ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

بررسی بر گشت فنری تیتانیم خالص تجاری فوقریزدانه در آزمون خمکاری سهنقطهای رضا ناصری¹، مهران کدخدایان^{2*}، محمود شریعتی²

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

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

* مشهد، صندوق پستى 9177948944، 9177948944

چکیدہ	اطلاعات مقاله
پرسکاری در کانالهای هممقطع زاویهدار (ECAP) یکی از موثرترین فرایندها جهت تولید مواد با ساختارهای فوقریزدانه و نانوکریستال میباشد. تیتانیم خالص تجاری از خود زیستسازگاری عالی نشان میدهد. لذا پتانسیل بالایی برای استفاده به عنوان بایومواد دارد. استحکام استاتیکی و دینامیکی پایین، یکی از نقاط ضعف این ماده محسوب میگردد. این عیب میتواند با اعمال فرایند ECAP بر آن برطرف گردد. یکی از جراب ترین بالیات ها در فاین شکار در میشت مرحص بیاریزمی جران الان تک در حزب باید داری باید ای قان باید مواد با	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 تیر 1395 پذیرش: 23 شهریور 1395 ارائه در سایت: 16 آبان 1395 سرب بایی
از مساس ترین پارامترها در قرایند شکل دهنی ورقی و عجمی، پدیدهای جبران ۱۱ سبیک در خین بزبرداری یا بر نسب قبری است. این پدیده به تغییرات نامطلوب ابعادی و هندسی در محصول نهایی منجر میشود و باید تا حد امکان مرتفع گردد. در این مطالعه تیتانیم خالص تجاری گرید 2، در دمای محیط تا سه گذر تحت فرایند ECAP با زاویه کانال 135 درجه قرار گرفت. آنالیز میکروساختاری و آزمون های استاتیکی کشش و خمش سه نقطه ای روی تیتانیم اولیه و ECAP شده تا 3 گذر انجام شد. ارزیابی میکروساختاری نشان داد که با اعمال فرایند ECAP، ساختار درشتدانه به فوق ریزدانه تکامل مییابد. همچنین آزمون های مکانیکی اثبات کرد که اعمال فرایند ECAP، استحکام استاتیکی را به میزان	کلید <i>وارگان:</i> تیتانیم خالص تجاری پرسکاری در کانالهای هممقطع زاویهدار استحکام استاتیکی خمکاری میانقطهای
چشمگیری افزایش میدهد. بررسی برگشت فنری بعد از اعمال خمش سەنقطەای روی نمونەهای اولیه و ECAP شده به دو روش تجربی و شبیهسازی المان محدود با استفاده از نرمافزار آباکوس، نشان داد که با اعمال گذرهای بالاتر ECAP، بر میزان برگشت فنری افزوده میشود. لذا این نقطه ضعف باید در تولید محصولات دارای خم ساخته شده از مواد ECAP شده، لحاظ شود و طراحیهای لازم جهت رفع پدیدهی برگشت فنری در محصول نهایی صورت گیرد.	بر شب قبری

The investigation of spring-back of UFG commercially pure titanium in threepoint bending test

Reza Naseri, Mehran Kadkhodayan^{*}, Mahmoud Shariati

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran * P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, kadkhoda@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 17 July 2016 Accepted 13 September 2016 Available Online 06 November 2016

Keywords: Commercially Pure Titanium Equal Channel Angular Pressing Static strength Three-point bending Spring-back

ABSTRACT

Equal channel angular pressing (ECAP) is one of the most effective processes to produce ultra-fine grain (UFG) and nano-crystalline (NC) materials. Commercially pure titanium (CP-Ti) has significant potential to be used as a biomedical and implant material because it shows excellent biocompatibility properties. This material has the low static and dynamic strengths. By applying the ECAP process, the strength of CP-Ti could be developed. The elastic recovery during unloading or spring-back phenomenon is one of the most sensitive parameters in sheet and bulk metal forming processes. This phenomenon leads to some unfavorable geometrical and dimensional changes in the final products and it must be decreased. In this study CP-Ti of Grade 2 is ECAPed at the room temperature via a channel angle of 135° for 3 passes. The microstructural analysis and mechanical tests such as the tensile and three-point bending tests are all performed on the ECAPed CP-Ti. The microstructural evolution reveals that by applying the ECAP, coarse grain (CG) structure develops to UFG structure. Moreover, the results of the mechanical tests show that applying the ECAP significantly increases tensile and bending strengths of the CP-Ti. Investigation of spring-back in three-point bending of unECAPed/ECAPed CP-Ti is conducted by experimental and finite element simulation methods using the Abaqus software. The results of this study reveal that by applying the ECAP, spring-back values increase. Thus, to eliminate the disadvantages of spring-back phenomenon, this should be considered in design and manufacturing of products including bent made of ECAPed material.

مخصوص بالا، مدول یانگ پایین، مقاومت خوردگی عالی، زیستسازگاری مناسب، دوام در دماهای بالا، قابلیت ریختهگری قابل قبول و قابلیت جوشکاری خوب منجر شدهاند تیتانیم به عنوان یکی از محبوبترین و

امروزه تیتانیم و آلیاژهای آن به طور گسترده در صنایع گوناگون مورد استفاده واقع میشوند. ویژگیهای مثبتی نظیر چگالی پایین، استحکام

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati, The investigation of spring-back of UFG commercially pure titanium in three-point bending test, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 266-276, 2016 (in Persian)



تكەتكەشدگى اتفاق مىافتد [18,17,14]. تحقيقات صورت گرفته روى اعمال

فرایند ECAP بر این آلیاژها نشان داده است که می توان این مشکلات را با

افزایش زاویهی قالب، افزایش دمای فرایند، کاهش سرعت پرسکاری، استفاده

از فشار پشتی و آنیل کنترل شده برطرف کرد [20,19,17,16,6]. تیتانیم و

آلیاژهای آن نیز مانند دیگر فلزات با ساختار شش وجهی فشرده بسیار سخت

است که در دمای اتاق تغییر شکل پلاستیک روی آنها انجام شود. لذا تیتانیم

نیاز دارد که در دماهای نسبتا بالا (ECAP (473-863 K) شود تا مقاومت

تغییرشکل آن کاهش یابد [21,3]. تاکنون تحقیقات زیادی جهت ایجاد

تیتانیم خالص تجاری فوقریزدانه در دماهای بالا انجام شده است [25-22].

از آنجا تغییرشکل پلاستیک در دمای اتاق یا به عبارتی کارسرد، تبلور مجدد و

رشد دانهها را متوقف می کند [26]؛ ECAP در دمای محیط نسبت به دمای

بالا جهت ریزکردن اندازهی دانه تا مقیاس میکرو و نانو موثرتر است و به

ریزشدگی مطلوب دانهها منتهی می شود و همینطور از لحاظ عملیاتی ساده تر

تحقیقات کمی روی اعمال فرایند ECAP در دمای محیط بر تیتانیم خالص تجارى انجام شده است؛ كه عموما شامل ارزيابى ميكروساختار

فوقريزدانه [29-32] و بررسی رفتار مکانيکی ماده شامل رفتار کششی و

فشاری [33-37]، رفتار خستگی [38]، سختی [39-41] و همگنی سختی

[35] بوده است. در همهی مطالعات انجام شده استحکام استاتیکی و

دینامیکی و همچنین سختی به صورت خیلی چشمگیر افزایش یافتهاند.

مقاومت خوردگی تیتانیم فوق ریزدانه نیز بررسی گردید که بهبود رفتار

خوردگی مشاهده شده است [43,42]. اخیرا نیز جهت بررسی کارپذیری

تیتانیم خالص تجاری و همگنی ساختار تولید شده درحین فرایند ECAP از شبیه سازی المان محدود استفاده شد و با استفاده از بررسی فاکتور تخریب و

توزيع نرخ كرنش هندسهى قطعهكار بهينه براى اعمال ECAP بر تيتانيم

خالص در دمای محیط طراحی شد [27] و اثر هندسهی سطح مقطع بیلت بر

پدیدهی برگشت فنری¹³ نقش بسیار مهمی را بازی میکند و عدم دقت ابعادی ناشی از برگشت فنری یک نگرانی اصلی محسوب می شود. برگشت

فنری ناشی از بازگشت الاستیک ماده در حین باربرداری در خمکاری است که

منجر به تغییرات هندسی در محصول تولیدی خواهد شد. برگشت فنری بر

زاویه و انحنای خم تأثیر مستقیم می گذارد. همچنین تحت شرایط خاص

ممکن است زاویه ی نهایی خم کمتر از مقدار اصلی باشد که از آن به عنوان رفت فنری¹⁴ یاد می شود [45]. مقدار رفت و برگشت فنری توسط پارامترهای

گوناگونی نظیر شکل و ابعاد ابزار، شرایط اصطکاک تماسی، خواص ماده،

محیط، خواص مکانیکی استاتیکی نظیر استحکام کششی و فشاری و سختی

تیتانیم خالص تجاری فوق ریزدانه شده را به عنوان یکی از مهمترین خواص

بایوموادها مورد بررسی قرار دادهاند. در این تحقیق تیتانیم خالص تجاری

گرید 2 تحت تغییر شکل توسط فرایند ECAP تا سه گذر موفق بدون

ترکخوردگی در مسیر B_{C} در دمای اتاق قرار گرفت و جهت بررسی برگشت

فنری؛ آزمونهای کشش و خمش سه نقطهای انجام شد. هدف اصلی بررسی

آزمایشگاهی و نرمافزاری میزان برگشت فنری تیتانیم خالص ECAP شده و

اکثر مطالعات انجام شده روی ECAP تیتانیم خالص تجاری در دمای

ناهمسانگردی ماده و ضخامت آن تحت تأثیر واقع می گردد [46].

در صنعت شکلدهی خصوصا در فرایند خمکاری ورقی و حجمی،

استحكام استاتيكي و همكني كرنش مورد بررسي واقع گرديد [44].

است [28,27].

پرکاربردترین فلزات در صنایع اتومبیلسازی، هوافضا و بایو پزشکی به عنوان ایمپلنتهای ارتوپدیک و دندانی مورد استفاده واقع شود [1-3]. آلیاژ تیتانیم Ti-6Al-4V یکی از رایجترین و پرکاربردترین آلیاژهای تیتانیم است که دارای درصد قابل توجهی از عناصر آلومینیم و وانادیم میباشد [3,1]. اثبات شده است که این عناصر، مشابه عناصر آلیاژی دیگر نظیر نیکل، کبالت و کروم سمی بوده و با آزادسازی یونی در طولانی مدت، منجر به ایجاد بيمارى هاى عصبى، آلزايمر، سرطان، التهاب و ورم پوست، استخوان نرمى و دیگر امراض می گردند [4,3]. لذا تقاضا برای جایگزینی تیتانیم خالص تجاری (CP-Ti¹) که مقدار عناصر آلیاژی در آنها قابل چشم پوشی است و هزینهی. کمتری دارد؛ بجای آلیاژهای تیتانیم در کاربردهای بایوپزشکی رو به افزایش است [5,3]. عيب اصلى تيتانيم خالص تجارى، استحكام مكانيكي پايين آن در مقایسه با آلیاژهای تیتانیم نظیر Ti-6Al-4V است. این یکی از دلایل اصلی عدم استفادهی گسترده از آن در صنایع است که منجر می شود آلپاژهای تیتانیم جایگزین آن گردند [1].

در میان روشهای فراوان تغییرشکل پلاستیکی شدید (SPD²)، پرسکاری در کانالهای هم مقطع زاویه دار (ECAP³) یکی از موثرترین و پركاربردترين تكنيكها ميباشد [6-8]. اين فرايند كه توسط سگال و همکارانش در دههی 1970 در روسیه معرفی شد [9]؛ میتواند با استفاده از ابزارهای ساده، قطعهکارهایی بزرگ فلزی با ساختار نسبتا همگن فوقریزدانه و المرزدانههای زاویهبالا ($\rm HAGBs^{5}$) و با ($\rm UFG/NC^{4}$) و با هندسهی مناسب تولید کند [10,8,6]. در این روش با استفاده از اعمال کرنشهای بالا بر مادهی درشتدانه (CG⁶) و ایجاد چگالی بالایی از نابجایی ها و آرایش مجدد آنها جهت تشکیل مرزدانه های جدید، اندازه دانههایی در رنج زیرمیکرومتر یا نانومتر ایجاد می گردد و مرزدانههای زاویه پایین (LAGBs⁷) به مرزدانه های زاویه بالا تکامل می یابند؛ لذا استحکام استاتیکی و دینامیکی ماده طبق تئوری هال-پچ⁸ [6] به شدت افزایش مییابد [12,11,6]. در حین فرایند ECAP، نمونه یفازی از میان دو کانال متقاطع با سطح مقطع یکسان پرسکاری می شود و ماده تحت تنش برشی ساده قرار گرفته و در نتیجه کرنش پلاستیک شدید بر ماده اعمال می گردد. زاويهى بين دو كانال يا زاويهى قالب توسط پارامتر φ و زاويهى انحنا يا زاویهی گوشه توسط پارامتر ψ تعریف می شوند [13]. از آنجایی که سطح iمقطع بيلت يا قطعه كار بعد از فرايند تغيير نمى كند؛ مى توان فرايند را روى آن بیلت در هر مسیر 9 با اسامی B_{C} ، B_{A} ، A و C تکرار کرد. به هر تکرار فرایند در هر مسیر یک گذر¹⁰ گفته می شود.

فلزات و آلیاژها با سیستم کریستالی شش وجهی فشرده (HCP¹¹) نظیر تیتانیم و منیزیم و همچنین آلیاژهای با قابلیت پیرسختی بالا نظیر آلیاژ آلومینیم 7075، شکل پذیری کمی از خود به خصوص در دمای اتاق و دماهای پايين نشان مىدهند. اين آلياژها به عنوان آلياژهاى سختكارپذير¹² دستهبندی می شوند [14-17]. در صورت اعمال کارسرد بر این آلیاژها نظیر ECAP در دمای پایین؛ به دلیل سیلان ناپایدار ماده؛ ترکخوردگی و

Commercially Pure Titanium Severe Plastic Deformation

Equal Channel Angular Pressing

Ultra-Fine Grain/Nano-Crystalline

High-Angle Grain Boundaries Coarse Grain

Low-Angle Grain Boundaries

Hall-Petch

⁹ Route

⁰ Pass

 ¹¹ Hexagonal Close Packed
 ¹² Difficult-to-work alloys

 ¹³ Spring back
 ¹⁴ Spring go or spring forward

اثر گذرهای فرایند بر آن و همین طور اعتمادسنجی نرمافزار المان محدود آباکوس جهت پیشبینی برگشت فنری در خمهای پلاستیک است. لازم به ذکر است که آزمون خمش سه نقطهای نمونههای ECAP شده و بررسی اثر افزایش کارسختی بر میزان برگشت فنری آنها در این فرایند، تاکنون مورد بررسی واقع نشده است و از این حیث مورد توجه است.

2- مواد و روش آزمایش 1-2- مواد

مادهی مورد استفاده در آزمایشهای تجربی حاضر یک قطعهکار دو فلزی بوده است. كاهش نيروى پرسكارى، بهبود خواص مكانيكى، افزايش همگنى تغییر شکل و افزایش یکنواختی توزیع کرنش موثر [47,15] از دلایل استفاده از نمونهی دوفلزی میباشد. میله گردهای تیتانیم خالص تجاری گرید 2 به عنوان مادهی هسته یا بیلت در غلافهایی از جنس آلومینیم 7075 به صورت انطباق پرسی قرار داده شد. شکل شماتیک و ابعاد نمونهی دوفلزی مورد استفاده در شکل 1 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی تیتانیم خالص تجاری گرید 2 و آلیاژ آلومینیم 7075 که با استفاده از روش اسپکترومتری نشری بدست آمده است؛ نیز در جدول 1 نشان داده شده است. جهت پایدارسازی و همگنی میکروساختار و حذف تنشهای پسماند [33]، تیتانیم خالص تجاری در دمای °200 برای یک ساعت آنیل و در هوا و در کورهی خاموش سرد شد [48]. آلومینیم 7075 نیز در دمای C[°]415 برای یک ساعت آنیل و در خارج از کوره سرد شد [15]. با این عملیات حرارتی، یک میکروساختار هممحور با میانگین اندازه دانهی درشت 55 میکرومتر برای تیتانیم همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است؛ بدست آمد.

ECAP -فرايند-2-2

فرایند ECAP در دمای اتاق با استفاده از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت اسمی 60 تن و با سرعت رم 9 mm/s انجام شد. برای انجام فرایند ECAP از قالبی با سطح مقطع دایروی با قطر کانال 15 mm و با زاویهی کانال 135 درجه و زاویهی گوشهی 20 درجه استفاده شد. در هر گذر جداگانه کرنشی در حدود 0.46 بر نمونهی دوفلزی اعمال می گردد [6]. شکل های 3 و 4 نمایی شماتیک و واقعی از قالب فرایند ECAP مورد استفاده و همچنین



Fig. 1 Schematic illustration and dimensions of the bimetallic rod specimen for ECAP.

شکل 1 شکل شماتیک و ابعاد نمونهی دوفلزی برای ECAP.

جدول 1 تركيب شيميايي تيتانيم خالص گريد 2 و آلومينيم 7075 (درصدوزني) composition of G 2 CP Ti and Al-7075 allow (% wt)

Table 1 Chemical composition of 0.2 CF-11 and AI-7073 anoy (%wt).									
Х	0	Н	Ν	С	Fe	Ti	Grade 2 CP-Ti		
0	0.06	0.001	0.03	0.02	0.02	Base			
Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al	A 17075	
0.05	0.21	0.34	0.36	1.47	2.73	5.78	Base	AI/0/3	



Fig. 2 Optical microstructures of CP-Ti after annealing شکل 2 میکروساختار CP-Ti بعد از آنیل بدست آمده از میکروسکوپ نوری.

پیکربندی فرایند شکلدهی را نشان میدهند. جهت کاهش نیروی اصطکاک بین نمونه و دیوارهی قالب از روانکار با نام تجاری مولیکوت¹ استفاده شد. در ابتدا نمونهها تا چهار گذر در مسیر B_C که نمونه 90 درجه در یک جهت بین هر گذر چرخانده می شود [49]؛ تحت فرایند قرار گرفتند. این مسیر فرایند بدین دلیل انتخاب شد که منجر به تشکیل سریع میکروساختار فوقریزدانه و نانوکریستال همگن و هممحور با مرزهای زاویهبالا می گردد [51,50]. بعد از جدا کردن غلافها از بیلتهای تیتانیمی با ارهکاری، ترکهایی در سطح بالایی بیلت تیتانیمی در گذر چهارم مشاهده شد. لذا جهت تولید نمونههای فوقریزدانهی سالم و بدون ترکخوردگی، همهی نمونههای دوفلزی تا گذر سوم در دمای محیط با مسیر B_C پرس شدند و کلیهی آزمایشهای تجربی متعاقب بر نمونههای ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای 1، 2 و 3 انجام شد. شکل 5 نمونههای دوفلزی را قبل و بعد از فرایند ECAP و همچنین تصویر ماکروسکوپیک نوری از ترکهای سطحی در گذر چهارم را نشان میدهد. جهت مشاهدهی ترکهای سطحی از ماکروسکوپ نوری اوليمپس² استفاده شد.

3-2-آزمایشهای تجربی

آزمونهای کشش و خمش سه نقطهای برای بررسی خواص مکانیکی استاتیکی تیتانیم خالص درشتدانه و فوقریزدانه و مقایسهی آنها انجام شد. ارزيابي ميكروساختار و مقايسهي اندازه دانه نيز روى نمونههاي اوليه و ECAP شده صورت گرفت. همچنین جهت تعییین میزان برگشت فنری، زاویهی بارگذاری و باربرداری نیز در حین فرایند خمش سهنقطه به ازای نمونههای حاصل از گذرهای 0 الی 3 بررسی شد.

جهت بررسی تغییرات میکروساختار تیتانیم قبل و بعد از ECAP و اثبات ریزشدگی دانهها، از میکروسکوپ نوری اولیمپس³ استفاده شد. نمونه-های متالوگرافیکی برای آنالیز میکروساختار از وسط بیلت و عمود بر جهت پرسکاری بریده شدند. سپس با استفاده از ورق سنبادههای سیلیکون کارباید⁴ به ترتيب با شمارههای 100، 400، 600، 1000، 1200 و 2000 سنباده زنی شده و متعاقبا با پولیش کاری مکانیکی به صورت اتوماتیک با استفاده از ذرات آلومینای 0.3 میکرومتر تا سطح شبهآینه پولیش شدند. سپس این نمونههای مطالعاتی، برای نشان دادن مرزدانهها با غوطهوری تا 70 ثانیه در محلول 5

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.11.43.6

MOLYKOTE ® 1000 PASTE

² Olympus SZX9 Olympus BX60M

 $^{^{5}}$ H₂O (100 mL) + H₂O₂(35%) (5 mL) + HF (2 mL)

رضا ناصری و همکاران

محتوی آبمقطر، اسید فلوئوریدریک و هیدروژن پراکسیاد؛ اچ شدند. اندازه متوسط دانهها از تصاویر میکروساختاری، با روش جدایش خطی¹ و با استفاده از نرمافزار تحلیل عکس ²MIP و بر طبق استاندارد 96-112 ASTM E تعیین شد.

استحكام مكانيكي تيتانيم خالص تجارى درشتدانهى اوليه و فوقريزدانه



Fig. 3 Schematic and real illustrations of ECAP die with bimetallic specimen.

شکل 3 شکل شماتیک و حقیقی از قالب ECAP با نمونهی دوفلزی.



Fig. 4 Hydraulic press and ECAP die setup. شکل 4 پیکربندی پرس هیدرولیک و قالب ECAP.



Fig. 5 Bimetallic specimens (a) Before ECAP, (b) After ECAP, and (c)
 Optical macroscopic image of surface cracks after forth pass ECAP.
 و ECAP فمونههای دوفلزی، (a) قبل از فرایند ECAP، (b) بعد از فرایند ECAP.
 (c) تصویر ماکروسکوپیک نوری از ترکهای سطحی بعد از گذر چهارم ECAP.

آزمون خمش راه سادهای جهت ارزیابی کیفیت مواد و شکل پذیری آنها در حین یک خم پیوسته است. در این آزمون توانایی ماده در مقاومت به ترکخوردگی و یا دیگر ناپیوستگیهای سطحی بررسی میشود. جهت انجام آزمون خمش سه نقطهای، نمونههای خمش روی دو تکیهگاه گرد با شعاع مشخص قرار گرفته و سنبهای با نرخ ثابت جابجایی و با هندسهی مشابه با تکیهگاهها، در وسط دو تکیهگاه بر نمونه نیرو وارد میکند و خم مطلوب در نمونه شکل می گیرد. شکل شماتیک آزمون خمش سهنقطهای در شکل 6

³ Zwick Z250

¹ Line intercept method

² Microstructural Image Processing

[[] Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-30

نشان داده شده است. در شکل 6، پارامترهای *C، w. t. r. J. و F* به ترتیب فاصلهی بین تکیهگاههای پایینی، شعاع انتهای سنبه، ضخامت، پهنا و طول نمونهی تیر و نیروی اعمالشده هستند. اندازهی پارامترهای *C، t. r. g w. t. r. ر* نیز به ترتیب برابر 43، 5، 3.8 5 و 75 میلیمتر میباشد.

در این مطالعه، با استفاده از بیلتهای اولیه و ECAP شده در گذرهای 1، 2 و 3، نمونههای خم کاری با ابعاد نشان داده شده در شکل 6 ساخته شد. شکل 7 نمایی شماتیک و واقعی از نمونهها را قبل از آزمون خمکاری نشان میدهد. آزمون خمش سه نقطهای بر طبق استاندارد ASTM E 290-97a با استفاده از دستگاه هیدرولیک تک محورهی زوئیک مورد استفاده در آزمون کشش و در سرعت ثابت 1 mm/min [25] و در دمای محیط انجام شد. پیکربندی آزمون خمش سه نقطهای در شکل 8 نشان داده شده است.

جهت مقایسهی میزان برگشت فنری در آزمون تجربی، زاویهی بین دوپای نمونهی خمشده در جابجایی حداکثری 26 میلیمتر با استفاده از نقالهی صنعتی با دقت 0.5 درجه در حین بارگذاری، اندازهگیری شد. بعد از باربرداری میزان برگشت فنری و بازشدگی خم به وضوح در نمونههای ایکپ



Fig. 6 Schematic and real view of fixture for the three-point bending test.

شکل 6 نمای شماتیک و واقعی قیدوبند برای آزمون خمش سه نقطهای.



Fig. 7 Schematic and real appearance of the bending specimens before three-point bending test.

شکل 7 نمونههای شماتیک و واقعی خمکاری قبل از آزمون خمش سه نقطهای.

نشده و ایکپ شده مشاهده شد. مقدار زاویهی بین دو پای نمونهی خم بعد از باربرداری نیز با استفاده از نقالهی صنعتی اندازه گیری گردید. شکل 9 زاویهی خم را در حین بارگذاری نشان میدهد. این زاویه تقریبا با کمی اغماض، زاویهی بین راستای میانهی ضخامت در دو پای خمکاری در نظر گرفته شد.

3- شبيهسازي المان محدود

در این تحقیق از شبیهسازی المان محدود با استفاده از نرمافزار آباکوس¹ جهت بررسی مقدار برگشت فنری طی آزمون خمش سه نقطه استفاده شد. تکیهگاههای پایینی و سنبه به صورت اجزای صلب تحلیلی و از نوع مش R3D4² و نمونههای خمکاری به صورت انعطاف پذیر و از نوع مش ²



Fig. 8 The three-point bending test set-up. شکل 8 ترکیببندی آزمون خمش سه نقطهای.



Fig. 9 Bending angle in the three point bending specimen during loading.

شکل 9 زاویهی خم در نمونهی خمکاری سهنقطهای درحین بارگذاری.

¹ Abaqus/CAE 6.12-1

 ² A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral
 ³ An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1395، دورہ 16، شمارہ 11

بر حسب هندسهی نشان داده شده در شکل 6 و ابعاد منطبق بر آزمون تجربی مدل شدند. شکل 10 نمایی از ترکیببندی اجزاء فرایند خمکاری سه نقطهای شامل دوتکیهگاه، سنبه و نمونهی خمکاری را در محیط نرمافزار بعد از اعمال مش بهینه نشان میدهد. جهت انجام شبیهسازی، تکیهگاههای پایینی در همهی درجات آزادی ثابت و سنبه با سرعت 1 mm/min تا 26 میلیمتر مطابق با حالت آزمایشگاهی به سمت پایین حرکت داده شد. حرکت سنبه صرفا درجهت محور Y بوده و در سایر درجات آزادی شش گانه مقید گردید. جهت تحلیل پلاستیک فرانید خمکاری، خواص الاستیک- پلاستیک تیتانیم خالص تجاری اولیه و ECAP شده طی گذرهای 1 الی 3 که از طریق آزمون کشش تکمحوره بدست آمد، به نرمافزار وارد شد. جهت حذف وابستكي نتايج به تعداد المانها و دستيابي به نتايج شبيهسازي صحيح، تعداد المان های نمونه ی خمکاری بر اساس حساسیت مش تعیین و با مقایسه ی نیروی حاصل از شبیه سازی با مقادیر حاصل از آزمون تجربی، به نتایج شبیهسازی اعتماد شد. نتایج بررسی حساسیت مش نشان داد که بزرگترین اندازهی مش 0.475 میلیمتر یا به عبارتی 13904 تعداد المان برای نمونهی خمکاری، جهت بهینهسازی فرایند در هر چهار خمکاری نمونههای اولیه و 3 پاس ECAP شده مناسب است. در مورد تکیه گاهها و سنبه به دلیل صلب بودن قطعات، به مقادير اندازهى المان پيش فرض نرمافزار يعنى 1 ميلىمتر يا به عبارتی تعداد 465 المان اعتماد شد.

جهت اندازه گیری مقدار برگشت فنری از نتایج شبیه سازی، از نمونهی خمکاری شده در حین بار گذاری در جابجایی 26 میلیمتر و بعد از باربرداری توسط خروجی نرمافزار آباکوس تصویرهای تغییرشکل پلاستیک تهیه شد و با استفاده از نرمافزار دیجیمایزر ¹ زاویهی بین راستای تارخنثی (خط میانی ضخامت نمونه) در دو پای نمونهی خمکاری شده در دو مرحلهی بارگذاری و باربردای، مقایسه شد. اختلاف زاویهی بین راستای تارخنثی در دو پای نمونهی خمکاری مقدار برگشت فنری را نشان میدهد.

هدف از شبیهسازی المان محدود در این مطالعه، بررسی برگشت فنری نمونههای ECAP شدهی دارای خم پلاستیک و قابلیتسنجی امکان استفاده از نرمافزار آباکوس جهت تحلیل پدیدهی برگشت فنری و تحلیل نیرویی خمکاری سه نقطهای نمونههای با کارسختی متفاوت بوده است.

4- نتايج و بحث

1-4- ميكروساختار

میکروساختار تیتانیم خالص تجاری گرید 2، قبل و بعد از اعمال فرایند ECAP تا سه گذر در شکل 11 ارائه شده است. شکل 11 عکسهای بدست آمده از میکروسکوپ نوری را نشان میدهد. این تصاویر میکروسکوپیک به خوبی ریزشدگی دانهها و میکروساختار کشیده شده را در اثر تغییرشکل پلاستیکی شدید سرد نشان میدهد. اندازه دانهی میانگین از 55 میکرومتر برای مادهی ECAP نشده، به ترتیب به 11، 3 و 0.65 میکرومتر بعد از گذرهای اول، دوم و سوم بهبود پیدا کرد. همان طور که مشخص است با افزایش تعداد گذرهای ECAP دانهها ریزتر می شوند. بعد از گذر اول، باندهای برشی موازی شامل چگالی بالایی از نابجاییها، باندهای پیچیدهتر متقاطع در دو جهت مختلف و چگالی بالایی از دوقلوییهای موازی با ساختار کشیده شده تشکیل می شود. توسعهی مرزدانه های زاویه پایین به مرزدانه های زاویه بالا بعد از اولین گذر ECAP در فلزات با ساختار شبکهی کریستالی شش وجهی نظیر تیتانیم همواره اتفاق میافتد [53,39,36,6]. در گذرهای بالاتر



Fig. 10 A view of the three point bending test configuration in the software interface **شکل 10** نمایی از ترکیببندی خمکاری سه نقطهای در محیط نرمافزار.

ساختارهای باندشدهی پیچیده تشکیل شده و با افزایش تعداد گذرها، دانههای درشت و کشیدهشده، کشیدهتر نمی شوند بلکه ساختار یکنواخت و بدون حضور ساختارهای باند شده تشکیل می گردد [39,36].

2-4-استحكام كششى

همهی نمونههای کشش در دمای اتاق تا گسیختگی کامل تحت آزمون كشش واقع شدند. منحنىهاى تنش-كرنش مهندسى تيتانيم خالص تجارى ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای 1 الی 3 در شکل 12 نشان داده شده است. جدول 2 مقادیر تنش تسلیم (σ_y)، تنش نهایی (σ_u) و ازدیاد طول تا شکست (δ) بدست آمده از آزمون کشش را ارائه میدهد. همانطور که دیده میشود افزایش چشمگیری در مقدار استحکام کششی در گذر اول بدست میآید و از میزان ازدیاد طول نسبی کاسته میشود. در گذرهای دوم و سوم، استحكام به صورت تدريجي افزايش مييابد ولى ازدياد طول نسبى تقريبا ثابت باقى مىماند. اين نتايج اثبات مىكند كه افزايش استحكام چشمگیر و همچنین شکل پذیری مناسبی بعد از اعمال فرایند ECAP بر تيتانيم خالص تجارى به وجود مىآيد. لازم به ذكر است كه اين نتايج انطباق خوبی با مطالعات گذشته دارد [41,39,31]. بهبود خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی ناشی از ریزشدن دانهها و وجود کسر بالایی از میکروساختارهای همگن و هممحور با دانههای زاویه بالا و ناهمسو می باشد .[54,6]

3-4- استحكام خمشى

به منظور بررسی استحکام خمشی و شکلپذیری تیتانیم خالص تجاری گرید 2 قبل و بعد از فرایند ECAP، آزمون خمش سه نقطهای در دمای اتاق انجام شد. جهت مقایسه یاستحکام خمشی، مقدار جابجایی برای همه ی نمونهها ثابت و برابر 26 میلیمتر در نظر گرفته شد. منحنیهای نیروی خمشی-جابجایی مادهی ECAP نشده و ECAP شده تا 3 گذر در سرعت جابجایی 1 mm/min در دو حالت تجربی و شبیه سازی المان محدود در شکل 13 ارائه شده است. مقادير 603، 787، 904 و 1158 نيوتن بيانگر مقادير نيروى بيشينه در حالت تجربي و مقادير 627، 824، 936 و 1203 نيوتن بيانگر مقادیر نیروی بیشینه در حالت شبیهسازی و هرکدام به ترتیب برای مادهی ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای اول تا سوم می باشند. انطباق مناسبی بین نتایج نیروی بیشینهی حاصله از شبیهسازی و تجربی وجود دارد

¹ Digimizer 4.1.1.0



Fig. 12 Engineering stress-strain curves for un-ECAPed and ECAPed CP-Ti samples for 1-3 passes.

شکل 12 منحنیهای تنش-کرنش مهندسی برای تیتانیم خالص تجاری ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای 1 الی 3.

جدول 2 خواص کششی تیتانیم خالص تجاری بعد از گذرهای 0 الی 3. **Table 2** Tensile properties of CP-Ti samples for 0-3 passes of ECAP.

		1	1	
δ	σ_u	σ_y	Passes	
(%)	(MPa)	(MPa)	(N)	
38.7	396	174	0	
20	531	183	1	
18.9	613	216	2	
19.5	715	273	3	





Fig. 13 Experimental and simulation bending load-displacement curves of ECAPed Grade 2 CP-Ti specimens through 0-3 passes. شکل 13 منحنیهای نیرو- جابجایی حاصله از نتایج تجربی و شبیهسازی در خمکاری نمونههای تیتانیم خالص تجاری ECAP شده در گذرهای 0 الی 3.



Fig. 11 OM images showing the microstructures after ECAP through (a) 1 pass (b) 2 passes and (c) 3 passes.

شکل 11 تصاویر حاصله از میکروسکوپ نوری بعد از اعمال ECAP، (a) گذر اول، (b) گذر دوم و (c) گذر سوم.

که این موضوع قابلیت اعتماد به نرمافزار آباکوس را در تحلیل تغییرشکلهای پلاستیک می ساند. همان طور که دیده می شود با اعمال فرایند ECAP و افزایش تعداد گذرها، نیروی مورد نیاز جهت خمکاری سه نقطهای نمونههای خمشی افزایش یافته است. این نتیجه بیانگر این است که می توان علاوه بر استحکام کششی، استحکام خمشی را نیز با اعمال فرایند ECAP بر تیتانیم خالص به میزان چشمگیری ارتقاء داد. دلیل افزایش استحکام خمشی با اعمال فرایند ECAP را نیز می توان به ریز شدگی دانه ها و تکامل به آرایه ای از مرزدانه های زاویه بالا و افزایش نابجایی ها نسبت داد [6].

4-4-برگشتفنری

نمایی از تغییرشکل نمونههای خمکاری در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در نرمافزار شبیهسازالمان محدود، در شکل 14 نشان داده شده است. با در

نظر گرفتن میانه یضخامت قطعات به عنوان تار خنثی و محاسبه ی زاویه ی بین راستاهای دو پای نمونه ی خمکاری، مقادیر زاویه ی خم در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در حالت شبیه سازی المان محدود محاسبه شد. مقدار زاویه ی خم در حین بارگذاری در پایین ترین حد جابجایی یعنی 26 میلی متر محاسبه شد. شکل 15 نمایی از نمونه های خمکاری را بعد از باربرداری تجربی همراه با مقدار زاویه ی خم در گذرهای مختلف نشان می دهد. می توان در شکل 16 مقادیر زاویه ی خم حاصله از آزمون های تجربی و شبیه سازی المان محدود را در دو حالت بارگذاری و باربرداری دید.

همان طور که از شکل های 14 و 16 مشاهده می شود بعد از اعمال اولین گذر ECAP از میزان زاویه یبارگذاری و باربرداری به طور ناگهانی کاسته می شود و با افزایش گذر اعمالی تا گذر سوم تدریجا بر میزان این زوایا افزوده می گردد. کاهش زاویه از حالت ECAP نشده به حالت ECAP شده طی گذر 1 میتواند ناشی از افزایش ناگهانی میزان کارسختی در گذر 1 باشد. همان طور که از شکل 12 مشخص است؛ در حالت کارسخت نشده یعنی حالت صفر به دلیل خمیری بودن ماده یا به عبارتی بالا بودن کرنش پلاستیک در حین خمکاری، کشیدگی ماده نیز علاوه بر به وجود آمدن خم اتفاق میافتد؛ ولی در حالت کارسخت شده از میزان کشیدگی به علت مقاومت در مقابل کرنشهای بالاتر، کاسته می شود. طول قوس موجود در کمینهی هر نمونهی خمکاری حاصله از گذرهای 1 الی 3، گویای این مطلب است. در گذر 0 کشیدگی بیشتر است لذا ناحیهی خم به شکل سنبه یعنی قوس دایروی آن نزدیک تر است لذا طول قوس کاهش مییابد که منجر به زیادشدن زاویهی خم می شود. با اعمال گذر 1 میزان کشیدگی کمتر شده مقاومت تغییر شکل بیشتر می شود که منجر به افزایش طول قوس در قسمت خم می شود و اختلاف قوس سنبه و ناحیهی خم زیاد می شود؛ لذا زاویهی پاهای خم نسبت به هم کمتر شده و زاویهی خم کاهش مییابد. دلیل افت ناگهانی زوایای بارگذاری و باربرداری از گذر 0 به 1 این موضوع میباشد. با افزایش گذر از 1 به 3 از آنجا که طبق نتیجهی آزمون کشش در شکل 12، میزان تحمل کرنش یکسان است لذا در ناحیهی خم به ازای نیروی بیشتر، طول قوس یکسانی بدست میآید ولی به دلیل مقاومت بیشتر کششی، میزان ازدیاد طول در بازوهای خم کم شده و زاویهی خم کمی افزایش مییابد. بدین دلیل بر میزان زوایای بارگذاری و باربرداری با افزایش گذر اعمالی افزوده مىشود.

شکل 17 اختلاف زاویهی بارگذاری و باربرداری یا به عبارتی میزان برگشت فنری را در دو حالت تجربی و شبیهسازی المان محدود نشان میدهد. با توجه به نتایج بدست آمده با اعمال گذرهای بالاتر ECAP، بر میزان برگشت فنری افزوده می گردد و این یک نقطهی منفی در اعمال فرایند ECAP بر تیتانیم خالص تجاری است. افزایش میزان برگشت فنری را میتوان به ثابت ماندن مدول الاستیسیته و افزایش استحکام تسلیم با افزایش گذرهای ECAP نسبت داد. در واقع به دلیل زیادتر شدن منطقهی الاستیک با افزایش گذر، افزایش برگشت فنری قابل توجیه است [55,46,45]. لذا باید در طراحی و تولید محصولات دارای خم دقت کافی لحاظ شود تا اثر افزایش برگشت فنری در مادهی ECAP شده اصلاح و رفع گردد.

در شکل 18 تغییرات خیز در راستای Y به ازای گرههای موجود در تارخنثی یا به عبارتی در میانهی ضخامت نمونهی خمکاری، در دو حالت بارگذاری و باربرداری رسم شده است. همانطور که دیده میشود زاویهی باربرداری نسبت به زاویهی بارگذاری بیشتر است و به طور شهودی اختلاف آن دو با افزایش گذرهای ECAP بیشتر میشود. در واقع به وضوح می توان

افزایش برگشت فنری یعنی اختلاف زاویهی بارگذاری و باربرداری را با اعمال گذرهای ECAP بر تیتانیم خالص تجاری دید.

5- نتیجه گیری

در این مطالعه بررسی اثر فرایند سرد ECAP بر تکامل میکروساختاری، تغییر خواص مکانیکی و برگشت فنری در آزمون خمکاری سهنقطهای بر



loading and after the unloading in the software interface. شکل 14 نمایی از تغییرشکل نمونههای خمکاری تیتانیم خالص تجاری در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در محیط نرمافزار.









Fig. 16 Effect of ECAP passes on the loading and unloading angles of G2 CP-Ti specimens in three point bending test.

شکل 16 اثر گذرهای ECAP بر زوایای بارگذاری و باربرداری نمونههای تیتانیم خالص تجاری در آزمون خمکاری سهنقطهای.



Fig. 17 Effect of ECAP passes on spring back of G2 CP-Ti specimens in three point bending test.

شکل 17 اثر گذرهای ECAP بر میزان برگشت فنری نمونههای تیتانیم خالص تجاری در آزمون خمکاری سهنقطهای.

تيتانيم خالص تجارى گريد 2 به عنوان يک بايو مواد انجام شد. نتايج نشان داد که اعمال فرایند ECAP سرد خواص مکانیکی استاتیکی این ماده را با تولید ساختار فوقریزدانه بهبود قابل توجهی میدهد. از این کار مطالعاتی نتایج موردی زیر بدست آمده است:

تیتانیم خالص تجاری گرید 2 با موفقیت تا 3 گذر توسط فرایند ECAP در دمای محیط و با استفاده از یک قالب با زاویه یکانال ا درجه در مسیر $B_{\rm C}$ تحت کارسرد واقع شد. از آنجا که 135 ترکهای ریزی روی سطح بالایی بیلت بعد از گذر چهارم دیده

Fig. 18 Effect of ECAP passes on the deflection of CP-Ti beam during the loading and after the unloading.

-30 J Number of nodes

-20

شکل 18 اثر گذرهای ECAP بر خیز تیر تیتانیم خالص تجاری در حین بارگذاری و بعد از باربرداری.

Pass 3

- [9] V. M. Segal, Materials processing by simple shear, Materials Science and Engineering: A, Vol. 197, No. 2, pp. 157-164, 1995.
- [10] I. Kim, W. S. Jeong, J. Kim, K. T. Park, D. H. Shin, Deformation structures of pure Ti produced by equal channel angular pressing, *Scripta Materialia*, Vol. 45, No. 5, pp. 575-580, 2001.
- [11] 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. 103-189, 2000.
- [12] H. Torabzadeh Kashi, 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 فارسی)
- [13] M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 257, No. 2, pp. 328-332, 1998.
- [14] M. R. Roshan, S. A. J. Jahromi, R. Ebrahimi, Predicting the critical pre-aging time in ECAP processing of age-hardenable aluminum alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, No. 30, pp. 7833-7839, 2011.
- [15] M. H. Shaeri, F. Djavanroodi, M. Sedighi, S. Ahmadi, M. T. Salehi, S. H. Seyyedein, Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 48, No. 8, pp. 512-521, 2013.
- [16] R. B. Figueiredo, P. R. Cetlin, T. G. Langdon, The processing of difficult-towork alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys, *Acta Materialia*, Vol. 55, No. 14, pp. 4769-4779, 2007.
- [17] S. L. Semiatin, D. P. Delo, V. M. Segal, R. E. Goforth, N. D. Frey, Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30, No. 5, pp. 1425-1435, 1999.
- [18] 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, No. 17, pp. 4561-4570, 2010.
 [19] N. Krasil Nikov, Strength and Ductility of Copper Subjected to Equal-
- [19] N. Krasil Nikov, Strength and Ductility of Copper Subjected to Equal-Channel Angular Pressing with Backpressure, *Russian Metallurgy Metally C/C of Izvestiia-Akademiia Nauk SSSR Metally*, Vol. 3, No. 1, pp. 220, 2005.
- [20] W. J. Kim, J. Y. Wang, Microstructure of the post-ECAP aging processed 6061 Al alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 464, No. 1, pp. 23-27, 2007.
- [21] I. Kim, J. Kim, D. H. Shin, C. S. Lee, S. K. Hwang, Effects of equal channel angular pressing temperature on deformation structures of pure Ti, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 342, No. 1, pp. 302-310, 2003.
- [22] A. Medvedev, H. P. Ng, R. Lapovok, Y. Estrin, T. C. Lowe, V. N. Anumalasetty, Comparison of laboratory-scale and industrial-scale equal channel angular pressing of commercial purity titanium, *Materials Letters*, Vol. 145, pp. 308-311, 2015.
- [23] S. Zhang, Y. C. Wang, A. P. Zhilyaev, D. V. Gunderov, S. Li, G. I. Raab, E. Korznikova, T. G. Langdon, Effect of temperature on microstructural stabilization and mechanical properties in the dynamic testing of nanocrystalline pure Ti, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 634, No. 1, pp. 64-70, 2015.
- [24] P. Rodriguez Calvillo, J. M. Cabrera, Microstructure and mechanical properties of a commercially pure Ti processed by warm equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 625, No. 1, pp. 311-320, 2015.
- [25] C. S. Meredith, A. S. Khan, The microstructural evolution and thermomechanical behavior of UFG Ti processed via equal channel angular pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 219, No. 1, pp. 257-270, 2015.
- [26] A. V. Podolskiy, H. P. Ng, I. A. Psaruk, E. D. Tabachnikova, R. Lapovok, Cryogenic equal channel angular pressing of commercially pure titanium: microstructure and properties, *Journal of Materials Science*, Vol. 49, No. 19, pp. 6803-6812, 2014.
 [27] W. Xiaomei, C. Yinjia, H. Qichen, C. Aiying, L. Xiang, L. Fang, P. Deng,
- [27] W. Xiaomei, C. Yinjia, H. Qichen, C. Aiying, L. Xiang, L. Fang, P. Deng, Design of RT Equal Channel Angular Pressing pure titanium workpiece by finite element simulation, *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 44, No. 5, pp. 1082-1087, 2015.
- [28] R. Z. Valiev, M. J. Zehetbauer, Y. Estrin, H. W. Höppel, Y. Ivanisenko, H. Hahn, G. Wilde, H. J. Roven, X. Sauvage, T. G. Langdon, The innovation potential of bulk nanostructured materials, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 9, No. 7, pp. 527-533, 2007.
- [29] 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, No. 1, pp. 195-198, 2014.
- [30] 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. 8179-8186, 2011.
 [31] Y. Zhang, R. B. Figueiredo, S. N. Alhajeri, J. T. Wang, N. Gao, T. G.
- [31] Y. Zhang, R. B. Figuerredo, 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, No. 25, pp. 7708-7714, 2011.
- [32] Y. Zhang, S. N. Alhajeri, R. B. Figueiredo, N. Gao, J. T. Wang, T. G. Langdon, Contribution of twins to the strengthening of commercial purity titanium after equal-channel angular pressing, *Materials Science Forum*, Vol. 667-669, No. 1, pp. 719-724, 2011.

شد؛ لذا تا تمامی آزمونها روی بیلتهای ECAP شده تا 3 گذر انجام شد.

- اندازه دانه یتانیم خالص گرید 2، از 55 میکرومتر در شرایط ECAP نشده به ترتیب به 11، 3 و 0.65 میکرومتر بعد از 1 الی 3 گذر ECAP کاهش پیدا کرد.
- هر دوی تنشهای تسلیم و نهایی کششی در مادهی ECAP شده در مقایسه با ECAP نشده افزایش قابل توجهی پیدا کردند. ولی ازدیاد طول نسبی تا تخریب مادهی ECAP شده کاهش یافت. در گذرهای اول تا سوم ECAP، تقریبا ازدیاد طول نسبی ثابتی بدست آمد. در واقع با اعمال اولین گذر ECAP از مقدار کشیدگی در بدست آمد. در واقع با اعمال اولین گذر اختلاف کشیدگی در کاسته شد و با افزایش تعداد گذرها تا 3 گذر اختلاف کشیدگی در گذرهای 1 الی 3 قابل صرف نظر بوده است. 714، 183، 216
 مگاپاسکال به ترتیب بیانگر مقادیر تنش نهایی بعد از گذرهای 0 الی 3 میباشند. مقادیر ازدیاد طول نسبی تا شکست بعد از گذرهای 0 الی 3 میباشد. مقادیر ازدیاد طول نسبی تا شکست 19.5 درصد میباشد.
- نتایج آزمون خمش سه نقطهای نشان داد که با افزایش تعداد گذرهای ECAP بر میزان استحکام خمشی به میزان قابل توجهی افزوده می شود. 603، 787، 904 و 1158 نیوتن به ترتیب بیانگر مقادیر تجربی نیروی خمش بعد از گذرهای 0 الی 3 می باشد. این نشان می دهد که مقاومت در مقابل خمش می تواند با اعمال فرایند ECAP بر تیتانیم خالص به میزان چشمگیری ارتقاء یابد.
- میزان تجربی برگشت فنری بعد از آزمون خمش سه نقطهای برای نمونههای حاصله از گذرهای 0 الی 3 به ترتیب برابر 6، 8.5، 9 و 10 درجه میباشد. بررسی برگشت فنری نمونههای خمکاری سه نقطهای به دو روش تجربی و شبیهسازی المان محدود نشان داد که با افزایش گذر ECAP بر میزان برگشت فنری به عنوان یک پارامتر مضر افزوده می گردد و باید این موضوع در طراحی و ساخت قطعات ساخته شده از مواد کار سرد شده و فوقریزدانه شده لحاظ گردد.

6- مراجع

- M. Geetha, A. K. Singh, R. Asokamani, A. K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants–a review, *Progress in Materials Science*, Vol. 54, No. 3, pp. 397-425, 2009.
- [2] H. J. Rack, J. I. Qazi, Titanium alloys for biomedical applications, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 26, No. 8, pp. 1269-1277, 2006.
- [3] 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.
- S. Nag, R. Banerjee, H. L. Fraser, Microstructural evolution and strengthening mechanisms in Ti–Nb–Zr–Ta, Ti–Mo–Zr–Fe and Ti–15Mo biocompatible alloys, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 25, No. 3, pp. 357-362, 2005.
 Y. J. Chen, Y. J. Li, J. C. Walmsley, S. Dumoulin, P. C. Skaret, H. J. Roven,
- [5] 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, No. 3, pp. 789-796, 2010.
- [6] 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, No. 7, pp. 881-981, 2006.
- [7] V. M. Segal, Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 271, No. 1, pp. 322-333, 1999.
- [8] Z. Horita, T. Fujinami, T. G. Langdon, The potential for scaling ECAP: effect of sample size on grain refinement and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 318, No. 1, pp. 34-41, 2001.

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.11.43.6

بررسی بر گشت فنری تیتانیم خالص تجاری فوقریزدانه در آزمون خمکاری سهنقطهای

de Janeiro), Vol. 15, No. 2, pp. 254-259, 2010.

- [44] 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 فارسي)
- [45] I. Ragai, D. Lazim, J. A. Nemes, Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 1, pp. 116-127, 2005.
 [46] M. Bakhshi Jooybari, B. Rahmani, V. Daeezadeh, A. Gorji, The study of
- [46] M. Bakhshi Jooybari, B. Rahmani, V. Daeezadeh, A. Gorji, The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2410-2419, 2009.
- [47] F. Djavanroodi, M. Daneshtalab, M. Ebrahimi, A novel technique to increase strain distribution homogeneity for ECAPed materials, *Materials Science* and Engineering: A, Vol. 535, No. 1, pp. 115-121, 2012.
- [48] W. J. Kim, C. Y. Hyun, H. K. Kim, Fatigue strength of ultrafine-grained pure Ti after severe plastic deformation, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 10, pp. 1745-1750, 2006.
- [49] C. T. Wang, A. G. Fox, T. G. Langdon, Microstructural evolution in ultrafine-grained titanium processed by high-pressure torsion under different pressures, *Journal of Materials Science*, Vol. 49, No. 19, pp. 6558-6564, 2014.
- [50] 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, No. 1, pp. 59-67, 2001.
- [51] S. N. Alhajeri, N. Gao, T. G. Langdon, Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 10, pp. 3833-3840, 2011.
- [52] I. K. Kim, S. I. Hong, Effect of component layer thickness on the bending behaviors of roll-bonded tri-layered Mg/AI/STS clad composites, *Materials* & Design, Vol. 49, No. 1, pp. 935-944, 2013.
- [53] Y. Li, H. P. Ng, H. D. Jung, H. E. Kim, Y. Estrin, Enhancement of mechanical properties of grade 4 titanium by equal channel angular pressing with billet encapsulation, *Materials Letters*, Vol. 114, No. 1, pp. 144-147, 2014.
- [54] R. Valiev, Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties, *Nature Materials*, Vol. 3, No. 8, pp. 511-516, 2004.
- [55] Z. Tekıner, An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 1, pp. 109-117, 2004

- [33] S. Zhang, Y. C. Wang, A. P. Zhilyaev, E. Korznikova, S. Li, G. I. Raab, T. G. Langdon, Effect of grain size on compressive behaviour of titanium at different strain rates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 645, pp. 311-317, 2015.
- [34] A. Jäger, V. Gärtnerova, K. Tesař, 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, No. 1, pp. 114-120, 2015.
- [35] X. Zhao, X. Yang, J. Jia, B. Qi, The evolution of hardness homogeneity in commercially pure Ti processed by ECAP, *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 29, No. 3, pp. 578-584, 2014.
- [36] 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, No. 1, pp. 482-489, 2014.
- [37] X. Y. Liu, X. C. Zhao, X. R. Yang, C. Xie, G. J. Wang, Compression deformation behaviours of ultrafine and coarse grained commercially pure titanium, *Materials Science and Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 474-479, 2013.
- [38] R. B. Figueiredo, E. R. D. C. Barbosa, X. Zhao, X. Yang, X. Liu, P. R. Cetlin, T. G. Langdon, Improving the fatigue behavior of dental implants through processing commercial purity titanium by equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 619, No. 1, pp. 312-318, 2014.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] X. Zhao, W. Fu, X. Yang, T. G. Langdon, Microstructure and properties of pure titanium processed by equal-channel angular pressing at room temperature, *Scripta Materialia*, Vol. 59, No. 5, pp. 542-545, 2008.
 [42] A. A. Mendes Filho, V. L. Sordi, M. Ferrante, The effects of severe plastic
- [42] A. A. Mendes 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.
- [43] A. A. Mendes Filho, C. A. Rovere, S. E. Kuri, V. L. Sordi, M. Ferrante, A general study of commercially pure Ti subjected to severe plastic deformation: microstructure, strength and corrosion resistance, *Matéria (Rio*)