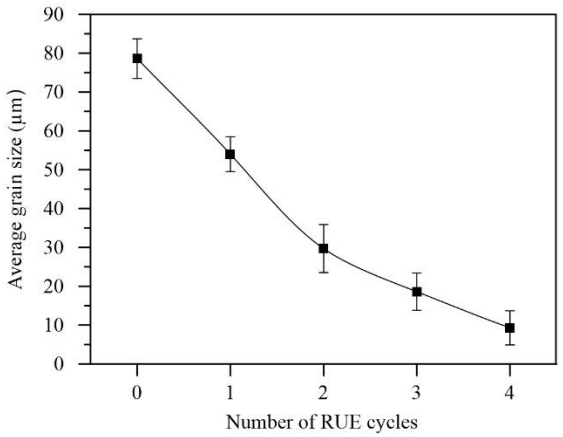

Fig. 15 Variations in the average grain size versus the number of RUE cycles

شکل 15 تغییرات متوسط اندازه دانه برحسب تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر

رفتار در مورد برخی دیگر از آلیاژهای آلومینیوم نیز درنتیجه افزایش کرنش ساختار در طی فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید گزارش شده است [23,22].

4- نتیجه‌گیری

فرایند پرس-اکستروژن مکرر حداکثر تا چهار سیکل به‌طور موفقیت‌آمیز جهت تغییر شکل پلاستیک شدید آلیاژ 7075 مورد استفاده قرار گرفت. از شبیه‌سازی المان محدود به‌منظور مطالعه رفتار سیلان و الگوی تغییر شکل آلیاژ در حین فرایند پرس-اکستروژن مکرر بهره گرفته شد. خلاصه نتایج بدست آمده از بررسی‌های تجربی و شبیه‌سازی فرایند به شرح ذیل می‌باشد:

- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی به روش المان محدود نشان داد که الگوی تغییر شکل شبیه‌سازی شده به‌خوبی با الگوی سیلان دانه‌ها در حین فرایند پرس-اکستروژن مکرر مطابقت دارد.
- با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مقدار کرنش مؤثر در نقاط مختلف سطح مقطع با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار کرنش مؤثر در محل تلاقی نواحی 2 و 3 قالب (ناحیه مرکزی) مشاهده شد.
- نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر، متوسط اندازه دانه به شدت کاهش پیدا کرده و بعد از انجام چهار سیکل به حدود 9 µm می‌رسد.
- استحکام تسلیم آلیاژ با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر بهبود پیدا کرده و پس از چهار سیکل به بیشترین مقدار یعنی 280 MPa می‌رسد که حدود 2.5 برابر استحکام تسلیم نمونه همگن‌سازی شده اولیه است. همچنین درصد ازدیاد طول با افزایش تعداد سیکل فرایند پرس-اکستروژن مکرر افزایش یافت.

5- مراجع

[1] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 103-109, 2000.

[2] M. Eskandarzade, A. Masoumi, Gh. Faraji, M. Mohammadpour, X. S. Yan, A new designed incremental high pressure torsion process for producing long nanostructured rod samples, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 695, No. 2, pp. 1539-1546, 2017.

[3] Q. Chen, D. Y. Shu, J. Lin, Y. Wu, X. S. Xia, S. H. Huang, Z. D. Zhao, O. V. Mishinc, G. L. Wu, Evolution of microstructure and texture in copper during repetitive extrusion-upsetting and subsequent annealing, *Journal of*

[13] T. Aizawa, K. Tokimutu, Bulk mechanical alloying for productive processing of functional alloys, *Materials Science Forum*, Vol. 2-6, pp. 13-22, 1999.
[14] L. Zaharia, R. Comaneci, R. Chelariu, D. Luca, A new severe plastic deformation method by repetitive extrusion and upsetting, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 595, No. 1, pp. 135-142, 2014.
[15] I. Balasundar, T. Raghu, On the die design for repetitive upsetting-extrusion (RUE) process, *International Journal of Materials Forming*, Vol. 6, No. 2, pp. 289–301, 2013.
[16] G. E. Totten, D. S. MacKenzie, *Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes*, Vol. 1, pp. 404-417, New York: Marcel Dekker, 2003.
[17] Y. H. Zhao, X. Z. Liao, Z. Jin, R. Z. Valiev, Y. T. Zhu, Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 15, pp. 4589–4599, 2004.
[18] I. Balasundar, T. Raghu, Investigations on the extrusion defect – Axial hole or funnel, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 6, pp. 2994–3001, 2010.
[19] H. V. Atkinson, K. Burke, G. Vaneetveld, Recrystallisation in the semi-solid state in 7075 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 490, No. 1-2, pp. 266-276, 2008.
[20] B. Binesh, M. Aghaie-Khafri, RUE-based semi-solid processing: Microstructure evolution and effective parameters, *Materials and Design*, Vol. 95, No. 1, pp. 268–286, 2016.
[21] A. Mostafapur, V. Mohammadinia, Mechanical properties and microstructure evolution of AA1100 aluminum sheet processed by accumulative press bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 1-6, 2016. (in Persian فارسی)
[22] M. Samaee, S. Najafi, A. R. Eivani, H. R. Jafarian, J. Zhou, Simultaneous improvements of the strength and ductility of fine-grained AA6063 alloy with increasing number of ECAP passes, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 669, No. 1, pp. 350–357, 2016.
[23] Y. H. Zhao, X. Zh. Liao, Sh. Cheng, E. Ma, Y. T. Zhu. Simultaneously increasing the ductility and strength of nanostructured alloys, *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 17, pp. 2280–2283, 2006.
Materials Science & Technology, Vol. 33, No. 7, pp. 690-697, 2017.
[4] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zechetbauer, Y. T. Zhu, Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation, *JOM*, Vol. 58, No. 4, pp. 33-39, 2006.
[5] P. Mahhadi Keshtiban, M. Zadshakouyan, G. Faraji, Optimization of geometrical parameters of equal channel multi-angular pressing process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 275-282, 2016. (in Persian فارسی)
[6] H. Kazemi Mehrabadi, Gh. Faraji, S. Amani, M. Karimpour, H. Ghanbari, Fabrication of ultrafine-grained Mg micro tubes using a combined severe plastic deformation process for biomedical application, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 605-611, 2016. (in Persian فارسی)
[7] A. P. Zhilyaeva, G. Nurislamova, B. K. Kim, M. D. Baró, J. A. Szpunar, T. G. Langdon, Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 3, pp. 753–765, 2003.
[8] A. Babaei, M. M. Mashhadi, Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion–compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 6, pp. 623–630, 2014.
[9] Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, D. Orlov, S. Synkov, A. Spuskanyuk, Y. Pashinska, *Severe Plastic Deformation by Twist Extrusion*, M. J. Zehetbauer, R. Z. Valiev (Eds.), *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, pp. 511-516, Weinheim, Germany: Wiley–VCH Verlag, 2004.
[10] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process, *Acta Materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579–583, 1999.
[11] M. Moghaddam, A. Zarei-Hanzaki, M. H. Pishbin, A. H. Shafieizad, V. B. Oliveira, Characterization of the microstructure, texture and mechanical properties of 7075 aluminum alloy in early stage of severe plastic deformation, *Materials Characterization*, Vol. 119, No. 1, pp. 137-147, 2016.
[12] H. Lianxi, L. Yuping, W. Erde, Y. Yang, Ultrafine grained structure and mechanical properties of a LY12 Al alloy prepared by repeated upsetting-extrusion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 422, No. 1-2, pp. 327-332, 2006.