ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

مطالعهی ساختار و خواص مکانیکی تیتانیم خالص تجاری پس از فرآیند ترکیبی فشار در کانال زاویهدار مساوی و اکستروژن

 *3 شايور نىكېخت 1 ، محمد افتخارى 2 ، قادر فرجى

1- كارشناس ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه تهران، تهران 2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران * تهران، صندوق پستى hfaraji@ut.ac.ir ، 14395-515

| چکیدہ | اطلاعات مقاله |
|--|--|
| در سالهای اخیر، روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید، به دلیل تولید مواد فوق ریزدانه و نانوساختار و ایجاد خواص مکانیکی فوقالعاده، بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند. اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به فلز، باعث تغییرات ریزساختاری و ایجاد ساختار نانومتری در آن میشود. در این پژوهش بیلتهای فوق ریزدانه و نانوساختار تیتانیم خالص، با استفاده از روش ترکیبی فشار در کانال زاویهدار مساوی (ایکپ) و اکستروژن در | مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 آذر 1395 پذیرش: 13 دی 1395 ارائه در سایت: 29 دی 1395 |
| تعداد پاسهای مختلف (1، 2، 4 و 6 پاس) در دمای فرآیندی 2°400 برای هر دو فرآیند فشار در کانال زاویدار مساوی و اکستروژن، تولید گردید و سپس به مطالعهی میزان تغییر خواص مکانیکی و ریزساختاری بیلتها پرداخته شد. مشاهده گردید خواص مکانیکی بهطور چشمگیری افزایش پیدا کرد. استحکام نهایی در بهترین حالت، 941 مگاپاسکال شد درحالی که استحکام نهایی برای ماده خام 505 مگاپاسکال بود به عبارت دیگر استحکام نهایی 86.3٪ افزایش یافت. این فرآیند ترکیبی استحکام ماده را در یکپاس، در حدود 60.3٪ دوپاس 78.8 چهارپاس 6.83٪ و شش پاس را 80.8٪ نفزایش یافت. این فرآیند ترکیبی استحکام ماده را در یکپاس، در حدود 60.3٪ دوپاس 78.8 چهارپاس 6.84٪ و شش پاس را 80.8٪ نسبت به قطعه خام، افزایش داد. دلیل کاهش نرخ افزایش استحکام در پاسهای بالا، ریز شدن دانهها و رسیدن به حد اشباع خود بود. سختی نمونه پس از فرآیند به اندازه قابل ملاحظهای افزایش و پس از پاسهای بعدی، با سرعت کمتری افزایش یافت. سختی نمونه تا حدود 50.61 ویکرز نسبت به مقدار اولیه 81.85 ویکرز افزایش یافت. درواقع این فرآیند باعث افزایش حدود 164/ یافت. سختی نمونه تا دمود 216.65 ویکرز نسبت به مقدار اولیه 81.85 ویکرز افزایش یافت. درواقع این فرآیند باعث افزایش حدود 164/ وجود حفرههای کی عمق در نمونهها بود. | <i>کلید واژگان:</i> بیلت فوق ریزدانه نشیر شکل پلاستیک شدید فشار در کانال زاویهدار مساوی اکستروژن خواص مکانیکی |

Study of Microstructure and mechanical properties of pure commercial titanium via combination of Equal channel angular pressing and Extrusion

Shapor Nikbakht, Mohammad Eftekhari, Ghader Faraji^{*}

Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran. * P.O.B. 14395-515, Tehran, Iran, ghfaraji@ut.ac.ir

| ARTICLE INFORMATION | ABSTRACT |
|--|--|
| Original Research Paper Received 30 November 2016 Accepted 02 January 2016 Available Online 18 January 2017 | There has been much interest in recent years in improving material properties by grain refinements using severe plastic deformation (SPD). With applying severe plastic deformation to metals, the structure changes and nanostructure is produced. In this study, ultra-fine grained pure titanium is fabricated by combination of Equal channel angular pressing and Extrusion process in different passes |
| Keywords: UFG billet SPD ECAP Extrusion Mechanical properties | (1, 2, 4 and 6 pass). ECAP and Extrusion processes were carried out at 400°C. Then, mechanical and microstructural properties of UFG pure titanium billets produced by the combined process of ECAP and extrusion process were examined and the effect of passes on mechanical and microstructural properties was investigated. The results showed that mechanical properties were improved significantly. Ultimate strength increased up to 941MPa, in the best state, while for initial sample it was 505MPa, in other words, ultimate stress increased about 86.3%. With this combinational method, ultimate stress increased about 60.8% for 1 pass sample, 78.8% for 2 pass sample, 86.3% for 4 pass sample and 80.8% for 6 pass sample rather than initial state. In higher passes the rate of increase is reduced due to the grains size saturation. Hardness increased from 81.85 Hv to 216.65 Hv. In other words, hardness increased 164% from initial value. Further passes of the process only have a minor effect on increasing of billet hardness. Scanning Electron Microscope also revealed that brittle fracture took place in all samples with shallow dimples. |
| فاللبت جوشكاري خوب، سازگاري عاليا: | الم مقدمه المالية . بخته كرم القالم المالية . بخته كرم القالم |

ابل فبول، فابليت جوشد ارى نظر بایو و چگالی پایین آن باعث شده تا از آن بهصورت فزاینده در خودروسازی، هوا - فضا و مصارف پزشکی مانند ایمپلنتها استفاده گردد.

تیتانیم خالص تجاری با استحکام بالا، نقش قابل توجهی را در صنایع مختلف ايفا می کند؛ مقاومت به خوردگی عالی، مقاومت حرارتی بالا، استحکام ویژهی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sh. Nikbakht, M. Eftekhari, Gh. Faraji, Study of Microstructure and mechanical properties of pure commercial titanium via combination of Equal channel angular pressing and Extrusion, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 453-461, 2017 (in Persian)

امروزه یکی از اهداف اصلی فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۱، ارتقای بیشتر خواص مکانیکی تیتانیم خالص تجاری و جایگزین کردن آن با آلیاژهای ناخالص با استحکامِ موجود (که اکثراً دارای عناصر مضر برای بدن انسان هستند) میباشد [1].

روشهای تغییرشکل پلاستیکی شدید یکی از روشهای جدید برای تولید مواد فوق ریزدانه^۲ و نانوساختار است. در این روش با اعمال کرنشهای شدید به نمونه، اندازهی دانهها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و خواص مکانیکی نمونه بهبود چشمگیری مییابد [2]. امروزه روشهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید مانند روش فشار در کانال زاویهدار مساوی^۳ [3]، روش فشار در کانال زاویهدار لولهای[†] [4]، فشار در کانال زاویهدار مساوی مکرر⁴ [5]، پیچش فشار بالا⁴ [6]، نورد اتصال تجمعی^۷ [7]، کنگرهای و صاف کردن متاوب⁴ [8] و انبساط و روزنرانی متناوب⁴ [9] توسعه یافته است.

روش فشار در کانال زاویهدار مساوی یا ایکپ که در فوق به آن اشاره گردید، یکی از روشهای متداول تغییر شکل پلاستیک شدید میباشد. این روش، نخستین بار توسط سیگال و همکاران در دههی 1970 و در کشور روسیه به کار برده شد [1]. نمای شماتیک فرآیند ایکپ در شکل 1 نشان داده شده است. نمونه تحت فشار اعمالی توسط سنبه، با عبور از ناحیه گوشهی (قسمت زانویی) کانال زاویهدار، تحت تغییر شکل شدید برشی قرار گرفته و ریزدانه می گردد سپس از کانال خروجی با همان قطر اولیه بیرون میآید. زمانی که قطعه با اعمال فشار خارجی، از کانال زاویهدار عبور داده می شود، کرنش کلی از رابطهی (1) به دست میآید که متغیرهای آن در شکل 1 مشخص شدهاند و N تعداد یاس یا دفعات انجام فرآیند است [11,10].

$$\varepsilon = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2\cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \tag{1}$$

ترکیب عملیاتی روش ایکپ با روشهایی مانند اکستروژن، نورد و فورج بهمنظور توسعه ی نانوساختار تیتانیم خالص تجاری و رسیدن به خواص بهتر، گاهاً از سوی محققین مورد توجه بوده است؛ ولادمیر و همکاران [12] با ایکپ نمودن تیتانیم خالص تجاری در 8 پاس، در قالب 90 درجه و در دمای 450 درجه سلسیوس و سپس انجام اکستروژن سرد (کاهش سطح مقطع تجمعی 75 درصد) تنها بر روی نمونه 8 پاس ایکپ شده، توانستند تنش تسلیم و استحکام نهایی را به ترتیب از 380 و 460 مگاپاسکال به 700 و 1050 مگاپاسکال برسانند. دانگ و همکاران [13] نیز پس از ایکپ نمودن تیتانیم نادازه دانه از 1.64 میکرومتر به 9.06 میکرومتر رسید؛ آنها در ادامه با انجام اندازه دانه از 1.64 میکرومتر به 9.06 میکرومتر رسید؛ آنها در ادامه با انجام اکستروژن سرد در دمای اتاق (کاهش سطح مقطع 25.5 درصد) تنها بر روی نمونهی 5 پاس ایکپ شده، توانستند درنهایت، استحکام تسلیم را از 202 به تره مگاپاسکال و استحکام نهایی را از 292 به 701 مگاپاسکال برسانند.

راب و همکاران [14] با بررسی تاثیر فرایند ایکپ (قالب 120 درجه)، بر خواص تیتانیم خالص، مشاهده کردند که کاهش دما باعث افزایش فشار هیدرواستاتیک در ناحیه تغییر شکل و کاهش اندازه دانه شد؛ برای مثال با رساندن دمای ایکپ از 300 به 200 درجه، فشار هیدرواستاتیک از 510 به 640



Fig. 1 Schematic illustration of the ECAP facility showing the angles Φ and Ψ [9] شکل 1 نمای شماتیک از فرآیند ایکپ و زوایای $\Phi \in \Psi$ [9]

مگاپاسکال و اندازه دانه از 20.0 به 0.21 میکرومتر رسید. سمیتین و همکاران [15] نشان دادند که تیتانیم خالص گرید 2 در قالب ایکپ 90 درجه و در دمای 25 درجه سلسیوس، در همهی نرخ کرنشها دچار شکست میشود. مطالعات مختلفی مانند [17،16] نشان داد که انجام ایکپ در دمای بالا (450 درجه سلسیوس) و در قالب 90 درجه، میتواند منجر به ایجاد ساختار فوق ریزدانه بر روی تیتانیم خالص تجاری شود. لو و همکاران [18] با بررسی ایکپ تیتانیم خالص تجاری در چند دمای مختلف، مشاهده کردند که با افزایش درصد ازدیاد طول ^{(۱} پایین، به جای افزایش دمای ایکپ یا ازدیاد زاویه قالب، استفاده کردن از فشار پشتی^{(۱۱} بهترین راهکار است که (با افزایش فشار هیدرواستاتیک) باعث بهبود خواص مکانیکی میشود [19]. سان و همکاران [20] تاثیر سه نوع فشار پشتی رایج در ایکپ را بر خواص تیتانیم خالص تجاری در دمای 450 درجه سلسیوس بررسی کردند.

زائو و همکاران [21] توانستند تیتانیم خالص تجاری گرید 1 را در دمای اتاق و در قالب 120 درجه، بهطور موفقیت آمیزی در 8 پاس ایکپ کنند و اندازهی دانه را از 23 میکرومتر به 200 نانومتر و تنش تسلیم و استحکام نهایی را به ترتیب از 275 و 407 مگاپاسکال به 710 و 790 مگاپاسکال برسانند. زائو و همکاران [22] موفق شدند تیتانیم خالص تجاری گرید 1 را در دمای اتاق و در قالب 90 درجه، در 4 پاس ایکپ کنند و اندازهی دانه را از 25 میکرومتر به 150 نانومتر و استحکام نهایی را از 485 به 765 مگاپاسکال برسانند. جاگر و همکاران [22] توانستند تیتانیم خالص تجاری گرید 2 را در 4 پاس، در دمای اتاق، در قالب 90 درجه و همزمان با اعمال فشار پشتی بالا ایکپ کنند و اندازهی دانه را به 150 نانومتر برسانند.

در پژوهشهای پیشینی که مربوط به انجام تلفیق دو روش ایکپ و اکستروژن بر روی تیتانیم خالص تجاری است، محققین تنها آخرین نمونهی ایکپ شده ی خود (که پس از انجام تعداد پاس معینِ ایکپ، به اندازه ی دانه ی اشباع یا نهایت ریزدانگی قابل حصولِ فرآیند رسیده بود) را تحت اکستروژن سرد (در دمای اتاق) قرار دادهاند ولی به تاثیر انجام اکستروژن بعد از انجام هر پاس ایکپ توجه ننمودهاند لذا در پژوهش حاضر بعد از انجام هر پاس ایکپ،

Sever Plastic Deformation (SPD)

² Ultrafine Grained (UG)³ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

⁴ Tube Channel Angular Pressing (TCAP)

⁵ Equal Channel Multi-Angular Pressing (ECMAP)

⁶ High Pressure Torsion (HPT)

⁷ Accumulative Roll Bonding (ARB)

⁸ Repetitive Corrugation and Straightening (RCS)

⁹Cyclic Expansion Extrusion (CEE)

¹⁰ Elongation

¹¹ Back Pressure

فرآيند اكستروژن نيز (با كاهش سطح مقطع 75 درصد يا رساندن قطر مقطع به نصف) بر روی همان نمونه انجام پذیرفت تا تاثیر اکستروژن بر خواص مکانیکی قطعه پس از انجام هر پاس ایکپ مشخص شود. همچنین در این پژوهش برای نخستین بار از اکستروژن گرم (دمای 400 درجه سلسیوس) بعد از انجام فرآیند ایکپ، استفاده شد که مزیت آن نسبت به اکستروژن سرد، استفاده از نیروی کمتر برای تغییرشکل و جلوگیری از افت شدید درصد ازدیاد طول بود. در این پژوهش، فرآیند ایکپ در دمای 400 درجه سلسیوس انجام گرفت. درنهایت مشاهده شد که نتایج بهدست آمده از پژوهش حاضر، به طرز مطلوبی قابل قیاس با نتایج پژوهشهای پیشین بود. یکی از علل انجام فرآیند اکستروژن بعد از ایکپ در پژوهش حاضر، علاوه بر حصول به خواص مکانیکی بالاتر، این است که چون در قالبهای ایکپ، محدودیت استفاده از قطعات با طول زیاد و قطر کم به دلیل خطر کمانش و شکست سنبه وجود دارد لذا امكان توليد پيوسته فراهم نيست. براى حل اين مشكل، ابتدا يك قطعه با قطر بزرگتر از قطر نامی را ایکپ میکنند و سپس با اکستروژن، قطر آن را به اندازهی نامی میرسانند که در جریان این فرآیند طول قطعه افزایش و قطر آن کاهش می یابد و به این طریق، دیگر نیازی به وارد کردن این قطر کم در قالب ایکپ نیست. در پژوهش حاضر نیز از آنجا که هدف تولید قطعه-ای با قطر 5 میلیمتر که مناسب برای ساخت ایمپلنت است، بود و ایکپ کردن چنین قطر کوچکی به دلیل کمانش و شکست سنبه، ممکن نبود لذا ابتدا قطعهای به قطر 10 میلیمتر ایکپ گردید و سپس با انجام اکستروژن قطر آن به 5 میلیمتر رسانده شد.

2- آزمونهای تجربی

1-2- فشار در کانال زاویهدار مساوی (ایکپ) و اکستروژن

در جریان این پژوهش، بیلتهایی از جنس تیتانیم خالص تجاری گرید 2 با قطر 10 میلیمتر و طول 70 میلیمتر به منظور انجام فرآیند، آماده شد. تصویر قالب ایکپ استفاده شده در شکل 2 مشهود است. در شکل 1، اندازه پارامترهای قالب، $^{0}e=\Phi e^{0} = \Phi e^{0}$ انتخاب شد زیرا با استناد به رابطهی (1)، هر چه زوایای $\Phi e \Psi کوچک تر باشند، کرنش اعمال شده به قطعه بیش تر$ $شده و متعاقباً قطعه ریزدانه تر می شود و بنا به [1]، کوچک ترین زوایای <math>\Phi$ و Ψ استفاده شده در تحقیقات پیشین بر روی ایکپ تیتانیم، همان زوایای $^{0}0=\Phi e^{0}$ بود لذا این زوایا برای پژوهش حاضر، انتخاب شدند. به منظور کاهش اصطکاک بین بیلت و دیواره قالب از روان کار مولیبدندی-سولفید¹ استفاده شد [24]. ابتدا 4 نمونهی آزمایشگاهی از جنس مورد مطالعه، با انجام ایکپ در 1، 2، 4 و 6 پاس، در دمای 400 درجه سلسیوس و با سرعت پرس 10 میلیمتر بر دقیقه، به دست آمد. سپس بر روی هر کدام از نمونهها، اکستروژن در همان دمای 400 درجه ی سلسیوس، در یک مرحله و با کاهش سطح مقطع 75 درصد (یا رساندن قطر به نصف) انجام گرفت.

تصویر و نقشهی قالب اکستروژن مورد استفاده در شکل 3 آورده شده است.

2-2- آزمون کشش

در ادامه یکار، 4 نمونه ی آزمون کشش از قطعات ایکپ شده در 1، 2، 4 و 6 پاس، استخراج گردید و 4 نمونه ی آزمون کششِ دیگر نیز از قطعات ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس اکستروژن شده استخراج شد. در آزمون کشش، بهمنظور اندازه گیری خواص مکانیکی در جهت طولی، از نمونههای دمبلی



شکل 2 نمای داخلی قالب ایکپ مورد استفاده



Fig. 3 Schematic illustration of the used extrusion die شکل 3 نمای شماتیک از قالب اکستروژن استفاده شده

شکل با ارتفاع گیج 30 میلیمتر و پهنای 3 میلیمتر و از دستگاه آزمون کشش 2 تنی سنتام^۲ با نرخ کرنش ¹⁻ه 0.001 استفاده شد.

2-3- متالوگرافی نوری

به منظور بررسی تغییرات ریز ساختاری حاصل از تغییر شکل، نمونه های ایکپ و اکستروژن شده پس از انجام آنیل، مقطع زده شد و بعد از آماده سازی (سنباده زنی، پولیش و حکاکی) توسط میکرو سکوپ نوری تحت بررسی قرار گرفتند. نمونه ها در جهت محور اکستروژن و عمود بر جهت آن مقطع زده شدند. عملیات سنباده زنی با استفاده از کاغذهای سیلیسیم کارباید تا شماره 4000 انجام شد. سپس نمونه ها از طریق پولیش مکانیکی و استفاده از محلول آلومینا آماده سازی گردیدند. برای آشکار سازی ریز ساختار نمونه ها، از محلول با ترکیب شمیایی مندرج در جدول 1 استفاده شد [25]. تصاویر ریز ساختاری، با استفاده از میکرو سکوپ نوری مجهز به دوربین دیجیتال تهیه شدند. با وجود اختلاف اندازه قابل ملاحظه بین اندازه دانه متبلور شده و دانه های اولیه، دانه های جدید به راحتی قابل تشخیص بودند. مورفولوژی و رنگ متفاوت دانه های جدید نیز در شناخت آن ها کمک نمود.

| ه مورد استفاده | محلول اچ | مشخصات | 1 | دول |
|----------------|----------|--------|---|-----|
|----------------|----------|--------|---|-----|

| Table 1 | Specifications | of the used e | etching solution | |
|---------|----------------|---------------|------------------|--|
| | | | | |

| H_2O | HF | HNO ₃ | مادہ شیمیایی |
|------------|----|------------------|--------------|
| 88 | 2 | 10 | مقدار (درصد) |

455

2-4- سختی سنجی

بهمنظور مشخص کردن میزان سختی، نمونههای مناسب برای آزمون میکرو سختیسنجی، از بیلتهای ایکپ شده و بیلتهای ایکپ و سپس اکستروژن شده، جدا شد و بعد از آمادهسازی سطح نمونهها و مانت کردن، سختیسنجی با استفاده از دستگاه میکروسختیسنجی ویکرز انجام گرفت. در این آزمون، میزان بار اعمالی 1 کیلوگرم و زمان توقف سنجه بر روی قطعه 10 ثانیه بود. سختی در 6 نقطه در طول ضخامت اندازه گیری شده است.

2-3- شكست نگارى لتوسط آزمون ميكروسكوپ الكترونى روبشى ل

بهمنظور بررسی همگنی سطوح شکست نمونههای آزمون کشش شده و نیز تشخیص مکانیزم نوع شکست، شکست نگاری توسط آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. در این مرحله، از دستگاه هیتاچیس⁷ (مشهود در شکل 4) با دقت 5 نانومتر و ماکزیمم ولتاژ کاری 30 کیلوولت استفاده گردید.

3- نتايج و بحث

(2)

1-3- خواص مکانیکی بهدست آمده از آزمون کشش

نمودارهای بهدستآمده بعد از انجام آزمون کشش بر روی نمونههای ایکپ شده، در شکل 5 و نمونههای ایکپ و سپس اکستروژن شده در شکل 6 مشهود است و خواص مکانیکی بهدستآمده برای همه ینمونهها، در جدول 2 درج گردیده است. با انجام ایکپ بر روی قطعه، بنا به تصویر موجود در بخش بعدی قطعه ریزدانه می گردد و بنا به معادله ی (2) که به معادله یهال پچ⁴ معروف است، با ریز شدن دانهها، استحکام فلز افزایش می یابد [26]. لذا مطابق شکل 5 با افزایش تعداد پاسهای ایکپ (و ریز شدن بیشتر دانهها)، استحکام تسلیم و نهایی افزایش یافت.

$$\sigma_{\rm y} = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}$$

در رابطهی فوق، b اندازه میانگین دانهها، v_{σ} استحکام تسلیم، σ_{σ} k ثابتهای مربوط به ماده هستند. البته باید توجه داشت در اندازه دانهی کوچکتر از حدود 20 نانومتر رفتار هال پچ دیگر صادق نیست و با ریزتر شدن دانهها، استحکام کاهش مییابد [27]. در عموم روشهای تغییرشکل پلاستیک شدید، اندازهی دانه بزرگتر از 20 نانومتر است لذا میتوان از رابطهی هال پچ برای توجیه این موارد بهره جست. با اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید، ضمن کاهش اندازهی دانهها، رو 20 ماره می می وان از مرابطهی موان و 20 می و 20 ماره و 20



Fig. 4 Used SEM devices

شكل 4 دستگاه SEM مورد استفاده



Fig. 5 Stress-Strain curve for ECAP performed samples with specific number of pass



Fig. 6 Stress-Strain curve for ECAP and Extrusion performed samples شکل 6 نمودار تنش-کرنش برای قطعات ایکپ و اکستروژن شده

جدول 2 خواص مکانیکی بهدست آمده از همهی نمونه های آزمایش Table 2 Obtained mechanical properties from all experimental samples

| درصد ازدیاد طول (%) | تنش نھایی (MPa) | تنش تسليم (MPa) | نمونه |
|---------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| 24 | 505 | 341 | 0 پاس ايکپ (حالت اوليه) |
| 19.2 | 620 | 440 | 1 پاس ايکپ |
| 17.3 | 719 | 528 | 2 پاس ايکپ |
| 20.4 | 921 | 682 | 4 پاس ايکپ |
| 22 | 840 | 605 | 6 پاس ايکپ |
| 12.4 | 695 | 506 | 0 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 11.2 | 812 | 609 | 1 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 10.4 | 903 | 693 | 2 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 11.5 | 941 | 711 | 4 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 12 | 913 | 655 | 6 پاس ايکپ + اکستروژن |

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دورہ 17، شمارہ 1

Fractography

² SEM ³ Hitachis

⁴ Hall-Petch relation

اختلال در حرکت نابهجاییها شده و به همین دلیل، استحکام را افزایش می دهند. عامل دیگری که در مواد فوق ریزدانه باعث افزایش استحکام ماده می شود، کرنش سختی⁽ است. بر اثر انجام تغییر شکل پلاستیک شدید، چگالی عیوبی نظیر نابه جایی، جای خالی و مرزدانه های جدید افزایش خواهد یافت. وجود تمامی این عیوب در ماده منجر به افزایش تنش سیلان ماده خواهد شد. وجود فشار هیدرواستاتیک در روش های تغییر شکل پلاستیک شدید نقش مهمی در افزایش استحکام مواد فوق ریز دانه ایفا می کند زیرا در حضور فشار هیدرواستاتیک، تمرکز جاهای خالی در حین تغییر شکل پلاستیک افزایش خواهد یافت. در این حالت نفوذ نابه جاییها در جاهای خالی به سختی انجام می شود و فرآیند حذف نابه جاییها کند می شود. در نهایت با کند شدن فرآیند حذف نابه جاییها، نرخ کرنش سختی افزایش می یابد [28].

پس از انجام فرآیند ایکپ (که یکی از روشهای رایج تغییرشکل پلاستیک شدید است) بر روی نمونهها، بنا به دلایل ذکر شده در فوق و نیز مطابق شکل 5، استحکام افزایش و درصد ازدیاد طول متقابلاً کاهش پیدا كرد. بعد از انجام اولين پاس ايكپ، تغييرشكل برشي خالص در قطعه اتفاق میافتد و دانهها در جهت طولی کشیده میشوند و مرزدانههای با زاویهی کم شكل مى گيرند كه باعث افت درصد ازدياد طول مى شود [29] لذا بنا به شكل 5، در پاسهای 1 و 2 مشاهده می گردد که استحکام افزایش ولی درصد ازدیاد طول کاهش پیدا کرده است. همچنین مطالعات در دماهای مختلف نشان داده است که بعد از انجام پاس اول ایکپ، تعداد زیادی دوقلویی، در جهت کشیده شدن دانهها وجود دارد. بعد از انجام چند پاس ایکپ، درصد ازدياد طول و استحكام همزمان و با هم بيشتر مى شوند كه علت آن، افزايش درصد مرزدانهای با زاویهی زیاد، بهبود همگنی ریزساختار و کاهش پهنای باندهای برش است [29]. در پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید (بنا به شکل 5) در پاسهای 4 و 6 هم درصد ازدیاد طول و هم استحکام نسبت به پاس-های 1 و 2 بیشتر شد. بنا به پژوهشهایی مانند [31،30] بعد از انجام 4 تا 6 پاس ایکپ در دمای 450-200 درجه سلسیوس (البته بسته به اندازه اولیه دانه و مسیر انجام ایکپ) بر روی تیتانیم خالص، ماده از نظر مکانیکی و اندازهی دانه به حد اشباع میرسد. در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که بعد از 4 و 6 پاس ایکپ، نمودارها و خواص مکانیکی (به خصوص درصد ازدیاد طول) به هم نزدیک شدند و نیز بنا به تصاویر ریزساختار نمونهها بعد از انجام ایکپ (که در ادامه آورده شده است)، اندازهی دانهها در پاسهای 4 و 6 نزدیک به هم بود که همگی این نشانهها حاکی از وجود حالت اشباع در حوالی پاس 6 بود. ولی علت این که استحکام نمونه ی6 پاس از نمونه ی 4 پاس کمتر شد می توانست ناشی از تغییر مکانیزم تغییر شکل پلاستیک با ریزتر شدن دانهها و رسیدن به اندازه دانهی اشباع ضمن تاثیر همزمان دمای 400 درجهی سلسیوس فرآیند ایکپ باشد.

در ادامهی کار، بنا به شکل 6، با انجام اکستروژن بر روی نمونههای ایکپ شده و نمونهی خام اولیه، مشاهده گردید که برای همهی نمونهها، استحکام، افزایش ولی درصد ازدیاد طول، کاهش پیدا کرد که این روال تغییر خواص مکانیکی، مشابه پژوهشهای [13،12] بود زیرا با انجام اکستروژن، دانهها در جهت طولی کشیدهتر شده و چگالی نابهجاییها هم بیشتر می گردد که این امر، باعث افزایش استحکام و کاهش درصد ازدیاد طول می شود.

بنا به شکل 6 مشاهده شد که در نمونههای 4 و 6 پاس، مقدار استحکام و

درصد ازدیاد طول نزدیک به هم بودند که این میتوانست گویای یک حالت اشباع در خواص مکانیکی با انجام اکستروژن با درصد کاهش 75 درصد باشد. نمونه 6 پاس ایکپ و اکستروژن شده دارای بیشترین درصد ازدیاد طول (البته بعد از نمونه خام) در بین سایر نمونهها بود. با این حال مطلوبترین خواص مکانیکی برای قطعه 2 پاس ایکپ و اکستروژن شده بهدست آمد به-طوری که درصد ازدیاد طول آن نزدیک به نمونه 6 پاس بود و بیشترین مشاهده شد که استحکام تسلیم از 131 به 117 مگاپاسکال و استحکام نهایی از 505 به 140 مگاپاسکال رسید؛ چنین خواصی، قابل مقایسه با خواص میایسکال و درصد ازدیاد طول آن درصد [23]) بود که امروزه برای مصارف تیتانیم تجاری گرید 5 (با تنش تسلیم و تنش نهایی بهترتیب 795 و 800 ایمپلنتها کاربرد دارد. اما تیتانیم تجاری گرید 5 دارای عناصر ناخالصی مضر برای بدن انسان است. لذا نمونه ی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده (که از برای بدن انسان است. لذا نمونه ی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده (که از برای بدن انسان است. لذا نمونه ی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده (که از جنس تیتانیم تجاری گرید 5 بوده و درصد خلوص بالاتری دارد) میتواند جایگزین

بهترین خواص بهدست آمده از پژوهش حاضر، با روش تلفیقی مشابه انجام شده در سایر مقالات، مقایسه گردید. به این ترتیب که ولادمیر و همکاران [12] با ایکپ نمودن تیتانیم خالص تجاری در 8 پاس، در قالب 90 درجه و در دمای 450 درجه سلسیوس و سپس با انجام اکستروژن سرد (کاهش سطح مقطع تجمعی 75 درصد) تنها بر روی نمونهی 8 پاس ایکپ شده، توانستند تنش تسليم و استحكام نهايي را به ترتيب از 380 و 460 مگاپاسكال به 970 و 1050 مگاپاسکال برسانند. در جریان کار ولادمیر، درصد ازدیاد طول از 28 به 8 درصد رسید. دانگ و همکاران [13] نیز پس از ایکپ نمودن تیتانیم خالص تجاری در 5 پاس و در دمای 450 درجه سلسیوس و سپس با انجام اکستروژن سرد در دمای اتاق (کاهش سطح مقطع 25.5 درصد) تنها بر روی نمونهی 5 پاس ایکپ شده، توانستند درنهایت، استحکام تسلیم را از 202 به 708 مگاپاسکال و استحکام نهایی را از 292 به 791 مگاپاسکال برسانند. در جریان کار دانگ، درصد ازدیاد طول از 44.5 به 19.7 درصد رسید. در پژوهش حاضر، میزان بهبود استحکام بهتر از نتایج دانگ ولی مقداری پایینتر از نتایج ولادمير بود آن هم به اين دليل بود كه ولادمير از اكستروژن سرد بعد از ايكپ استفاده کرده بود که احتمال وقوع درشتدانگی و تبلور مجدد را نداشت، ضمن این که فشار هیدرواستاتیکی در کار وی بالا بود. البته باید توجه داشت در پژوهش حاضر به خاطر گرم انجام شدن اکستروژن، این مزیت نیز وجود داشت که میزان افت درصد ازدیاد طول کمتر از کار دانگ و ولادمیر بود به طوری که در نمونهی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده، مشاهده گردید که درصد ازدیاد طول از 24 به 11.5 درصد افت کرد و این یعنی تغییری معادل با 12.5 درصد که در کار ولادمیر و دانگ میزان این تغییر بهترتیب برابر با 20 و 24.8 درصد بود.

3–2- نتايج سختىسنجى

نمودارهای بهدست آمده بعد از انجام آزمون میکروسختی ویکرز در راستای ضخامت نمونههای ایکپ شده، در شکل 7 و نمونههای ایکپ و سپس اکستروژن شده در شکل 8 مشهود است و میانگین عدد سختی بهدست آمده برای همهی نمونهها، در جدول 3 درج گردیده است. با انجام ایکپ بر روی قطعه، بنا به تصویر موجود در بخش بعدی، قطعه ریزدانه می گردد و بنا به معادلهی (3) که به معادلهی هال پچ برای سختی معروف است و دلایل گفته شده در بخش قبل، با ریز شدن دانهها، سختی فلز افزایش می یابد [26]. لذا

¹ Strain Hardening

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دورہ 17، شمارہ 1



Fig. 7 Vickers hardness number plot for ECAP performed samples with specific number of pass





Fig. 8 Vickers hardness number plot for ECAP and Extrusion performed samples

شکل 8 نمودار عدد سختی ویکرز برای قطعات ایکپ و اکستروژن شده

جدول 3 میانگین میکروسختی بهدستآمده از نمونههای آزمایش Table 3 Obtained average of microhardness from experimental samples

| ميانگين عدد ميكروسختي ويكرز | diani |
|-----------------------------|-------------------------|
| (Hv) | 540 |
| 81.85 | 0 پاس ايکپ (حالت اوليه) |
| 196.06 | 2 پاس ايکپ |
| 209.91 | 4 پاس ايکپ |
| 206.51 | 6 پاس ايکپ |
| 172 | 0 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 207.3 | 2 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 216.65 | 4 پاس ايکپ + اکستروژن |
| 212.8 | 6 پاس ايکپ + اکستروژن |

مطابق شکل 7 با افزایش تعداد پاسهای ایکپ (و ریز شدن بیشتر دانهها)، سختی افزایش یافته است. در معادلهی (3)، *d* اندازهی میانگین دانهها، *H* سختی، ₀ *d* ژ *X* ثابتهای مربوط به ماده هستند.

$$H = H_0 + \frac{K'}{\sqrt{d}} \tag{3}$$

بنا به شکل 7 مشاهده شد که با انجام ایکپ، سختی قطعه به بیش از دو برابر آن در قطعهی خام اولیه رسید بهطوریکه در قطعهی 4 پاس ایکپ شده

بیشترین سختی بهدست آمد (که معادل Hv 209.9 بود درحالی که سختی قطعهی خام اولیه Hv 81.85 بود). همچنین مشاهده شد که بعد از انجام ایکپ در پاسهای مختلف، مقدار سختی در حال رسیدن به یک مقدار اشباع بود به گونهای که تغییرات آن در پاسهای بالاتر زیاد نبود. بنا به شکل 8، بعد از انجام اکستروژن مشاهده شد که مقدار سختی برای نمونههای چند پاس ایکپ شده مقدار کمی افزایش یافت ولی سختی قطعهی خام تقریبا دو برابر شد. درنهایت، بیشترین مقدار سختی، برای قطعهی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده بهدست آمد (که معادل Hv 216.65 بود درحالی که سختی قطعهی خام اولیه H1.85 Hv بود).

3-3- نتایج متالوگرافی نوری

تصاویر بهدستآمده از میکروسکوپ نوریِ مجهز به دوربین دیجیتال، برای نمونههای ایکپ شده، در شکل 9 و نمونههای ایکپ و سپس اکستروژن شده در شکل 10 مشهود است.

شکل 9 تغییرات ریزساختاری در حین فرآیند ایکپ در مقطع برش داده شده در راستای عمود بر محور را نشان میدهد. همانطور که پیشبینی می-شد ریزساختار نمونه بعد از پاس اول کاملا متفاوت با ریزساختار اولیه است. در ریزساختارهای نمونههای ایکپ شده به وفور دوقلویی^۱ دیده میشود که علت آن کمبود سیستمهای لغزش در فلزات با ساختار هگزاگونال متراکم^۲ میباشد [33]. در واقع دوقلویی، نقشی اساسی در تغییرشکل فلز تیتانیوم ایفا میکند. همان طور که در شکل 9 مشهود است با افزایش تعداد پاس ایکپ، اندازهی دانه کوچکتر شده و در پاس چهارم به حالت اشباع خود رسیده است. به عبارت دیگر دانهها در پاس چهارم به حدی ریز شدهاند که با افزایش تعداد



 Fig. 9 Optical microscope photos of ECAP performed sample in (a) 0 pass, (b) 1 pass, (c) 2 pass, (d) 4 pass and (e) 6 pass

 1 (ب) سکل 9 تصاویر میکروسکوپ نوری از قطعهی ایکپ شده در (الف) 0 پاس، (ب) پاس، (ج) 2 پاس، (د) 4 پاس و (ه) 6 پاس

¹Twining ² HCP



Fig. 10 Optical microscope photos of ECAP performed sample in (a) 0 pass, (b) 1 pass, (c) 2 pass, (d) 4 pass and (e) 6 pass and then had been extruded

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ نوری از قطعهی ایکپ شده در (الف) 0 پاس، (ب) 1 پاس، (ج) 2 پاس، (د) 4 پاس و (ه) 6 پاس و سپس اکسترود شده

پاس، دیگر تاثیری در اندازهی دانه دیده نمیشود و افزایش پاسهای ایکپ، تنها در همگن شدن دانهها موثر است. در پاس ششم دانههای کاملا همگن نسبت به پاسهای قبلی قابل مشاهده است. شکل 10 تصویر میکروسکوپی ریزساختار نمونههای ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس اکستروژن شده را نشان میدهد؛ همانطور که در این شکل مشهود است ساختاری کاملاً متفاوت از ساختار اولیه بوجود آمده است. دانهها به قدری ریز شدهاند که دیگر با میکروسکوپ نوری نمیتوان ریزساختار آن را مشاهده نمود و فقط فازها که به طور همگن پخش شدهاند قابل رویت است. برای بررسی بیشتر ریزساختار نیاز به تجهیزات ایبیاسدی^۱ و تیایام^۲ است.

3-4- نتایج شکست نگاری توسط آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این مطالعه از میکروسکوپ الکترونی روبشی یا اسایام^۲ برای تهیهی تصاویر سطح شکست نمونههای آزمون کشش استفاده شد و اطلاعات سودمندی با مقایسه و تشخیص نوع مکانیزم شکست برای نمونههای اولیه (خام)، دو پاس، چهار پاس و شش پاس ایکپ شده بهدست آمد. شکل 11 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونههای آزمون کشش اولیه (خام) و ایکپ شده در دمای بالا را نمایش میدهد. شکل 11 (الف) مربوط به سطح شکست نمونهی خام اولیه میباشد که نشان دهنده شکست ترد با حفرههای هم محور و کم عمق با سایز 2-0.5 میکرومتر میباشد. مورفولوژی سطح شکست در نمونه ی 2 پاس ایکپ شده در شکل 11 (ب)

¹ EBSD ² TEM ³ SEM



 Fig. 11 SEM obtained fractography photos of ECAP performed sample

 in (a) 0 pass, (b) 2 pass, (c) 4 pass and (d) 6 pass

 شكل 11 تصاوير شكستنگارى بهدستآمده از اس اى ام براى قطعهى ايكپ شده در

 (الف) 0 پاس، (ب) 2 پاس، (ج) 4 پاس و (د) 6 پاس

نشان داده شده است. این تصویر گویای وجود ساختاری همگن و حفرههای کم عمق است که نشاندهندهی شکست ترد می باشد. نکته مهمی که باید به آن توجه داشت این است که شکل و جهت گیری این حفرهها به ترتیب، نشان گر نوع بار هنگام کشش و مسیر پیشرفت ترک می باشد. شکل 11 (ب)، گویای ایجاد شرایط کرنش پلاستیک غیر یکنواخت از قبیل بارگذاری برشی می باشد. وقوع شکست در این تصویر، می تواند ناشی از شکست برشی بین حفرهها باشد که به نظر می رسد تحت کنترل تغییر شکل برشی ساده است. این مکانیزم اغلب باعث می شود که شکست نهایی با برش حفرهها اتفاق بیفتد. شکل 11 (ج) و (د) به ترتیب مورفولوژی سطح شکست آزمون کشش تصویر مشهود است با افزایش تعداد پاس، میزان کرنش برشی اعمالی افزایش پیدا کرده و بر درجهی تردی افزوده شده است. این درجهی تردی با کاهش

شديد اندازه قطر حفرهها و از بين رفتن ديوارهها مشخص است.

4- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، بیلتهای فوق ریزدانه و نانوساختار تیتانیم خالص، با استفاده از روش ترکیبی فشار در کانال زاویه دار مساوی (ایکپ) و اکستروژن در تعداد پاسهای مختلف (۱، 2، 4 و 6 پاس) در دمای فرآیندی 2°400 برای هر دو فرآیند فشار در کانال زاویه دار مساوی و اکستروژن، تولید گردید و سپس به مطالعه ی میزان تغییر خواص مکانیکی و ریزساختاری بیلتها پرداخته شد. در این مطالعه برای اولین بار به تأثیر انجام اکستروژن بعد از انجام هر پاس ایکپ توجه شد و برای نخستین بار از اکستروژن گرم بعد از انجام فرآیند ایکپ، استفاده شد که مزیت آن نسبت به اکستروژن سرد، استفاده از نیروی کمتر برای تغییر شکل و جلوگیری از افت شدید درصد ازدیاد طول بود. درنهایت مشاهده شد که منایج به دستآمده از پژوهش حاضر، به طرز مطلوبی قابل قیاس با نتایج پژوهش های پیشین بود. برخی از نتایج مهمی که در این تحقیق به دست آمد عبارت بود از:

1- با انجام فرآیند تلفیقی پیشنهاد شده در این پژوهش، مشاهده گردید که نمونه 6 پاس ایکپ و اکستروژن شده دارای بیشترین درصد ازدیاد طول (البته بعد از نمونه خام) در بین سایر نمونهها بود. بااینحال مطلوبترین خواص مکانیکی، برای قطعه 2 پاس ایکپ و سپس اکستروژن شده بهدست آمد بهطوری که درصد ازدیاد طول آن نزدیک به نمونه 6 پاس ایکپ و بیشترین استحکام تسلیم و نهایی را داشت. در همین قطعه 2 پاس ایکپ و اکستروژن شده مشاهده شد که استحکام تسلیم از 341 به 711 مگاپاسکال و استحکام نهایی از 505 به 410 مگاپاسکال رسید. این فرآیند ترکیبی استحکام ماده را در یکپاس، در حدود 608٪، دوپاس 718،، چهار پاس 6.8% و ششپاس را 80.8٪ نسبت به قطعه خام، افزایش داد. دلیل کاهش نرخ افزایش

2- با مقایسه ی بهترین خواص به دست آمده از پژوهش حاضر، با نتایج مطالعات پیشین، مشاهده گردید که در پژوهش حاضر، استحکام در حد مطلوبی افزایش پیدا کرده بود ضمن این که میزان افت درصد ازدیاد طول، کمتر از نتایج تحقیقات پیشین بود؛ به طوری که در نمونه ی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده، مشاهده گردید که درصد ازدیاد طول از 24 به 11.5 درصد افت کرد و این یعنی تغییری معادل با 2.51 درصد بود.

3- سختی نمونه پس از انجام فرآیند ترکیبی به اندازه قابل ملاحظه ای افزایش و پس از پاس های بعدی، با سرعت کمتری افزایش یافت. مقدار سختی تا حدود 216.65 ویکرز (در نمونهی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده) نسبت به مقدار اولیه 81.85 ویکرز افزایش یافت. درواقع این فرآیند باعث افزایش حدود 164/ در سختی گردید. در پاس های بعدی مقدار افزایش سختی کمتر بود.

4- نتایج متالوگرافی گویای این بود که با افزایش تعداد پاس ایکپ، آندازهی دانه کوچکتر شده و در پاس چهارم به حالت اشباع خود رسید. به عبارت دیگر دانه ها در پاس چهارم به حدی ریز شدند که با افزایش تعداد پاس، دیگر تأثیری در اندازهی دانه دیده نمی شد و افزایش پاسهای ایکپ، تنها در همگن شدن دانهها موثر بود. در نمونههای ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس شدن دانهها موثر بود. در نمونههای ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس وجود آمده بود و دانهها به قدری ریز شده بودند که با افزایش تعداد پاس، دیگر شدن دانهها موثر بود. در نمونههای ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس قدون دانهها موثر بود. در نمونههای ایکپ (با تعداد پاس معین) و سپس آیکستروژن شده نیز مشاهده شد که ساختاری کاملاً متفاوت از ساختار اولیه به وجود آمده بود و دانهها به قدری ریز شده بودند که دیگر با میکروسکوپ نوری قابل رویت نبودند. برای بررسی بیشتر ریزساختار نیاز به تجهیزات ایبیاس-

5- تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی یا اس ای م حاکی از شکست ترد و وجود حفرههای کمعمق در نمونههای ایکپ شده بود.

6- خواص مکانیکی نمونهی 4 پاس ایکپ و سپس اکستروژن شده، به طرز خوبی قابل مقایسه با خواص تیتانیم تجاری گرید 5 بود که امروزه برای مصارف ایمپلنتها کاربرد دارد. اما تیتانیم تجاری گرید 5 دارای عناصر ناخالصی مضر برای بدن انسان است. لذا نمونهی 4 پاس ایکپ و اکستروژن شده (که از جنس تیتانیم گرید 2 بوده و درصد خلوص بالاتری دارد) میتواند جایگزین خوبی برای تیتانیم تجاری گرید 5 باشد.

5- مراجع

- P. S. Roodposhti, N. Farahbakhsh, A. Sarkar, K. L. Murty, Microstructural approach to equal channel angular processing of commercially pure titanium—A review, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 5, pp. 1353-1366, 2015.
- [2] S. H. Hosseini, K. Abrinia, G. Faraji, Upper bound analyses of novel backward extrusion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 369-376, 2014. (in Persian (فارسى))
- [3] K. Abrinia, S. Orangi, Investigation of process parameters for the backward extrusion of arbitrary-shaped tubes from round billets using finite element analysis, *Journal of Materials Engineering* and Performance, Vol. 18, No. 9, pp. 1201-1208, 2009.
- [4] A.S. Mohammadi, M.M. Mashhadi, G. Faraji, The effect of pass numbers over microstructure and mechanical properties of magnesium alloy of AZ31C in the tubular channel angular pressing(TCAP) at temperature of 300°C, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.15, No.1, pp.126-130, 2015. (in Persian فارسي)
- [5] K.P. Mashhadi, 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, 2015. (in Persian فارسی)
- [6] A. Farhoumand, R. Ebrahimi, Analysis of forward-backwardradial extrusion process, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 2152-2157, 2009.
- [7] W. B. Bae, D. Y. Yang, An upper-bound analysis of the backward extrusion of tubes of complicated internal shapes from round billets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 157-173, 1993.
- [8] V. Shatermashhadi, B. Manafi, K. Abrinia, G. Faraji, M. Sanei, Development of a novel method for the backward extrusion, *Materials & Design*, Vol. 62, pp. 361-366, 2014.
- [9] N. Pardis, B. Talebanpour, R. Ebrahimi, S. Zomorodian, Cyclic expansion-extrusion (CEE): A modified counterpart of cyclic extrusion-compression (CEC), *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 25, pp. 7537-7540, 2011.
- [10] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733-4741, 1997.
- [11] M. A. Ranaei, A. Afsari, B. S. Y. Ahmadi, M.M. Moshksar, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2014. (in Persian نفارسی)
- [12] 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*, Vol. 303, No. 1, pp. 82-89, 2001.
- [13] 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 & Design*, Vol. 31, pp. S54-S60, 2010.
- [14] G. Raab, E. Soshnikova, R. Valiev, Influence of temperature and hydrostatic pressure during equal-channel angular pressing on the microstructure of commercial-purity Ti, *Materials Science and Engineering*, Vol. 387, pp. 674-677, 2004.
- [15] S. Semiatin, D. DeLo, V. Segal, R. Goforth, N. Frey, Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-04

8186, 2011.

- [25] M. Shirooyeh, J. Xu, T.G. Langdon, Microhardness evolution and mechanical characteristics of commercial purity titanium processed by high-pressure torsion, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 614, pp.223-231, 2014.
- [26] A. V. Sergueeva, V. V. Stolyarov, R. Z. Valiev, A. K. Mukherjee, Advanced mechanical properties of pure titanium with ultrafine grained structure, *Scripta Materialia*, Vol. 45, No. 7, pp. 747-752, 2001.
- [27] M. P. Phaniraj, M. J. N. V. Prasad, A. H. Chokshi, Grain-size distribution effects in plastic flow and failure, *Materials Science* and Engineering: A, Vol. 463, No. 1–2, pp. 231-237, 2007.
- [28] H. Torabzadeh, G. Faraji, A review of the production of ultrafine grained and nanograined metals by applying severe plastic deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 271-282, 2016. (in Persian فارسي)
- [29] Y. Xirong, Z. Xicheng, F. Wenjie, Deformed Microstructures and mechanical properties of CP-Ti processed by multi-pass ECAP at room temperature, *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 38, No. 6, pp. 955-957, 2009.
- [30] D. Gunderov, A. Polyakov, I. Semenova, G. Raab, A. Churakova, E. Gimaltdinova, Evolution of microstructure, macrotexture and mechanical properties of commercially pure Ti during ECAPconform processing and drawing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 562, pp. 128-136, 2013.
- [31] Y. Chen, Y. Li, J. Walmsley, S. Dumoulin, S. Gireesh, S. Armada, Quantitative analysis of grain refinement in titanium during equal channel angular pressing, *Scripta Materialia*, Vol. 64, No. 9, pp. 904-907, 2011.
- [32] K. Hajizadeh, B. Eghbali, K. Topolski, K. J. Kurzydlowski, Ultrafine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ECAP at warm deformation region, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 143, No. 3, pp. 1032-1038, 2014.
- [33] D. H. Shin, I. Kim, J. Kim, Y.T. Zhu, Shear strain accommodation during severe plastic deformation of titanium using equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 334, No. 1, pp. 239-245, 2002.

angular extrusion at cold-working temperatures, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, No. 5, pp. 1425-1435, 1999.

- [16] V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, I. V. Alexandrov, T. C. Lowe, R. Z. Valiev, Grain refinement and properties of pure Ti processed by warm ECAP and cold rolling, *Materials Science and Engineering:* A, Vol. 343, No. 1, pp. 43-50, 2003.
- [17] P. Luo, D. McDonald, W. Xu, S. Palanisamy, M. Dargusch, K. Xia, A modified Hall–Petch relationship in ultrafine-grained titanium recycled from chips by equal channel angular pressing, *Scripta Materialia*, Vol. 66, No. 10, pp. 785-788, 2012.
- [18] P. Luo, D. McDonald, S. M. Zhu, S. Palanisamy, M. Dargusch, K. Xia, Analysis of microstructure and strengthening in pure titanium recycled from machining chips by equal channel angular pressing using electron backscatter diffraction, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 538, pp. 252-258, 2012.
- [19] R. Y. Lapovok, The role of back-pressure in equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, No. 2, pp. 341-346, 2005.
- [20] I. H. Son, J. H. Lee, Y. T. Im, Finite element investigation of equal channel angular extrusion with back pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 3, pp. 480-487, 2006.
- [21] 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, No. 23, pp. 6335-6339, 2010.
- [22] 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.
- [23] A. Jager, V. Gartnerova, K. Tesar, Microstructure and anisotropy of the mechanical properties in commercially pure titanium after equal channel angular pressing with back pressure at room temperature, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 644, pp. 114-120, 2015.
- [24] S. S. Dheda, F. A. Mohamed, Effect of initial microstructure on the processing of titanium using equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, No. 28, pp. 8179-