



اثر سطح مقطع قطعه کار بر خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری تولید شده به روش پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار

رضا ناصری¹، محمود شریعتی²، مهران کدخدایان^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948944، kadhoda@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 اسفند 1393

پذیرش: 17 فروردین 1394

ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار

تیتانیوم خالص تجاری

سطح مقطع

خواص مکانیکی

شبیه‌سازی اجزای محدود

چکیده

پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار یکی از مؤثرترین فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید برای تولید مواد فوق‌ریزدانه و حتی نانوساختار است. از میان بایوموادهای فلزی، تیتانیوم خالص تجاری در مقایسه با سایر آلیاژها بهترین خواص مکانیکی را نشان می‌دهد. در این مطالعه اثر سطح مقطع قطعه کار بر خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری تولید شده توسط این فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. قطعه‌کارهایی در دو نوع سطح مقطع دایروی و مربعی در قالبی با زاویه کانال 120 درجه با مقطع مربعی در دمای محیط طی یک گذر تحت پرس قرار گرفت و اثرات آن بر نیروی شکل‌دهی، اندازه دانه، سختی و استحکام مطالعه شد. شبیه‌سازی اجزای محدود نیز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی، کرنش پلاستیک معادل و بررسی اثر پارامترهای هندسی کانال قالب بر آنها انجام شده است که انطباق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود داشت. از تحلیل نتایج چنین فهمیده شد که با استفاده از قطعه‌کاری با مقطع دایروی در فرایند پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار، در مقایسه با قطعه‌کار با مقطع مربع، نه تنها نیروی پرس کاری کمتری مورد نیاز است بلکه خواص مکانیکی ماده نظیر سختی و استحکام نسبتاً بهبود می‌یابد.

Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing

Reza Naseri, Mahmoud Shariati, Mehran Kadkhodayan*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran, kadhoda@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 March 2015

Accepted 06 April 2015

Available Online 21 April 2015

Keywords:

Equal channel Angular Pressing

Commercially Pure Titanium

Cross Section

Mechanical Properties

Finite Element Simulation

ABSTRACT

Equal channel angular pressing is one of the most effective severe plastic deformation processes for fabrication of ultrafine grained or even nanostructured materials. Among the metallic biomaterials, commercially pure titanium exhibits the best mechanical properties, compared with other alloys. In this study, the effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by this process has been investigated. The work-pieces in two types of cross section (square and circular) are pressed one pass in the square channel with angle 120° at room temperature and effects of cross section on the forming load, grain size, hardness and strength were studied. Finite element simulation using the ABAQUS software has been performed for forecasting the forming load, equivalent plastic strain and investigation of effects of geometry parameters of die channel on these. The simulation results show good agreement with experimental results. Through analysis of results, it is found that using the work-piece with circular cross section at equal channel angular pressing process not only decreased the required pressing load, but also significantly improved the mechanical properties of the materials such as hardness and strength as compared to using the work-piece with square cross section.

1- مقدمه

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 تنش اصطکاکی، k_y ثابت تسلیم و d اندازه دانه است.

به منظور تبدیل یک ماده درشت‌دانه به یک ماده فوق‌ریزدانه ضروری است که هم کرنش بسیار بالا برای ایجاد چگالی بالایی از نابجایی‌ها اعمال شود و هم اینکه این نابجایی‌ها جهت آرایش مرزهای دانه، مرتب‌سازی مجدد شوند. ایجاد کرنش‌های زیاد می‌تواند توسط فرایندهایی موسوم به تغییرشکل

رابطه هال-پچ بیان می‌کند که استحکام مواد پلی‌کریستال به اندازه دانه وابسته است به طوری که با کاهش اندازه‌ی دانه بر میزان تنش تسلیم افزوده می‌شود [1، 2]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

Please cite this article using:

R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 157-166, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan, Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 157-166, 2015 (In Persian)

نسبت به تیتانیوم درشت‌دانه اولیه نشان داده است [24]. مطالعات صورت گرفته بر فرایند ECAP تیتانیوم خالص تجاری را می‌توان در دما و زاویه مورد استفاده تقسیم‌بندی کرد. تاکنون ECAP تیتانیوم خالص تجاری در دمای محیط و زوایای کانال 90 درجه [27]، 110 درجه [28]، 120 درجه [29-32] و 135 درجه [33] انجام گرفته است. تیتانیوم خالص تجاری در دماهای 300 الی 450 درجه سانتی‌گراد نیز عمدتاً در زاویه کانال 90 درجه [34-46] و کمتر در زاویه کانال 120 درجه [10,47,48] تحت فرایند ECAP واقع شده است. ولی از آنجا که در دماهای بالا و نزدیک دمای ذوب، به دلیل تشکیل جوانه‌های جدید و رشد دانه‌ها در اثر تبلور مجدد، امکان دستیابی به کوچکترین اندازه دانه ممکن و افزایش نهایی استحکام دشوارتر می‌شود، ECAP مواد در دمای محیط به دمای بالا ترجیح داده می‌شود و اگر در دمای بالا انجام شود، سعی می‌شود جهت اعمال کرنش بیشتر زاویه کانال 90 درجه انتخاب شود [49,50].

به دلیل کارپذیری نسبتاً پایین تیتانیوم در دمای محیط و از آنجا که تاکنون مطالعه‌ای بر تأثیر سطح مقطع قطعه کار در مواد تولید شده توسط فرایند ECAP گزارش نشده است، این ماده به عنوان ماده هدف جهت بررسی اثر سطح مقطع قطعه کار بر خواص مکانیکی آن انتخاب شد. در تحقیق حاضر، تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 در دو مقطع دایروی و مربعی در قالبی مربعی با زاویه 120 درجه در یک گذر تحت فرایند ECAP قرار داده شد و اثر سطح مقطع بیلت بر خواصی مانند اندازه دانه، سختی، استحکام و نیروی شکل‌دهی به روش تجربی و اثر هندسه قالب بر کرنش پلاستیک معادل و نیروی مورد نیاز در ECAP در دو حالت بیلت دایروی و مربعی به روش شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی واقع شد.

2- مواد و روش آزمایش

2-1- ماده اولیه

در این تحقیق آزمایش‌ها با استفاده از تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 (گرید 2) انجام شد. ترکیب شیمیایی این ماده که با استفاده از روش اسپکترومتری نشری بدست آمده است، در جدول 1 نشان داده شده است. برای انجام فرایند ECAP ماشین‌کاری در راستای محور اکستروژن شمش اولیه انجام شد و بیلت‌هایی با طول تقریبی 90 میلی‌متر و در دو مقطع دایروی (قطر تقریبی 10 میلی‌متر) و مربعی (ضلع تقریبی 10 میلی‌متر) تهیه شد. نمونه‌های تولید شده سپس برای همگنی ساختار تحت عملیات آنیلینگ واقع شدند. بدین صورت که به مدت 1 ساعت در دمای 800 درجه سانتی‌گراد در کوره قرار داده و سپس در کوره سرد شدند. شکل 1 بیلت‌های مورد استفاده در فرایند ECAP را نشان می‌دهد.

2-2- فرایند ECAP

فرایند ECAP در دمای اتاق (25°C) با استفاده از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت اسمی 200 تن و با سرعت فک 0/65 mm/s انجام شد. برای انجام فرایند ECAP از قالبی با کانال مقطع مربعی به ابعاد 10×10 mm² و با زاویه کانال 120° و زاویه گوشه 20° استفاده شد. پارامترهای هندسی φ و ψ قالب ECAP و پرس هیدرولیک مورد استفاده به ترتیب در شکل‌های 2 الی 4 نشان داده شده‌اند. با استفاده از رابطه (2) می‌توان اثبات کرد که با در نظر گرفتن ابعاد کانال و زوایای هندسی این قالب، کرنشی در حدود 0/63 در هر گذر بر بیلت مربعی ECAP شده اعمال می‌شود. برای کاهش نیروی اصطکاک از روانکار دی‌سولفیدمولیبدن بین بیلت و جداره داخلی قالب استفاده شد. هر

پلاستیکی شدید (SPD¹) صورت پذیرد. طی این فرایندها عموماً کرنش بسیار زیاد به بلوکی جامد وارد می‌شود به طوری که بدون تغییر ابعاد کلی جامد، ریزش‌دگی دانه در آن اتفاق می‌افتد [3].

پرس کاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (ECAP²) به عنوان یکی از مؤثرترین فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید برای دستیابی به ساختارهای فوق‌ریزدانه (UFG³) و افزایش استحکام فلزات و آلیاژها شناخته می‌شود [3-5]. در فرایند ECAP نمونه از میان دو کانال با سطح مقطع یکسان که دارای تقاطع تحت زاویه φ و زاویه گوشه ψ می‌باشند، با استفاده از نیروی پرس عبور داده می‌شود [6,7]. از آنجا که سطح مقطع نمونه بعد از تغییرشکل ثابت باقی می‌ماند، می‌توان نمونه را مجدداً با چرخش 90 و یا 180 درجه در هر جهت، ECAP کرد [8]. در حین فرایند، در اثر برش ساده در محل تقاطع، نمونه تحت یک کرنش پلاستیک شدید واقع می‌شود [9]. در بیشتر آلیاژهای فلزی بعد از اولین گذر ECAP، تأثیری چشمگیر بر میزان استحکام تسلیم و نهایی ماده مشاهده می‌شود که این افزایش استحکام با روند کندی در گذرهای بعدی ادامه می‌یابد [10]. مقدار کرنش مؤثر یا معادل ε_{eq} اعمال شده بعد از N گذر بر نمونه ECAP شده و در شرایط بدون اصطکاک توسط معادله‌ی (2) بیان می‌شود [9]:

$$\varepsilon_{eq} = N/\sqrt{3} \left[2 \cot\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) + \psi \csc\left(\frac{\varphi + \psi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

که در آن N تعداد گذرها، φ زاویه کانال و ψ زاویه گوشه کانال است.

تاکنون فلزات و آلیاژهای بسیاری با موفقیت توسط فرایند ECAP تحت شکل‌دهی قرار گرفته‌اند. ولی برخی از مواد نظیر آلیاژهای با سیستم کریستالی شش وجهی (HCP⁴) مانند تیتانیوم، به دلیل سیستم‌های لغزش فعال محدود و آلیاژهای آلومینیم با قابلیت پیرسختی، به دشواری در دمای محیط ECAP می‌شوند، زیرا در این مواد ترک خوردگی⁵ و تکه‌تکه‌شدگی⁶ قابل انتظار است [11,12]. این مشکلات را می‌توان با روش‌هایی همچون افزایش دمای فرایند، استفاده از فشارپشتی⁷، آنیل کنترل شده و افزایش زاویه کانال قالب برطرف کرد [13-20].

آلیاژهای تیتانیوم به دلیل استحکام نسبتاً بالا و مقاومت خوردگی عالی، به طور گسترده در صنایع هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی و بایوپزشکی مورد استفاده واقع می‌شوند [21,22]. تیتانیوم خالص تجاری⁸ یک فلز قابل اعتماد برای استفاده در بایوپزشکی است، زیرا از لحاظ شیمیایی خنثی است و خواص زیست‌سازگاری عالی از خود نشان می‌دهد و در مایع‌های بدن از لحاظ خوردگی مقاوم است [23-25]. آلیاژ Ti-6Al-4V از پرکاربردترین آلیاژها در ایمپلنت‌های پزشکی بالاخص در ایمپلنت استخوان است، ولی به دلیل آزدسازی یونی عناصر سمی وانادیم و آلومینیم، عوارض پزشکی نظیر آلزایمر و سرطان برای بیمار به همراه دارد. لذا تیتانیوم خالص به عنوان جایگزین این آلیاژ مورد استفاده واقع می‌شود که به دلیل کمتر بودن استحکام آن نسبت به آلیاژ Ti-6Al-4V می‌توان با اعمال فرایند ECAP استحکام آن را تا حد مورد نیاز بهبود بخشید [26,3]. بررسی خواص مکانیکی تیتانیوم خالص فوق‌ریزدانه شده توسط فرایند ECAP، عمدتاً بهبود خواص مکانیکی-متالورژیکی نظیر استحکام استاتیکی، استحکام دینامیکی، سختی و مقاومت به خوردگی را

- 1- Severe Plastic Deformation
- 2- Equal Channel Angular Pressing
- 3- Ultra-Fine Grain
- 4- Hexagonal closed-packed
- 5- Cracking
- 6- Segmentation
- 7- Back Pressure
- 8- Commercially Pure Titanium (CP-Ti)

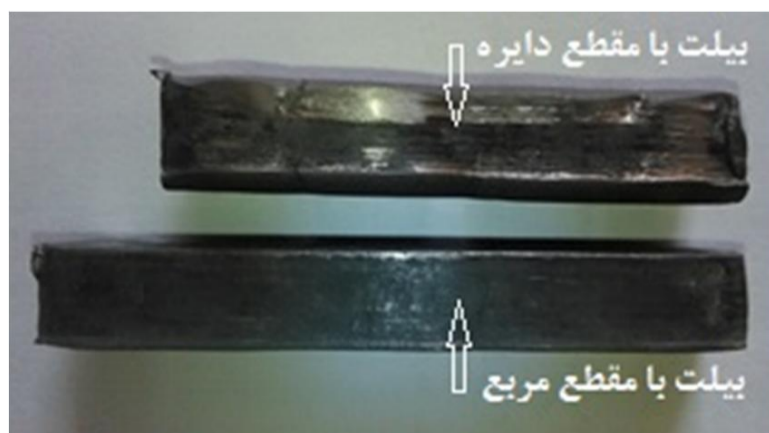


شکل 4 پرس هیدرولیک 200 تن مورد استفاده

شد. برای مشاهدات میکروساختاری توسط میکروسکوپ نوری، هر سه نمونه به مدت 10 ثانیه در محلول کرول¹ قرار داده شد و بلافاصله با الکل شسته و با گرمای مستقیم خشک شدند و در نهایت از میکروساختار آن برای تعیین اندازه‌ی متوسط دانه‌ها، با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 50 برابر، عکس گرفته شد. اندازه‌ی متوسط دانه‌ها با استفاده از روش جدایش خطی² و تحت استاندارد ASTM E112-96 در نرم‌افزار تحلیل عکس میکروساختار MIP بدست آمد. شکل 6 نمایی از نمونه‌های مانته شده را برای آزمون متالوگرافی نشان می‌دهد.

مقادیر میکروسختی ویکرز با استفاده از یک دستگاه سختی‌سنج بوهرلر³ و تحت بار 1 kgf و زمان بارگذاری 10 ثانیه بدست آمدند. هر میکروسختی میانگین 5 نقطه بارگذاری بوده است.

برای انجام آزمون فشار همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، نمونه‌های استوانه‌ای از ماده اولیه و میانه سطح مقطع هر دو بیلت مربعی و دایروی ECAP شده با ارتفاع 14/5 mm و قطر 7/2 mm و با استفاده از تراش کاری و ایرکات تهیه شد به طوری که راستای استوانه فشار در راستای اکسترود بیلت انتخاب شد. دو آزمون فشار برای هر حالت، تحت استاندارد ASTM E9-89a، نرخ کرنش⁴ $0/004 \text{ s}^{-1}$ [35] و توسط دستگاه ژونیک⁴ انجام گردید.



شکل 5 بیلت‌های با مقطع مربعی و دایروی بعد از اعمال یک گذر فرایند ECAP

- 1- Kroll's Reagent (2%HF+10%HNO3+88%H2O)
- 2- Linear Intercept Method
- 3- Buehler
- 4- Zwick Z250

دو بیلت با مقطع مربعی و دایروی جداگانه، تنها در یک گذر تحت شکل‌دهی به روش ECAP قرار گرفتند. شکل 5 بیلت‌های با مقطع دایروی و مربعی را بعد از اعمال یک گذر فرایند ECAP نشان می‌دهد. دلیل کوتاه‌تر بودن بیلت با مقطع دایروی نسبت به مربعی، سیلان ماده بیلت دایروی در کانال مربعی و پر کردن گوشه‌های کانال در اثر پرس کاری می‌باشد.

2-3- آزمایش‌های تجربی

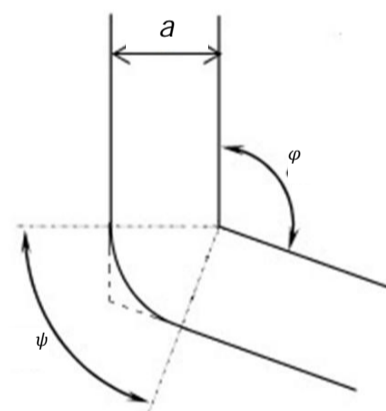
جهت مشاهدات میکروساختاری و آزمون میکروسختی، بیلت‌های ECAP شده از میانه‌ی نمونه و عمود بر جهت اکسترود برش داده شد و سطح مقطع نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ماده اولیه و سطح مقطع هر دو نمونه مربعی و دایروی ECAP شده پس از مانته گرم با استفاده از سنباده‌های 100، 400، 600، 1000، 1200 و 2000 و در نهایت به ترتیب با پولیش دستی و اتومات با ذرات آلومینای 0/5 و 0/3 میکرون تا کیفیت سطح شبه آینه آماده‌سازی

جدول 1 ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 مورد استفاده

عنصر	Ti	Al	Fe	Mn	C	V
درصد وزنی (%)	99/27	0/372	0/201	0/079	0/043	0/029



شکل 1 بیلت‌های با مقطع دایروی و مربعی از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0

شکل 2 پارامترهای هندسی a ، ψ و ψ قالب ECAPشکل 3 قالب ECAP مورد استفاده با ابعاد کانال $10 \times 10 \text{ mm}^2$ و زاویه کانال و گوشه 120 و 20 درجه

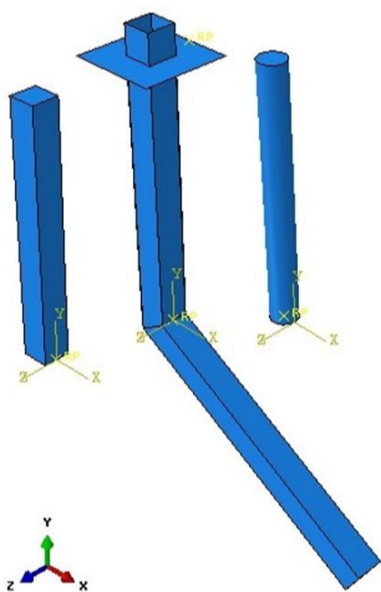
مش، برای تحلیل نیروی مورد نیاز جهت ECAP هر دو بیلت مقطع دایروی و مربعی نشان را می‌دهد.

با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، تحلیل نیرویی و بررسی مقادیر کرنش پلاستیک با تغییر پارامترهای هندسی φ و ψ قالب انجام شد. بدین صورت که ابتدا φ ثابت و برابر 120 درجه در نظر گرفته شد و سپس با تغییر ψ از صفر تا 30 درجه، اثر زاویه ψ بر نیروی شکل‌دهی و کرنش پلاستیک معادل در دو حالت ECAP بیلت مربعی و دایروی بررسی و مقایسه شد. بر همین منوال با ثابت نگه داشتن ψ برابر با 20 درجه با تغییر زاویه φ از 75 تا 135 درجه، اثر زاویه φ نیز بر نیروی شکل‌دهی و کرنش پلاستیک معادل در دو حالت ECAP بیلت مربعی و دایروی بررسی و مقایسه انجام شد.

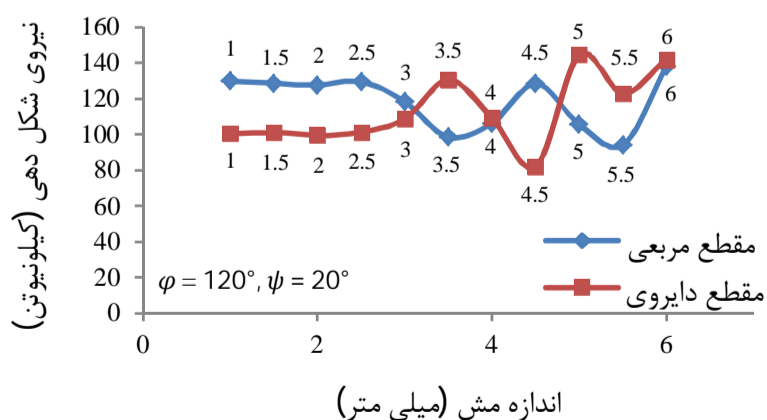
4- نتایج و بحث

4-1- خواص مکانیکی

شکل 10 منحنی تنش-کرنش مهندسی بدست آمده از آزمون فشار سه نمونه تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 شکل‌دهی نشده، ECAP شده با مقطع مربعی و ECAP شده با مقطع دایروی را نشان می‌دهد. می‌توان از آن دریافت که با انجام فرایند ECAP، استحکام تسلیم و نهایی به ازای هر دو بیلت مربعی و دایروی نسبت به ماده اولیه افزایش چشمگیری داشته است، ولی از میزان ازدیاد طول نسبی کاسته شده است. در مورد ECAP دو بیلت با مقطع مربعی و دایروی همان‌طور که از شکل 10 پیداست، آزمون فشار افزایش نسبی استحکام و کاهش ازدیاد طول را برای بیلت دایروی نسبت به بیلت مربعی نشان می‌دهد. در جدول 2 مقادیر هر یک از استحکام‌های تسلیم، نهایی و ازدیاد طول نسبی ذکر شده است.



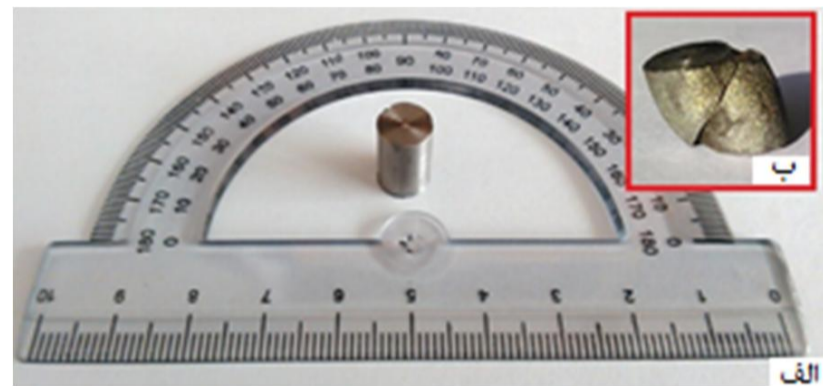
شکل 8 نمایی از ترکیب‌بندی اجزای فرایند ECAP در محیط نرم‌افزار شبیه‌ساز



شکل 9 نمودار حساسیت مش



شکل 6 نمونه‌های مانده ماده اولیه آبیل شده و مقطع مربعی و دایروی ECAP شده



شکل 7 نمونه آزمون فشار، الف) قبل از انجام آزمون و ب) بعد از انجام آزمون

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای تحلیل نیروی مورد نیاز در فرایند ECAP و بررسی مقدار و همگنی کرنش مؤثر بر تیتانیوم مورد استفاده ECAP شده در دو مقطع مربعی و دایروی، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس¹ استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها برای اعتبارسنجی پیش‌بینی نیرو و کرنش معادل پلاستیک با نتایج تجربی، ابتدا در زاویه کانال 120 درجه و زاویه گوشه 20 درجه انجام و سپس با تغییر زوایای کانال و گوشه اثر این پارامترهای هندسی بر نیرو و کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی واقع شد. رابطه تنش-کرنش هولومان² ($\sigma = K\varepsilon^n$) در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی، از انطباق تابعی توانی بر منطقه پلاستیک منحنی تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش تیتانیوم BT1-0، به صورت $\sigma = 700\varepsilon^{0.362}$ (MPa) بدست آمد. در شبیه‌سازی اجزای محدود، قالب و رم پرس به صورت اجزای صلب تحلیلی³ و از نوع R3D4⁴ و بیلت (دایروی و مربعی) به صورت انعطاف‌پذیر و از نوع C3D8R⁵ مدل شدند. از آنجا که ضریب اصطکاک بین تیتانیوم و فولاد کمتر از 0/1 است [51]، با تغییر ضریب اصطکاک به ازای مقادیر کمتر از 0/1 نیروی بیشینه شکل‌دهی ثبت شد و مشخص گردید که به ازای مقدار 0/085 بیشینه نیروی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی انطباق دارد لذا از ضریب اصطکاک 0/085 بین بیلت و سطح داخلی کانال قالب در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. در همه شبیه‌سازی‌ها مطابق با شرایط آزمایشگاهی سرعت پرس کاری 0/65 mm/s در نظر گرفته شد. شکل 8 نمایی از ترکیب‌بندی اجزای فرایند ECAP شامل قالب، رم پرس و بیلت‌های مربعی و دایروی را در محیط نرم‌افزار نشان می‌دهد.

برای اعتباربخشی نتایج شبیه‌سازی، نمودار استقلال از مش بر حسب نیروی شکل‌دهی رسم گردید و نتیجه شد که به ازای اندازه مش‌های کوچکتر از 2/5 میلی‌متر تحلیل‌های یکسانی بدست می‌آید. شکل 9 نمودار حساسیت

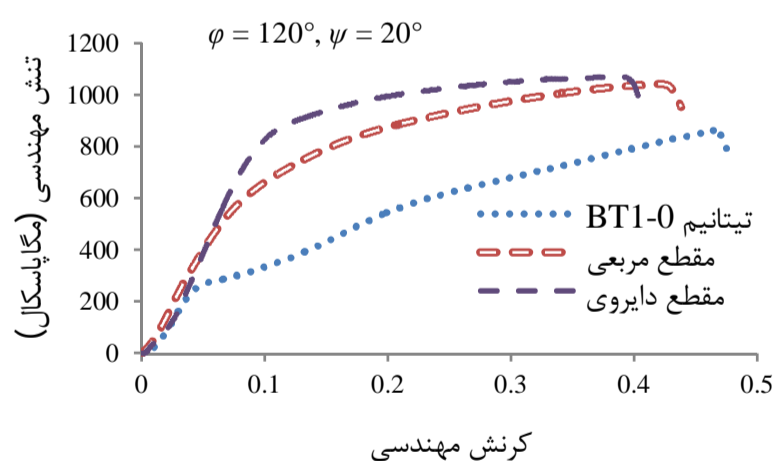
1- ABAQUS 6.12-1
2- Holloman Equation
3- Analytical Rigid Elements
4- A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral
5- An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

می‌ماند. چون طول بیلت در دو کانال ورودی و خروجی در هر لحظه از فرایند برابر است لذا نیروی اصطکاک همواره ثابت باقی می‌ماند و به دلیل ثابت بودن نیروی ناشی از تغییر شکل، در حالت آزمایشگاهی پس از رسیدن نیرو به مقدار بیشینه تغییری در مقدار نیرو مشاهده نمی‌شود. در این تحقیق به دلیل محدودیت در امکانات آزمایشگاهی، امکان ثبت روند تغییر نیرو وجود نداشت و تنها مقدار بیشینه نیرو از طریق نیروسنج متصل به دستگاه پرس ثبت شد. مقادیر 126 و 98 کیلونیوتن نشان داده شده در شکل 11 گویای بیشینه نیروی آزمایشگاهی در ECAP دو بیلت با مقاطع مربعی و دایروی هستند.

شکل‌های 12 و 13 به ترتیب اثر زوایای کانال و گوشه را بر بیشینه نیروی شکل‌دهی در دو حالت ECAP بیلت با مقطع مربعی و دایروی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با کاهش زاویه کانال به دلیل کرنش‌های اعمالی بالاتر، نیروی تغییر شکل بیشتری در هر دو بیلت مربعی و دایروی مورد نیاز است ولی در هر زاویه کانال، بیلت با مقطع مربع نسبت به بیلت با مقطع دایره نیروی بیشتری را می‌طلبد. در مورد تأثیر زاویه گوشه نیز می‌توان دریافت با افزایش زاویه گوشه، به دلیل کاهش حجم منطقه مرده در محل تغییر شکل، از میزان نیروی مورد نیاز برای هر دو هندسه بیلت کاسته می‌شود ولی مطابق انتظار در ECAP بیلت با مقطع مربع نسبت به مقطع دایره به نیروی بیشتری نیاز می‌باشد.

4-3- توزیع کرنش

از شکل‌های 14 تا 18 چنین نتیجه می‌شود که بر سطح مقطع بیلت دایروی ECAP شده نسبت به بیلت مربعی ECAP شده کرنش‌های بزرگتری اعمال شده است و این موضوع به صورت کلی در شکل 14 و با جزئیات در شکل‌های 15 تا 18 مشاهده می‌شود. دلیل اصلی وارد آمدن کرنش‌های بیشتر در بیلت دایروی نسبت به مربعی در فرایند ECAP، سیلان فلزی بیلت دایروی و پر کردن گوشه‌های کانال مربعی در اثر پرس کاری است. در واقع می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که بیلت با مقطع دایروی علاوه بر کرنش ناشی از تغییر مقطع کانال، کرنشی ناشی از سیلان فلزی در گوشه‌های کانال را نیز



شکل 10 منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی تیتانیوم BT1-0 در سه حالت آنیل شده و ECAP شده با بیلت مربعی و دایروی

جدول 2 تنش تسلیم، نهایی و ازدیاد طول نسبی ماده اولیه و ECAP شده در دو

مقطع مربعی و دایروی		
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)
280	870	47
560	1035	42
625	1085	38

دلیل اصلی افزایش ناگهانی استحکام در اولین گذر ECAP به تغییر آرایش نابعایی‌ها و تجمع آن‌ها به ازای کرنش‌های شدید اعمالی توسط فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید و شکست و ریزش دانه‌ها نسبت داده می‌شود [8,52]. دلیل دیگر افزایش استحکام را می‌توان این‌گونه نیز بیان کرد که با افزایش کرنش شدید اعمالی، مرزدانه‌های زاویه-پایین (LAGBs¹) از طریق جذب نابعایی‌ها به مرزدانه‌های زاویه-بالا (HAGBs²) تبدیل شده و به موجب آن آرایشی از دانه‌های فوق‌ریزدانه که توسط مرزهای زاویه-بالا از هم تفکیک شده‌اند، تولید می‌شود [3]. در مورد شکل‌دهی به روش ECAP بیلت در دو مقطع مربع و دایره در کانال مربعی، می‌توان چنین دریافت که بیلت با مقطع دایره در حین فرایند ECAP، جهت پر کردن فضای خالی بین بیلت دایروی و جداره داخلی کانال مربعی در اثر پرس کاری، کرنشی اضافی نسبت به بیلت با مقطع مربعی تحمل می‌کند و این کرنش اضافی منجر به حرکت و تجمع بیشتر نابعایی‌ها و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی نظیر استحکام و سختی در بیلت دایروی ECAP شده، نسبت به بیلت مربعی ECAP شده می‌شود. از آنجا که تأثیر عمده بر افزایش استحکام از طریق تعداد گذرهای بالاتر بدست می‌آید، این میزان استحکام بیشتر بیلت دایروی نسبت به مربعی در گذر اول که در شکل 10 نشان داده شده است، قابل انتظار و مناسب است. کاهش ازدیاد طول نسبی نیز در بیلت با مقطع دایروی ECAP شده نسبت به بیلت با مقطع مربعی به وضوح در شکل 10 مشخص است که به دلیل اعمال کرنش بیشتر بر بیلت با مقطع دایروی است.

4-2- تحلیل نیرویی

اثر هندسه سطح مقطع بیلت‌های مورد استفاده در فرایند ECAP بر نیروی شکل‌دهی با انتخاب دو سطح مقطع مربعی و دایروی و اعمال کارسرد بر آنها در قالب ECAP مورد بررسی واقع شد. طبق نتایج آزمایشگاهی مقادیر نیروی 126 و 98 کیلونیوتن به ترتیب برای بیلت در دو مقطع مربعی و دایروی بدست آمد که کاهش تقریبی 23 درصدی را برای مقطع دایروی نشان می‌دهد. دلیل نیروی مورد نیاز کمتر برای ECAP بیلت دایروی نسبت به مربعی را می‌توان به کمتر بودن سطح تماس بیلت دایروی با جداره داخلی کانال مربعی نسبت به بیلت مربعی و در نتیجه کاهش نیروی اصطکاک نسبت داد. جهت اعتباربخشی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، مقایسه‌ای بین مقادیر نهایی بار شکل‌دهی به روش تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، انجام شد که همان‌طور که در شکل 11 به وضوح مشخص است، انطباق مناسبی بین تحلیل بیشینه نیروی شبیه‌سازی و نتایج تجربی بدست آمده است و این مهم نتایج شبیه‌سازی را برای بررسی‌های بیشتر قابل اعتماد می‌سازد.

نیروی فرایند ECAP از دو عامل نیروی تغییر شکل در محل تقاطع کانال و نیروی اصطکاک بیلت با جداره کانال تأثیر می‌پذیرد. همان‌طور که در شکل 11 مشخص است، در حالت شبیه‌سازی با شروع فرایند نیروی شکل‌دهی به تدریج افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار بیشینه، سیر نزولی را طی می‌کند که در هر دو نوع بیلت با مقطع مربعی و دایروی مشاهده می‌شود. از آنجا که نیروی تغییر شکل همواره در طول فرایند ثابت است می‌توان این سیر نزولی را به کاهش طول تماس بیلت با جداره کانال ورودی و در نتیجه کاهش نیروی اصطکاک نسبت داد. ولی در حالت آزمایشگاهی با پیشروی بیلت در کانال، نیرو به بیشینه خود رسیده و تا انتهای فرایند در آن مقدار باقی

1- Low Angle Grain Boundaries (LAGBs)
2- High Angle Grain Boundaries (HAGBs)

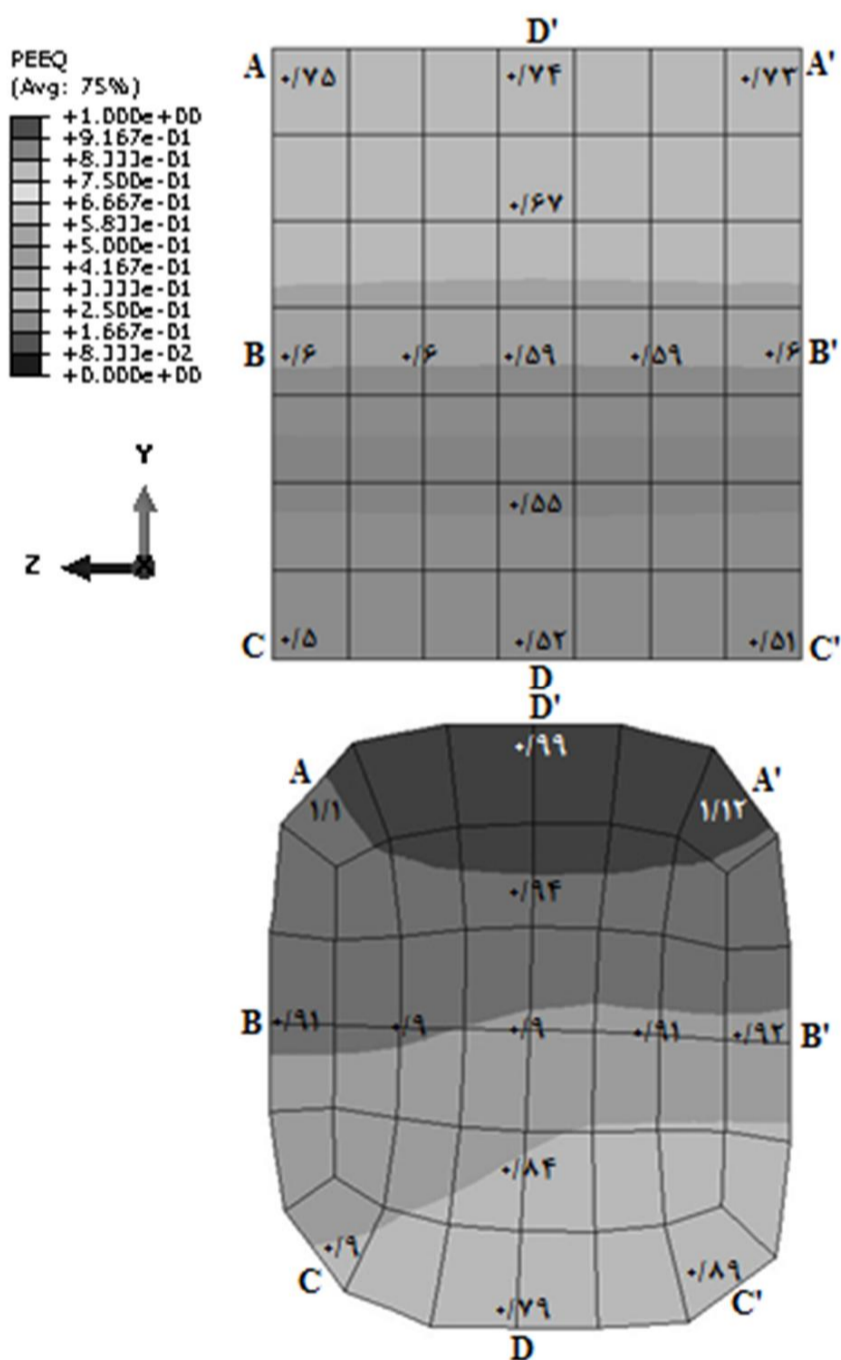
ECAP شده با مقطع دایروی نسبت به مقطع مربعی در همه‌ی نقاط، کرنش بیشتری را تحمل می‌کند و این مقادیر در گوشه‌های بیلت دایروی که تحت پرس در کانال مربعی در حال تبدیل به مقطع مربعی است، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد.

از شکل 15 پیداست که در مسیر AA' بیلت دایروی تحت کرنش‌های بالاتری نسبت به مربعی قرار گرفته است و بر خلاف بیلت مربعی که کرنش‌ها مقادیر تقریباً یکسانی در عرض بیلت دارند در بیلت دایروی مقادیر کرنش در گوشه‌ها به طور چشمگیری بیشتر از نقطه میانی آن و همه مقادیر کرنش در بیلت مربعی است.

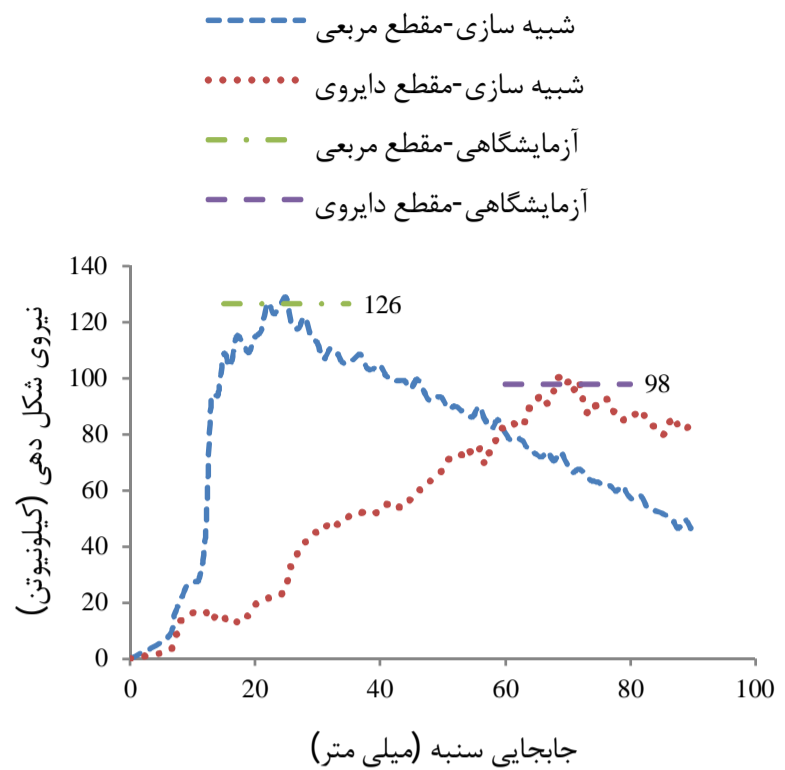
در مورد مسیر BB' نیز همانطور که در شکل 16 نشان داده شده است، هر دو بیلت مربعی و دایروی در طول عرض خود دارای مقادیر کرنش تقریباً یکسانی هستند، ولی مقادیر کرنش بیلت دایروی از مربعی بزرگتر است.

مسیر CC' همانند مسیر AA' می‌تواند مورد تحلیل واقع شود. شکل 17 به وضوح نشان می‌دهد که همه مقادیر کرنش در بیلت مربعی نسبت به دایروی کوچکتر است و در مورد بیلت دایروی بر خلاف بیلت مربعی که مقادیر کرنش تقریباً یکسانی در طول مسیر دارد، کرنش در گوشه‌ها به دلیل پر شدن فضای بین بیلت دایروی و کانال مربعی، کمی بیشتر از میانه همان مقطع است.

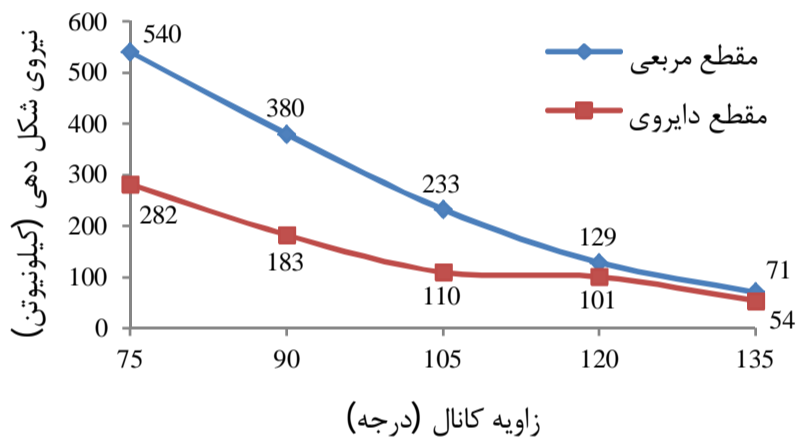
شکل 18 به خوبی بیانگر توزیع کرنش در راستای DD' است. در راستای DD' کاملاً کرنش‌های متفاوتی بر هر نقطه از بیلت وارد می‌شود. از نتایج به



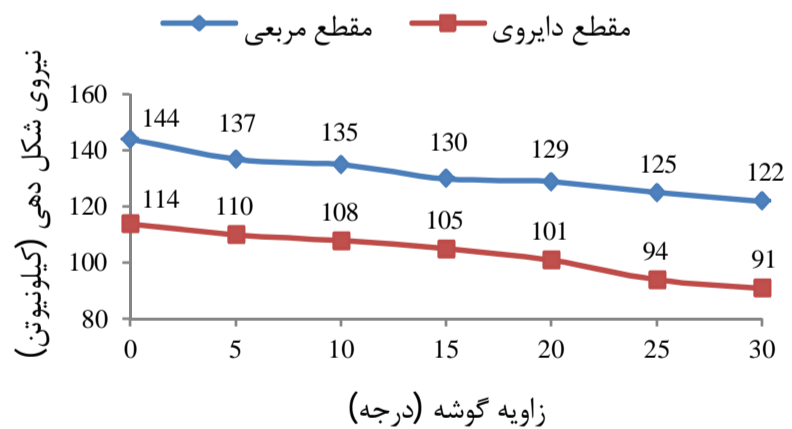
شکل 14 توزیع کرنش پلاستیک معادل در بیلت‌های مربعی و دایروی ECAP شده



شکل 11 تحلیل نیرویی ECAP به دو روش تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود



شکل 12 تأثیر زاویه کانال بر نیروی شکل دهی در ECAP بیلت‌های با مقطع مربع و دایره در زاویه گوشه 20 درجه



شکل 13 تأثیر زاویه گوشه بر نیروی شکل دهی در ECAP بیلت‌های با مقطع مربع و دایره در زاویه کانال 120 درجه

تحمل می‌کند که این تجمیع کرنشی منجر به بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود.

شکل 14 توزیع کرنش پلاستیک معادل¹ را در بیلت ECAP شده در میانه نمونه‌های مربعی و دایروی نشان می‌دهد. مقادیر کرنش پلاستیک معادل نشان داده شده در این شکل بیانگر این موضوع هستند که بیلت

1- Equivalent Plastic Strain(ϵ_{eq})

با مقادیر تئوری حاصله از رابطه (2)، به شبیه‌سازی‌ها اعتماد شد و اثر هندسه کانال قالب شامل زوایای کانال (φ) و گوشه (ψ) بر میزان کرنش پلاستیک معادل وارده بر بیلت با مقطع مربع و دایره بررسی گردید. نتایجی که در شکل‌های 19 و 20 ارائه شد، نشان داده است که با افزایش زاویه کانال، کرنش پلاستیک معادل روند نزولی خواهد داشت و بیشترین کرنش پلاستیک به ازای کمترین مقدار زاویه کانال بدست می‌آید. در مورد زاویه گوشه نیز چنین نتیجه شد، که تغییر زاویه گوشه تغییر چندانی در میزان کرنش اعمالی نخواهد داشت، ولی آنچه که در هر دو مورد اشتراک دارد، این است که مقادیر کرنش پلاستیک، در بیلت دایروی نسبت به بیلت مربعی به ازای هر زاویه کانال و گوشه، مقادیر بزرگتری هستند.

4-4- توزیع سختی

افزایش قابل توجه سختی بعد از اولین گذر ECAP قابل انتظار است و این افزایش سختی به ازای گذرهای بالاتر ادامه می‌یابد و در نهایت به حالت اشباع می‌رسد. این افزایش سختی را به سخت‌سازی ناشی از حرکت، افزایش چگالی و آرایش مجدد نابجایی‌ها و همچنین سخت‌سازی ناشی از کاهش اندازه‌ی دانه می‌توان نسبت داد [53,52,8].

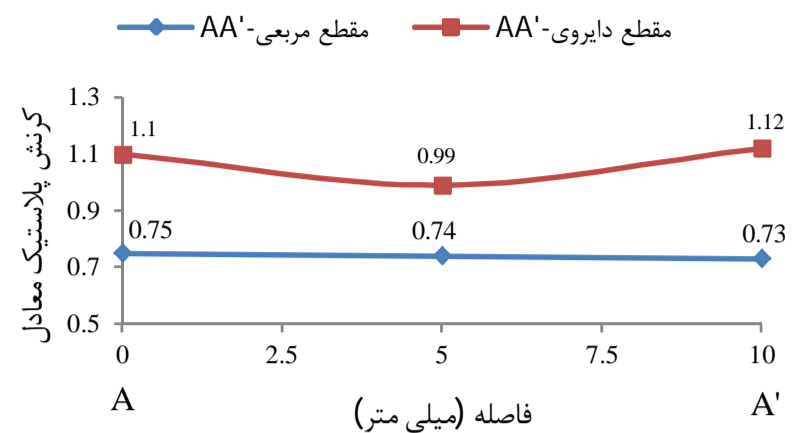
به منظور بررسی تجربی توزیع کرنش در سطح مقطع نمونه‌های ECAP شده، آزمون سختی در سطح مقطع برش خورده از میانه نمونه‌های مربعی و دایروی انجام شد. شکل 21 مقادیر میکروسختی ویکرز را در سطح مقطع هر یک از بیلت‌های مربعی و دایروی ECAP شده نشان می‌دهد. از آنجا که میزان کرنش وارده بر سطح مقطع، بیانگر میزان سختی موجود در آن است، مقادیر سختی ارائه شده در این شکل تقریباً دارای روندی معادل با مقادیر کرنش ارائه شده در شکل 14 می‌باشند. شکل‌های 22 تا 25 نیز مشابه شکل‌های 15 تا 18 مقادیر سختی و نحوه تغییر آنها را در سطح مقطع نشان می‌دهد.

این موضوع یعنی بیشتر بودن مقادیر سختی در سطح مقطع بیلت دایروی ECAP شده نسبت به بیلت مربعی ECAP شده را می‌توان مشابه تحلیل کرنشی ارائه شده در بخش 3-4 به سیلان فلزی بیلت با مقطع دایروی و پر کردن گوشه‌های کانال مربعی نسبت داد. علاوه بر کرنش ناشی از فرایند ECAP که بر هر دو بیلت با مقطع مربع و دایره وارد می‌شود، بیلت با مقطع دایروی نسبت به بیلت با مقطع مربعی کرنشی اضافی در اثر سیلان فلزی در کانال تحمل می‌کند. اعمال کرنش بیشتر منجر به حرکت بیشتر نابجایی‌ها و ریزش‌دگی بیشتر دانه‌ها شده و خواص مکانیکی بهتری نظیر سختی را نتیجه می‌دهد.

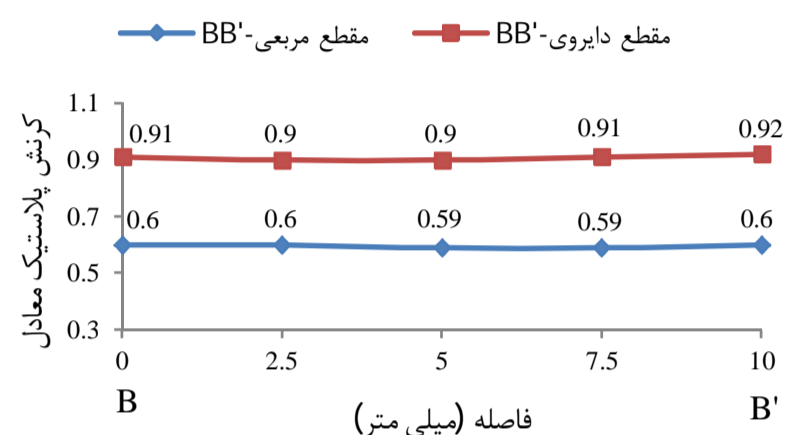
آنچه از این نتایج می‌توان دریافت، این است که علاوه بر اینکه در اثر فرایند ECAP سختی افزایش چشمگیری خواهد داشت، اصولاً بیلت دایروی در هر مسیر به دلیل تحمل کرنش‌های بالاتر از مربعی، سختی بالاتری دارد. مقدار سختی برای تیتانیوم BT1-0 آنیل شده و کار نشده برابر 158 ویکرز است که این مقدار در اثر ECAP با مقطع مربعی و دایروی به ترتیب به 219 و 235 ویکرز ارتقا پیدا می‌کند. این مهم در شکل 26 به وضوح نشان داده شده است.

4-5- اندازه متوسط دانه

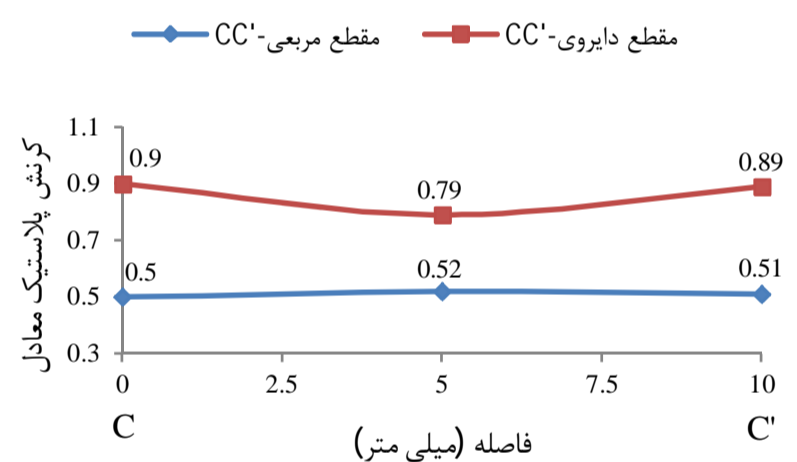
شکل 27 عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ماده اولیه و بیلت مربعی و دایروی یک گذر ECAP شده را نشان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار MIP و روش جدایش خطی، مقادیر اندازه متوسط دانه



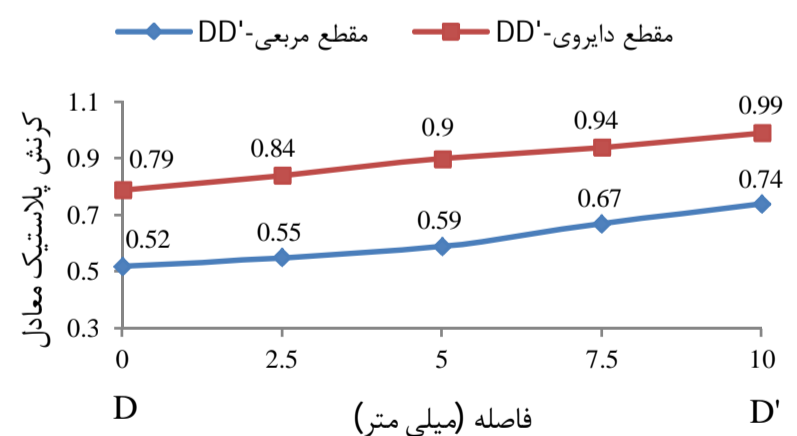
شکل 15 توزیع کرنش پلاستیک معادل در مسیر AA'



شکل 16 توزیع کرنش پلاستیک معادل در مسیر BB'

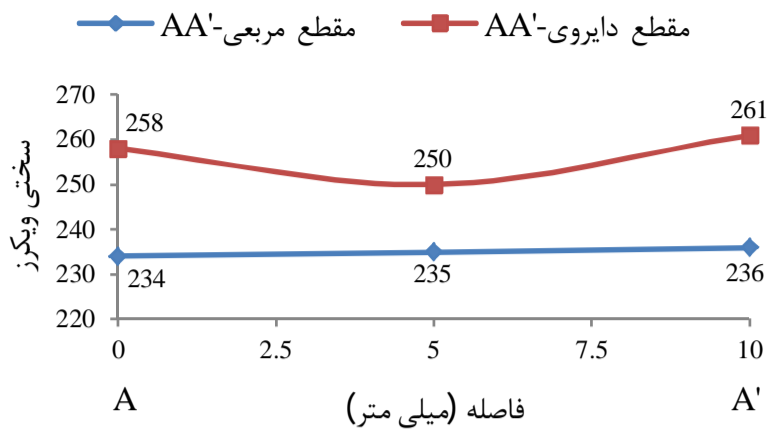


شکل 17 توزیع کرنش پلاستیک معادل در مسیر CC'

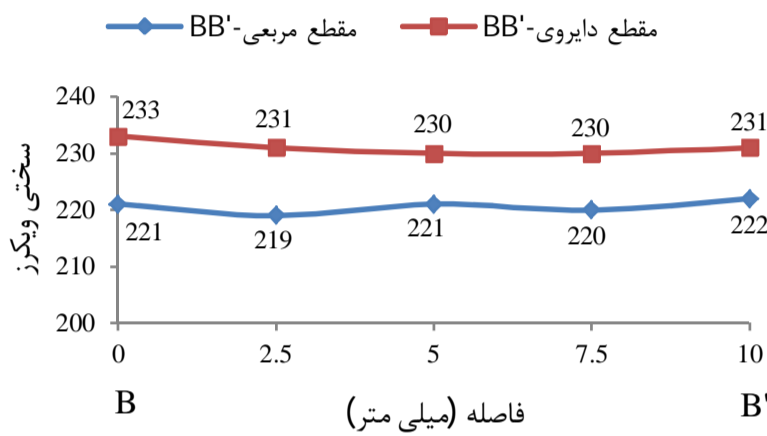


شکل 18 توزیع کرنش پلاستیک معادل در مسیر DD'

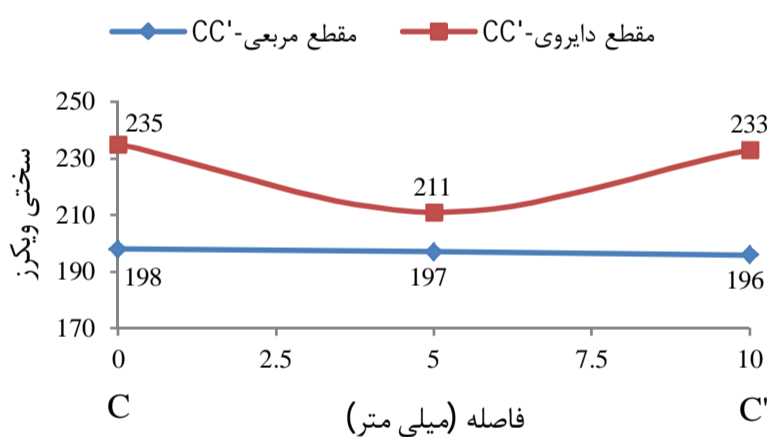
راحتی می‌توان دریافت که صرف نظر از نوع سطح مقطع بیلت، با دور شدن از محل زاویه گوشه (دیواره پایینی کانال) و نزدیک شدن به سمت محل زاویه کانال (دیواره بالایی کانال) بر مقادیر کرنش افزوده می‌شود، ولی این مقادیر برای بیلت دایروی نسبت به مربعی در همه نقاط دارای مقادیر بزرگتری است. به دلیل انطباق مناسب مقادیر کرنش پلاستیک در بیلت با مقطع مربعی



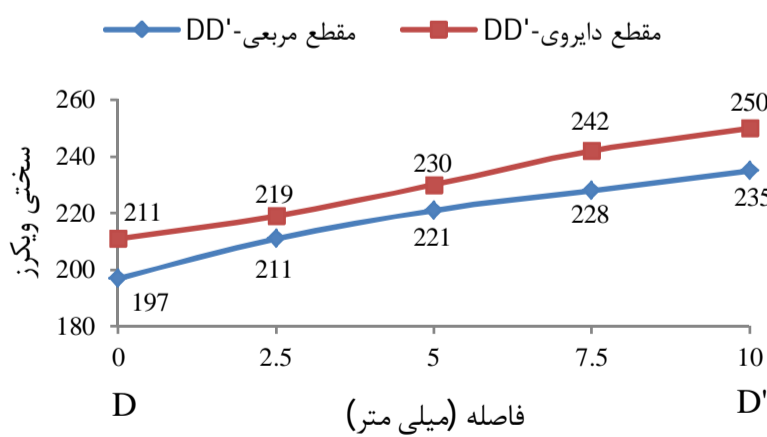
شکل 22 توزیع سختی ویکرز در مسیر AA'



شکل 23 توزیع سختی ویکرز در مسیر BB'

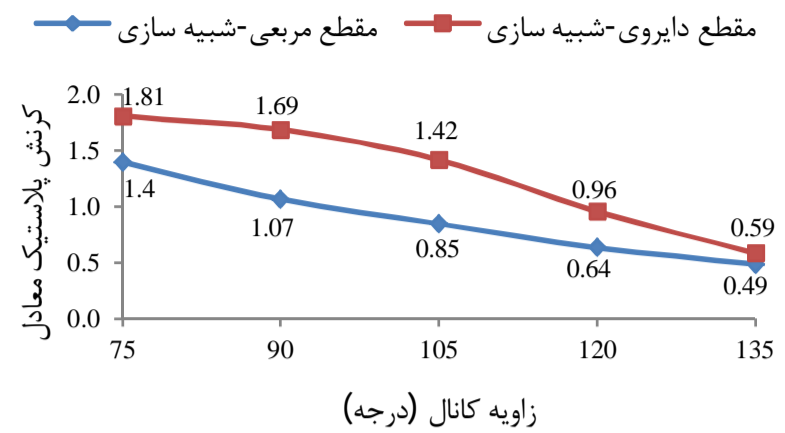


شکل 24 توزیع سختی ویکرز در مسیر CC'

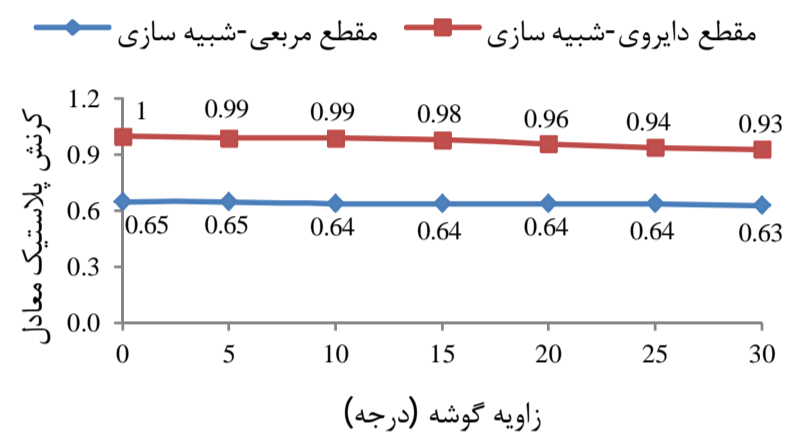


شکل 25 توزیع سختی ویکرز در مسیر DD'

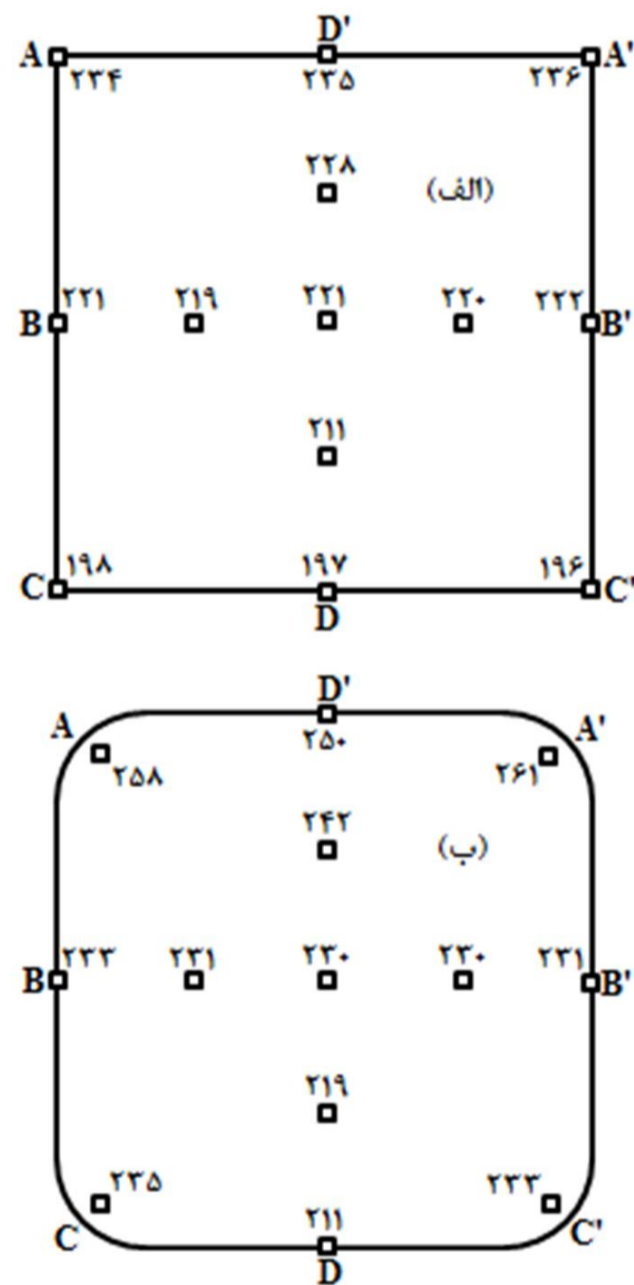
همان‌طور که در شکل 28 نشان داده شده است، به ترتیب برابر 20، 67 و 13 میکرومتر به ازای BT1-0 اولیه، بیلت مربعی و دایروی ECAP شده بدست آمده است. لذا کاهش اندازه دانه در اثر فرایند ECAP و کوچکتر بودن اندازه



شکل 19 اثر زاویه کانال بر کرنش پلاستیک معادل در زاویه گوشه 20 درجه



شکل 20 اثر زاویه گوشه بر کرنش پلاستیک معادل در زاویه کانال 120 درجه



شکل 21 مقادیر سختی ویکرز در سطح مقطع بیلت‌های ECAP شده با مقطع الف) مربعی و ب) دایروی

متوسط دانه‌ها در بیلت دایروی نسبت به بیلت مربعی به دلیل تحمل کرنش‌های بالاتر بسیار مشهود است.

5- نتیجه‌گیری

از تحلیل‌های تجربی و شبیه‌سازی ECAP بیلت‌های دایروی و مربعی از جنس تیتانیوم BT1-0 در کانال مربعی نتایج زیر بدست آمده است:

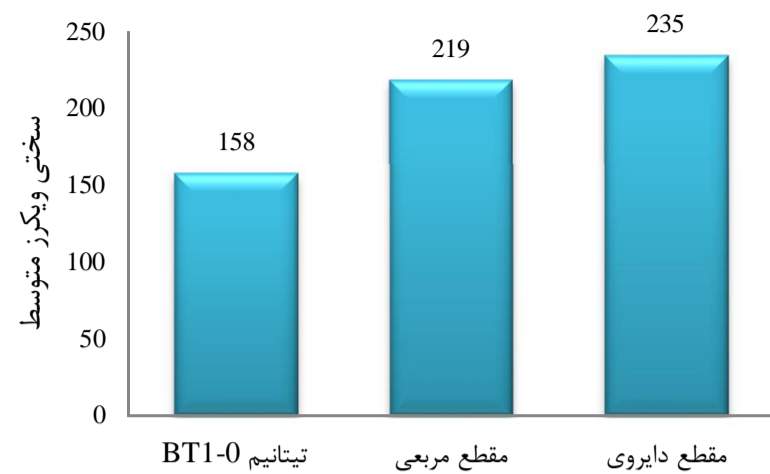
- خواص مکانیکی نظیر استحکام و سختی بیلت دایروی نسبت به بیلت مربعی بهبود قابل توجهی پیدا کرده است.
- نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند ECAP بیلت دایروی نسبت به مربعی کاهش چشمگیر 23% داشته است که می‌توان آن را به کمتر بودن سطح تماس بیلت دایروی با کانال قالب نسبت به بیلت مربعی نسبت داد.
- در مورد اثر پارامترهای هندسی کانال نظیر زوایای کانال و گوشه، نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که با افزایش هر یک از این دو پارامتر از میزان نیروی شکل‌دهی مورد نیاز کاسته می‌شود.
- کرنش پلاستیک معادل و در نتیجه میزان سختی در سطح مقطع بیلت‌های دایروی نسبت به مربعی دارای مقادیر بزرگتری است و این یعنی که بیلت‌های دایروی هنگام پرس کاری در کانال مربعی نسبت به بیلت‌های مربعی مقادیر کرنش پلاستیک بزرگتری را تحمل کرده و در نتیجه مقادیر سختی بالاتری بدست می‌دهند.
- شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داده است که زاویه کانال تأثیر چشمگیری بر میزان کرنش پلاستیک اعمالی و در نتیجه سختی نهایی داشته و با افزایش زاویه کانال به شدت از میزان کرنش پلاستیک بر نمونه کاسته می‌شود، ولی زاویه گوشه طبق نتایج تأثیر چندانی بر میزان اعمال کرنش پلاستیک ندارد.
- اندازه متوسط دانه‌ها بعد از فرایند ECAP کاهش قابل توجهی می‌یابد که در بیلت‌های دایروی نسبت به مربعی کاهش بیشتری در اندازه متوسط دانه‌ها و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی مشاهده می‌شود.

6- تشکر و قدردانی

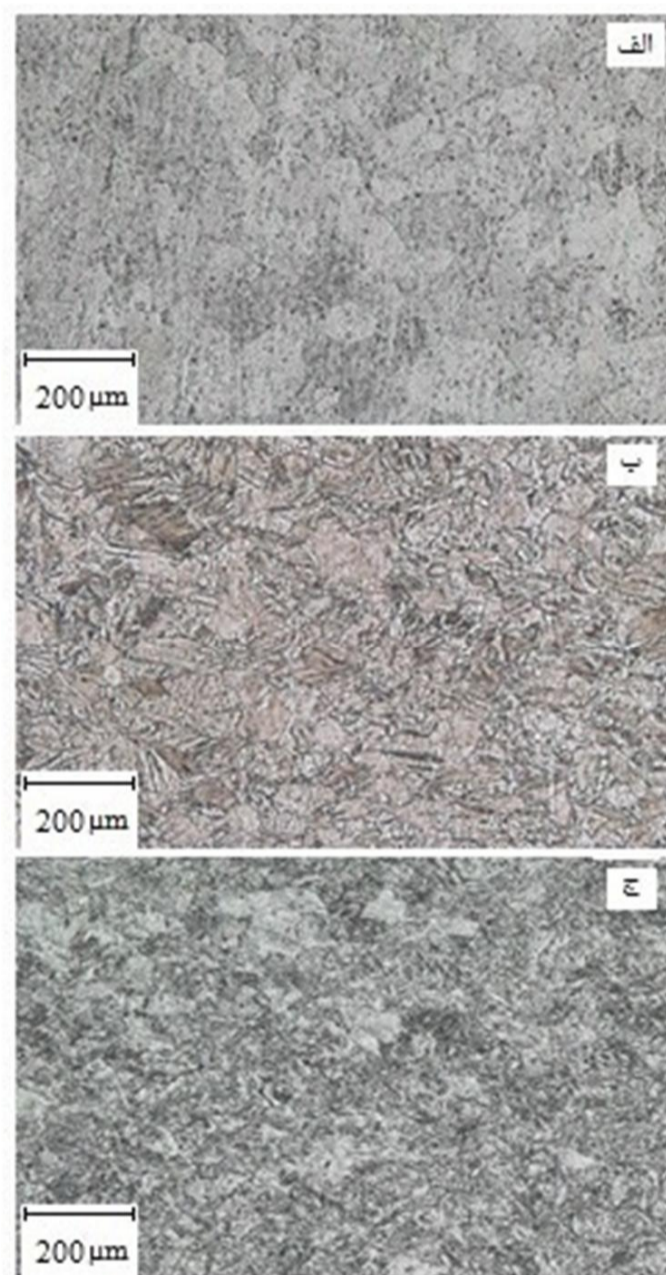
نویسندگان این پژوهش، از پژوهشگاه مرکز آلومینیوم دانشگاه علم و صنعت ایران جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی پرس هیدرولیک و قالب، کمال قدردانی و تشکر را دارند.

7- مراجع

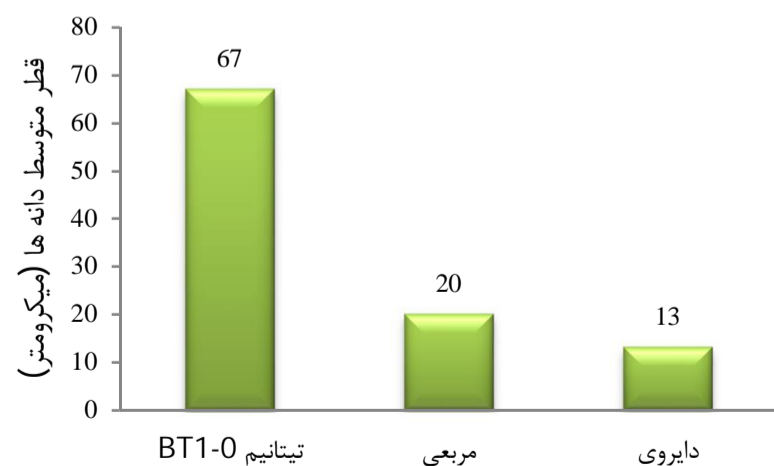
- [1] E. O. Hall, The deformation and aging of mild steel, *Proceedings of the Physical Society*, Vol. B64, pp. 747-753, 1951.
- [2] N. J. Petch, The cleavage strength of polycrystals, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [3] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science*, Vol. 51, pp. 881-981, 2006.
- [4] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi, Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 1230-1235, 2010.
- [5] A. V. Nagasekhar, T. Rajkumar, D. Stephan, Y. Tick-Hon, R.K. Guduru, Microstructure and mechanical properties of pure gold processed by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 524, pp. 204-207, 2009.
- [6] C. Xu, T. G. Langdon, Influence of a round corner die on flow homogeneity in ECA pressing, *Scripta Materialia*, Vol. 48, pp. 1-4, 2003.
- [7] C. Xu, T. G. Langdon, The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP, *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 1542-1550, 2007.



شکل 26 مقایسه سختی ویکرز ماده اولیه و ECAP شده با مقطع مربعی و دایروی



شکل 27 میکروساختار تیتانیوم BT1-0 (الف) آنیل شده، (ب) مقطع مربعی ECAP شده و (ج) مقطع دایروی ECAP شده



شکل 28 قطر متوسط دانه‌ها در سه حالت تیتانیوم BT1-0 آنیل شده و بیلت مربعی و دایروی ECAP شده

- temperature, *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 38, No. 6, pp. 955-957, 2009.
- [33] Y. Zhang, R. B. Figueiredo, S. N. Alhajeri, J. T. Wang, N. Gao, T. G. Langdon, Structure and mechanical properties of commercial purity titanium processed by ECAP at room temperature, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 7708-7714, 2011.
- [34] S. V. Sajadifar, G. G. Yapici, Workability characteristics and mechanical behavior modeling of severely deformed pure titanium at high temperatures, *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 749-757, 2014.
- [35] L. Wang, Y. C. Wang, A. P. Zhilyaev, A. V. Korznikov, S. K. Li, E. Korznikova, T. G. Langdon, Microstructure and texture evolution in ultrafine-grained pure Ti processed by equal-channel angular pressing with subsequent dynamic compression, *Scripta Materialia*, Vol. 77, pp. 33-36, 2014.
- [36] M. Hoseini, M. H. Pourian, F. Bridier, H. Vali, J. A. Szpunar, P. Bocher, Thermal stability and annealing behaviour of ultrafine grained commercially pure titanium, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 532, pp. 58-63, 2012.
- [37] Y. J. Chen, Y. J. Li, J. C. Walmsley, S. Dumoulin, S. S. Gireesh, S. Armada, P. C. Skaret, H. J. Roven, Quantitative analysis of grain refinement in titanium during equal channel angular pressing, *Scripta Materialia*, Vol. 64, pp. 904-907, 2011.
- [38] Y. J. Chen, Y. J. Li, J. C. Walmsley, S. Dumoulin, P. C. Skaret, H. J. Roven, Microstructure evolution of commercial pure titanium during equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 789-796, 2010.
- [39] D. H. Kang, T. W. Kim, Mechanical behavior and microstructural evolution of commercially pure titanium in enhanced multi-pass equal channel angular pressing and cold extrusion, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. S54-S60, 2010.
- [40] G. Purcek, O. Saray, O. Kul, I. Karaman, G. G. Yapici, M. Haouaoui, H. J. Maier, Mechanical and wear properties of ultrafine-grained pure Ti produced by multi-pass equal-channel angular extrusion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 517, pp. 97-104, 2009.
- [41] Z. Fan, H. Jiang, X. Sun, J. Song, X. Zhang, C. Xie, Microstructures and mechanical deformation behaviors of ultrafine-grained commercial pure (grade 3) Ti processed by two-step severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 45-51, 2009.
- [42] V. V. Stolyarov, L. Zeipper, B. Mingler, M. Zehetbauer, Influence of post-deformation on CP-Ti processed by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 476, pp. 98-105, 2008.
- [43] Y. G. Ko, D. H. Shin, K. T. Park, C. S. Lee, An analysis of the strain hardening behavior of ultra-fine grain pure titanium, *Scripta Materialia*, Vol. 54, pp. 1785-1789, 2006.
- [44] G. G. Yapici, I. Karaman, H. J. Maier, Mechanical flow anisotropy in severely deformed pure titanium, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 434, pp. 294-302, 2006.
- [45] V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, I. V. Alexandrov, T. C. Lowe, R. Z. Valiev, Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 299, pp. 59-67, 2001.
- [46] V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. Z. Valiev, Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 303, pp. 82-89, 2001.
- [47] V. L. Sordi, M. Ferrante, M. Kawasaki, T. G. Langdon, Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling, *Journal of Materials Science*, Vol. 47, pp. 7870-7876, 2012.
- [48] S. V. Chertovskikh, Cuttability of UFG titanium BT1-0 obtained by ECAE, *Russian Engineering Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 260-264, 2007.
- [49] A. Yamashita, D. Yamaguchi, Z. Horita, T. G. Langdon, Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 287, pp. 100, 2000.
- [50] Y. Huang, R. B. Figueiredo, T. Baudin, F. Brisset, T. G. Langdon, Evolution of strength and homogeneity in a magnesium AZ31 alloy processed by high pressure torsion at different temperatures, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 14, pp. 1018-1026, 2012.
- [51] R. I. Amaro, R. C. Martins, J. O. Seabra, N. M. Renevier, D. G. Teer, Molybdenum disulphide/titanium low friction coating for gears application, *Tribology International*, Vol. 38, pp. 423-434, 2005.
- [52] M. Nili Ahmadabadi, H. Shirazi, H. Ghasemi-Nanesa, S. Hossein Nezhad, B. Poorganji, T. Furuhaara, Role of severe plastic deformation on the formation of nanograins and nano-sized precipitates in Fe-Ni-Mn steel, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3526-3531, 2011.
- [53] Y. M. Wang, E. Ma, Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 1699-1709, 2004.
- [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, pp. 82-87, 2000.
- [9] Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials, *Scripta Materialia*, Vol. 35, pp. 143-146, 1996.
- [10] N. Q. Chinh, J. Gubicza, T. Czeppac, Developing a strategy for the processing of age-hardenable alloys by ECAP at room temperature, *Material Science Engineering A*, Vol. 516, pp. 248-252, 2009.
- [11] M. R. Roshan, S. Jahromi, R. Ebrahimi, Predicting the critical pre-aging time in ECAP processing of agehardenable aluminum alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 7833-7839, 2011.
- [12] P. R. Cetlin, M. T. P. Aguilar, R. B. Figueiredo, T. G. Langdon, Avoiding cracks and inhomogeneities in billets processed by ECAP, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, pp. 4561-4570, 2010.
- [13] W. J. Kim, J. Y. Wang, Microstructure of the post ECAP aging processed 6061 Al alloys, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 464, pp. 23-27, 2007.
- [14] M. Cai, D. P. Field, G. W. Lorimer, A systematic comparison of static and dynamic ageing of two Al-Mg-Si alloys, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 373, pp. 65-71, 2004.
- [15] J. Gubicza, I. Schiller, N. Q. Chinh, The effect of severe plastic deformation on precipitation in supersaturated Al-Zn-Mg alloys, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 460, pp. 77-85, 2007.
- [16] H. J. Roven, M. Liu, J. C. Werenskiold, Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al Mg-Si aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 483-484, pp. 54-58, 2008.
- [17] L. Collini, A. Bonardi, A micromechanical model of the evolution of stress and strain fields in ultrafine-grained metal structures under tension, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 48, pp. 91-102, 2013.
- [18] R. Lapovok, L. S. Toth, M. Winkler, Comparison of continuous SPD processes for improving the mechanical properties of aluminum alloy 6111, *Journal of materials research*, Vol. 24, pp. 459-469, 2009.
- [19] H. J. Han, Y. J. Suh, K. K. Jee, Evaluation of formability and planar anisotropy based on textures in aluminum alloys processed by a shear deforming process, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 477, pp. 107-120, 2008.
- [20] R. B. Figueiredo, P. R. Cetlin, T. G. Langdon, The processing of difficult to-work alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys, *Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 4769-4779, 2007.
- [21] T. Hanawa, Bio functionalization of titanium for dental implant, *Japanese Dental Science Review*, Vol. 46, pp. 93-101, 2010.
- [22] C. X. Cui, B. M. Hu, L. C. Zhao, S. J. Liu, Titanium alloy production technology, market prospects and industry development, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1684-1691, 2011.
- [23] C. N. Elias, J. H. C. Lima, R. Valiev, M. A. Meyers, Biomedical applications of titanium and its alloys, *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society(TMS)*, Vol. 60, No. 3, pp. 46-49, 2008.
- [24] R. Z. Valiev, I. P. Semenova, V. V. Latysh, H. Rack, T.C. Lowe, J. Petruzelka, L. Dluhos, D. Hrusak, J. Sochova, Nanostructured titanium for biomedical applications, *Advanced Biomaterials*, Vol. 10, No. 3, pp. B15-B17, 2008.
- [25] M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopedic implants-A review, *Progress in Materials Science*, Vol. 54, pp. 397-425, 2009.
- [26] S. L. Semiatin, V. M. Segal, R. E. Goforth, N. D. Frey, D. P. Delo, Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30A, pp. 1425-1435, 1999.
- [27] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, C. T. Wang, Y. Huang, T. G. Langdon, Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 607, pp. 482-489, 2014.
- [28] Y. J. Chen, Y. J. Li, X. J. Xu, J. Hjelen, H. J. Roven, Novel deformation structures of pure titanium induced by room temperature equal channel angular pressing, *Materials Letters*, Vol. 117, pp. 195-198, 2014.
- [29] S. D. Shehreen, A. M. Farghalli, Effect of initial microstructure on the processing of titanium using equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 8179-8186, 2011.
- [30] A. A. M. Filho, V. L. Sordi, M. Ferrante, The effects of severe plastic deformation on some properties relevant to Ti implants, *Materials Research*, Vol. 15, No. 1, pp. 27-31, 2012.
- [31] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, X. Wang, T. G. Langdon, The processing of pure titanium through multiple passes of ECAP at room temperature, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6335-6339, 2010.
- [32] Y. Xirong, Z. Xicheng, F. Wenjie, Deformed microstructures and mechanical properties of CP-Ti processed by multi-pass ECAP at room