



## بررسی برگشت فنری تیتانیوم خالص تجاری فوق‌ریزدانه در آزمون خمکاری سه‌نقطه‌ای

رضا ناصری<sup>1</sup>، مهران کدخدایان<sup>2\*</sup>، محمود شریعتی<sup>2</sup>

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

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

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

### اطلاعات مقاله

### چکیده

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 27 تیر 1395  
پذیرش: 23 شهریور 1395  
ارائه در سایت: 16 آبان 1395  
کلید واژگان:

تیتانیوم خالص تجاری  
پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار  
استحکام استاتیکی  
خمکاری سه‌نقطه‌ای  
برگشت فنری

پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (ECAP) یکی از موثرترین فرایندها جهت تولید مواد با ساختارهای فوق‌ریزدانه و نانوکریستال می‌باشد. تیتانیوم 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 حساس‌ترین پارامترها در فرایند شکل‌دهی ورق و حجمی، پدیده جبران الاستیک در حین باربرداری یا برگشت فنری است. این پدیده به تغییرات نامطلوب ابعادی و هندسی در محصول نهایی منجر می‌شود و باید تا حد امکان مرتفع گردد. در این مطالعه تیتانیوم خالص تجاری گرید 2، در دمای محیط تا سه گذر تحت فرایند ECAP با زاویه کانال 135 درجه قرار گرفت. آنالیز میکروساختاری و آزمون‌های استاتیکی کشش و خمش سه نقطه‌ای روی تیتانیوم اولیه و ECAP شده تا 3 گذر انجام شد. ارزیابی میکروساختاری نشان داد که با اعمال فرایند ECAP، ساختار درشت‌دانه به فوق‌ریزدانه تکامل می‌یابد. همچنین آزمون‌های مکانیکی اثبات کرد که اعمال فرایند ECAP، استحکام استاتیکی را به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد. بررسی برگشت فنری بعد از اعمال خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های اولیه و ECAP شده به دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود 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 پدیده برگشت فنری در محصول نهایی صورت گیرد.

## The investigation of spring-back of UFG commercially pure titanium in three-point bending test

Reza Naseri, Mehran Kadkhodayan\*, Mahmoud Shariati

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 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.

### 1- مقدمه

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

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

تکه‌تکه‌شدگی اتفاق می‌افتد [18,17,14]. تحقیقات صورت گرفته روی اعمال فرایند ECAP بر این آلیاژها نشان داده است که می‌توان این مشکلات را با افزایش زاویه‌ی قالب، افزایش دمای فرایند، کاهش سرعت پرسکاری، استفاده از فشار پشتی و آنیل کنترل‌شده برطرف کرد [20,19,17,16,6]. تیتانیم و آلیاژهای آن نیز مانند دیگر فلزات با ساختار شش‌وجهی فشرده بسیار سخت است که در دمای اتاق تغییرشکل پلاستیک روی آنها انجام شود. لذا تیتانیم نیاز دارد که در دماهای نسبتاً بالا (473-863 K) ECAP شود تا مقاومت تغییرشکل آن کاهش یابد [21,3]. تاکنون تحقیقات زیادی جهت ایجاد تیتانیم خالص تجاری فوق ریزدانه 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 می‌کند [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 می‌شود و همینطور از لحاظ عملیاتی ساده‌تر است [28,27].

تحقیقات کمی روی اعمال فرایند ECAP در دمای محیط بر تیتانیم خالص تجاری انجام شده است؛ که عموماً شامل ارزیابی میکروساختار فوق ریزدانه [29-32] و بررسی رفتار مکانیکی 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 [42,43]. اخیراً نیز جهت بررسی کارپذیری تیتانیم خالص تجاری و همگنی ساختار تولید شده در حین فرایند ECAP از شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد و با استفاده از بررسی فاکتور تخریب و توزیع نرخ کرنش هندسه‌ی قطعه‌کار بهینه برای اعمال ECAP بر تیتانیم خالص در دمای محیط طراحی شد [27] و اثر هندسه‌ی سطح مقطع بیلت بر استحکام استاتیکی و همگنی کرنش مورد بررسی واقع گردید [44].

در صنعت شکل‌دهی خصوصاً در فرایند خمکاری ورقی و حجمی، پدیده‌ی برگشت فذری<sup>13</sup> نقش بسیار مهمی را بازی می‌کند و عدم دقت ابعادی ناشی از برگشت فذری یک نگرانی اصلی محسوب می‌شود. برگشت فذری ناشی از بازگشت الاستیک ماده در حین باربرداری در خمکاری است که منجر به تغییرات هندسی در محصول تولیدی خواهد شد. برگشت فذری بر زاویه و انحنا‌ی خم تأثیر مستقیم می‌گذارد. همچنین تحت شرایط خاص ممکن است زاویه‌ی نهایی خم کمتر از مقدار اصلی باشد که از آن به عنوان رفت فذری<sup>14</sup> یاد می‌شود [45]. مقدار رفت و برگشت فذری توسط پارامترهای گوناگونی نظیر شکل و ابعاد ابزار، شرایط اصطکاک تماسی، خواص ماده، ناهمسانگردی ماده و ضخامت آن تحت تأثیر واقع می‌گردد [46].

اکثر مطالعات انجام شده روی ECAP تیتانیم خالص تجاری در دمای 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 تغییرشکل توسط فرایند ECAP تا سه گذر موفق بدون ترک خوردگی در مسیر B<sub>C</sub> در دمای اتاق قرار گرفت و جهت بررسی برگشت فذری؛ آزمون‌های کشش و خم سه نقطه‌ای انجام شد. هدف اصلی بررسی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری میزان برگشت فذری تیتانیم خالص ECAP شده و

بر کاربردترین فلزات در صنایع اتومبیل‌سازی، هوافضا و بایوپزشکی 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 بیماری‌های عصبی، آلزایمر، سرطان، التهاب و ورم پوست، استخوان‌نرمی و دیگر امراض می‌گردند [4,3]. لذا تقاضا برای جایگزینی تیتانیم خالص تجاری (CP-Ti<sup>1</sup>) که مقدار عناصر آلیاژی در آن‌ها قابل چشم‌پوشی است و هزینه‌ی کمتری دارد؛ بجای آلیاژهای تیتانیم در کاربردهای بایوپزشکی رو به افزایش است [3,5]. عیب اصلی تیتانیم خالص تجاری، استحکام مکانیکی پایین 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 می‌شود آلیاژهای تیتانیم جایگزین آن گردند [1].

در میان روش‌های فراوان تغییرشکل پلاستیکی شدید (SPD<sup>2</sup>)، پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (ECAP<sup>3</sup>) یکی از موثرترین و پرکاربردترین تکنیک‌ها می‌باشد [6-8]. این فرایند که توسط سگال و همکارانش در دهه‌ی 1970 در روسیه معرفی شد [9]؛ می‌تواند با استفاده از ابزارهای ساده، قطعه‌کارهایی بزرگ فلزی با ساختار نسبتاً همگن فوق ریزدانه و نانوکریستال (UFG/NC<sup>4</sup>) با مرزدانه‌های زاویه‌بالا (HAGBs<sup>5</sup>) و با هندسه‌ی مناسب تولید کند [6,8,10]. در این روش با استفاده از اعمال کرنش‌های بالا بر ماده‌ی درشت‌دانه (CG<sup>6</sup>) و ایجاد چگالی بالایی از نابجایی‌ها و آرایش مجدد آنها جهت تشکیل مرزدانه‌های جدید، اندازه دانه‌هایی در رنج زیرمیکرومتر یا نانومتر ایجاد می‌گردد و مرزدانه‌های زاویه‌پایین (LAGBs<sup>7</sup>) به مرزدانه‌های زاویه‌بالا تکامل می‌یابند؛ لذا استحکام استاتیکی و دینامیکی ماده طبق تئوری هال-پچ<sup>8</sup> [6] به شدت افزایش می‌یابد [11,12]. در حین فرایند ECAP، نمونه‌ی فلزی از میان دو کانال متقاطع با سطح مقطع یکسان پرسکاری می‌شود و ماده تحت تنش برشی ساده قرار گرفته و در نتیجه کرنش پلاستیک شدید بر ماده اعمال می‌گردد. زاویه‌ی بین دو کانال یا زاویه‌ی قالب توسط پارامتر  $\phi$  و زاویه‌ی انحنا یا زاویه‌ی گوشه توسط پارامتر  $\psi$  تعریف می‌شوند [13]. از آنجایی که سطح مقطع بیلت یا قطعه‌کار بعد از فرایند تغییر نمی‌کند؛ می‌توان فرایند را روی آن بیلت در هر مسیر<sup>9</sup> با اسامی A، B<sub>A</sub>، B<sub>C</sub> و C تکرار کرد. به هر تکرار فرایند در هر مسیر یک گذر<sup>10</sup> گفته می‌شود.

فلزات و آلیاژها با سیستم کریستالی شش‌وجهی فشرده (HCP<sup>11</sup>) نظیر تیتانیم و منیزیم و همچنین آلیاژهای با قابلیت پی‌رسختی بالا نظیر آلیاژ آلومینیم 7075، شکل‌پذیری کمی از خود به خصوص در دمای اتاق و دماهای پایین نشان می‌دهند. این آلیاژها به عنوان آلیاژهای سخت‌کارپذیر<sup>12</sup> دسته‌بندی می‌شوند [14-17]. در صورت اعمال کارسرد بر این آلیاژها نظیر ECAP در دمای پایین؛ به دلیل سیلان ناپایدار ماده؛ ترک خوردگی و

<sup>1</sup> Commercially Pure Titanium

<sup>2</sup> Severe Plastic Deformation

<sup>3</sup> Equal Channel Angular Pressing

<sup>4</sup> Ultra-Fine Grain/Nano-Crystalline

<sup>5</sup> High-Angle Grain Boundaries

<sup>6</sup> Coarse Grain

<sup>7</sup> Low-Angle Grain Boundaries

<sup>8</sup> Hall-Petch

<sup>9</sup> Route

<sup>10</sup> Pass

<sup>11</sup> Hexagonal Close Packed

<sup>12</sup> Difficult-to-work alloys

<sup>13</sup> Spring back

<sup>14</sup> Spring go or spring forward

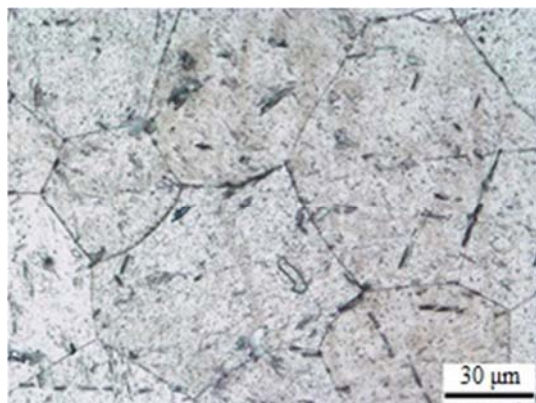


Fig. 2 Optical microstructures of CP-Ti after annealing.

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 مولیکوت<sup>1</sup> استفاده شد. در ابتدا نمونه‌ها تا چهار گذر در مسیر B<sub>C</sub> که نمونه 90 درجه در یک جهت بین هر گذر چرخانده می‌شود [49]؛ تحت فرایند قرار گرفتند. این مسیر فرایند بدین دلیل انتخاب شد که منجر به تشکیل سریع میکروساختار فوق ریزدانه و نانوکریستال همگن و هم‌محور با مرزهای زاویه‌بالاتر می‌گردد [51,50]. بعد از جدا کردن غلاف‌ها از بیلت‌های تیتانیومی با ااره کاری، ترک‌هایی در سطح بالایی بیلت تیتانیومی در گذر چهارم مشاهده شد. لذا جهت تولید نمونه‌های فوق ریزدانه‌ی سالم و بدون ترک‌خوردگی، همه‌ی نمونه‌های دوفلزی تا گذر سوم در دمای محیط با مسیر B<sub>C</sub> 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 ماکروسکوپیکی نوری از ترک‌های سطحی در گذر چهارم را نشان می‌دهد. جهت مشاهده‌ی ترک‌های سطحی از ماکروسکوپ نوری اولیمپس<sup>2</sup> استفاده شد.

### 2-3- آزمایش‌های تجربی

آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای برای بررسی خواص مکانیکی استاتیکی تیتانیوم خالص درشت‌دانه و فوق ریزدانه و مقایسه‌ی آن‌ها انجام شد. ارزیابی میکروساختار و مقایسه‌ی اندازه دانه نیز روی نمونه‌های اولیه و ECAP شده صورت گرفت. همچنین جهت تعیین میزان برگشت فذری، زاویه‌ی بارگذاری و باربرداری نیز در حین فرایند خمش سه نقطه به ازای نمونه‌های حاصل از گذرهای 0 الی 3 بررسی شد.

جهت بررسی تغییرات میکروساختار تیتانیوم قبل و بعد از ECAP و اثبات ریزش‌دگی دانه‌ها، از میکروسکوپ نوری اولیمپس<sup>3</sup> استفاده شد. نمونه‌های متالوگرافیکی برای آنالیز میکروساختار از وسط بیلت و عمود بر جهت پرسکاری بریده شدند. سپس با استفاده از ورق سنباده‌های سیلیکون کارباید<sup>4</sup> به ترتیب با شماره‌های 100، 400، 600، 1000، 1200 و 2000 سنباده زنی شده و متعاقباً 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<sup>5</sup>

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

## 2- مواد و روش آزمایش

### 2-1- مواد

ماده‌ی مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی حاضر یک قطعه کار دو فلزی بوده است. کاهش نیروی پرسکاری، بهبود خواص مکانیکی، افزایش همگنی تغییرشکل و افزایش یکنواختی توزیع کرنش موثر [47,15] از دلایل استفاده از نمونه‌ی دوفلزی می‌باشد. میله‌گردهای تیتانیوم خالص تجاری گرید 2 به عنوان ماده‌ی هسته یا بیلت در غلاف‌هایی از جنس آلومینیم 7075 به صورت انطباقی پرس‌ی قرار داده شد. شکل شماتیک و ابعاد نمونه‌ی دوفلزی مورد استفاده در شکل 1 نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی تیتانیوم 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]، تیتانیوم خالص تجاری در دمای 800°C برای یک ساعت آنیل و در هوا و در کوره‌ی خاموش سرد شد [48]. آلومینیم 7075 نیز در دمای 415°C 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 تیتانیوم همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است؛ بدست آمد.

### 2-2- فرایند ECAP

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 می‌گردد [6]. شکل‌های 3 و 4 نمایی شماتیک و واقعی از قالب فرایند ECAP مورد استفاده و همچنین

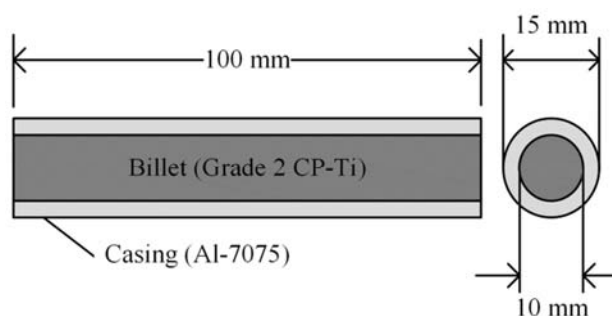


Fig. 1 Schematic illustration and dimensions of the bimetallic rod specimen for ECAP.

شکل 1 شکل شماتیک و ابعاد نمونه‌ی دوفلزی برای ECAP.

جدول 1 ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص گرید 2 و آلومینیم 7075 (درصدوزنی)

Table 1 Chemical composition of G 2 CP-Ti and Al-7075 alloy (% wt).								
X	O	H	N	C	Fe	Ti	Grade 2 CP-Ti	
0	0.06	0.001	0.03	0.02	0.02	Base	Grade 2 CP-Ti	
Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al	Al7075
0.05	0.21	0.34	0.36	1.47	2.73	5.78	Base	Al7075

<sup>1</sup> MOLYKOTE © 1000 PASTE

<sup>2</sup> Olympus SZX9

<sup>3</sup> Olympus BX60M

<sup>4</sup> SiC

<sup>5</sup> H<sub>2</sub>O (100 mL) + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(35%) (5 mL) + HF (2 mL)



**Fig. 5** Bimetallic specimens (a) Before ECAP, (b) After ECAP, and (c) Optical macroscopic image of surface cracks after fourth pass ECAP.

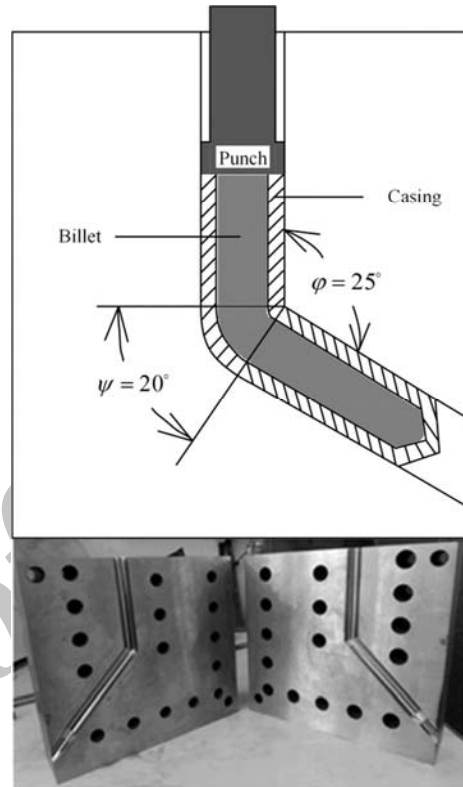
شکل 5 نمونه‌های دوفلزی، (a) قبل از فرایند ECAP، (b) بعد از فرایند ECAP و (c) تصویر ماکروسکوپیکی نوری از ترک‌های سطحی بعد از گذر چهارم ECAP.

شده توسط آزمون کشش محوری روی دستگاه کشش تک‌محوره‌ی ژوئیک<sup>3</sup> مورد بررسی واقع شد. نمونه‌های کشش دمبلی شکل از میانه‌ی بیلت و در راستای موازی با جهت پرسکاری ماشین‌کاری شد. آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM E 8M-00 و روی نمونه‌های استاندارد کوچک انجام شد. طول و قطر موثر، شعاع انحنا و طول بخش کاهش مقطع یافته به ترتیب برابر 30، 6، 6 و 36 میلی‌متر می‌باشد. هر نمونه در دمای اتاق، با نرخ ثابت جابجایی و نرخ کرنش اولیه‌ی  $0.001 \text{ s}^{-1}$  [38,31] تا گسیختگی کامل تحت کشش واقع گردید. این آزمون‌ها انجام شد تا تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )، تنش نهایی ( $\sigma_{II}$ ) و ازدیاد طول نسبی تا گسیختگی ( $\delta$ ) نمونه‌های تیتانیوم خالص تجاری درشت‌دانه‌ی اولیه و فوق ریزدانه شده تعیین گردد.

آزمون خمش راه ساده‌ای جهت ارزیابی کیفیت مواد و شکل‌پذیری 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 می‌گیرد. شکل شماتیک آزمون خمش سه نقطه‌ای در شکل 6

محتوی آب‌مقطر، اسید فلئوریدریک و هیدروژن پراکسیاد؛ اچ شدند. اندازه متوسط دانه‌ها از تصاویر میکروساختاری، با روش جدایش خطی<sup>1</sup> و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل عکس MIP<sup>2</sup> و بر طبق استاندارد ASTM E 112-96 تعیین شد.

استحکام مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری درشت‌دانه‌ی اولیه و فوق ریزدانه



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

شکل 3 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.

<sup>3</sup> Zwick Z250

<sup>1</sup> Line intercept method  
<sup>2</sup> Microstructural Image Processing



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

### 3- شبیه‌سازی المان محدود

در این تحقیق از شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>1</sup> 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 C3D8R<sup>3</sup> و R3D4<sup>2</sup> و نمونه‌های خمکاری به صورت انعطاف‌پذیر و از نوع مش



Fig. 8 The three-point bending test set-up.

شکل 8 ترکیب‌بندی آزمون خمش سه نقطه‌ای.

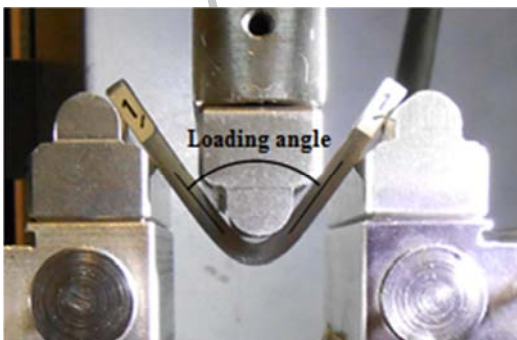


Fig. 9 Bending angle in the three point bending specimen during loading.

شکل 9 زاویه‌ی خم در نمونه‌ی خمکاری سه نقطه‌ای در حین بارگذاری.

شکل 6، پارامترهای  $C, r, t, w, L$  و  $F$  به ترتیب فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌های پایینی، شعاع انتهای سنبه، ضخامت، پهنا و طول نمونه‌ی تیر و نیروی اعمال شده هستند. اندازه‌ی پارامترهای  $C, r, t, w, L$  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 خمکاری با ابعاد نشان داده شده در شکل 6 ساخته شد. شکل 7 نمای 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 ژونیک مورد استفاده در آزمون کشش و در سرعت ثابت 1 mm/min [52] 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 خم شده در جایجایی 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

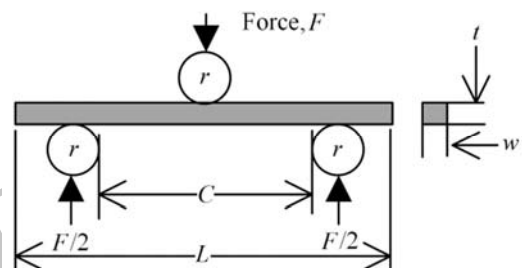


Fig. 6 Schematic and real view of fixture for the three-point bending test.

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

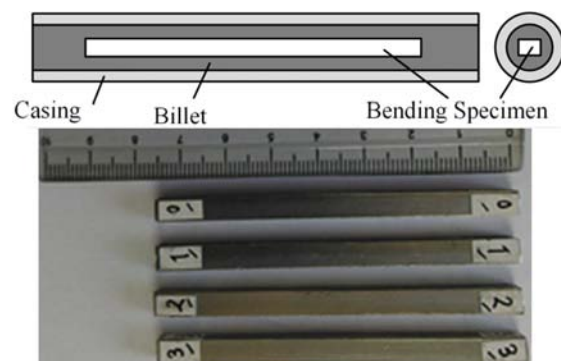


Fig. 7 Schematic and real appearance of the bending specimens before three-point bending test.

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

<sup>1</sup> Abaqus/CAE 6.12-1

<sup>2</sup> A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

<sup>3</sup> An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

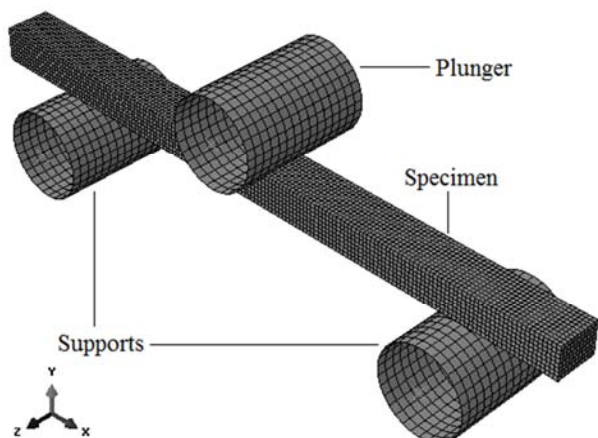


Fig. 10 A view of the three point bending test configuration in the software interface.

شکل 10 نمایی از ترکیب بندی خمکاری سه نقطه‌ای در محیط نرم افزار.

ساختارهای باندشده‌ی پیچیده تشکیل شده و با افزایش تعداد گذرها، دانه‌های درشت و کشیده شده، کشیده تر نمی‌شوند بلکه ساختار یکنواخت و بدون حضور ساختارهای باند شده تشکیل می‌گردد [39,36].

#### 2-4- استحکام کششی

همه‌ی نمونه‌های کشش در دمای اتاق تا گسیختگی کامل تحت آزمون کشش واقع شدند. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی تیتانیوم خالص تجاری ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای 1 الی 3 در شکل 12 نشان داده شده است. جدول 2 مقادیر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )، تنش نهایی ( $\sigma_u$ ) و ازدیاد طول تا شکست ( $\delta$ ) 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، استحکام به صورت تدریجی افزایش می‌یابد ولی ازدیاد طول نسبی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این نتایج اثبات می‌کند که افزایش استحکام چشمگیر و همچنین شکل‌پذیری مناسبی بعد از اعمال فرایند ECAP بر تیتانیوم خالص تجاری به وجود می‌آید. لازم به ذکر است که این نتایج انطباق خوبی با مطالعات گذشته دارد [41,39,31]. بهبود خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی ناشی از ریزشیدن دانه‌ها و وجود کسر بالایی از میکروساختارهای همگن و هم‌محور با دانه‌های زاویه بالا و ناهمسو می‌باشد [54,6].

#### 3-4- استحکام خمشی

به منظور بررسی استحکام خمشی و شکل‌پذیری تیتانیوم خالص تجاری گرید 2 قبل و بعد از فرایند ECAP، آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای اتاق انجام شد. جهت مقایسه‌ی استحکام خمشی، مقدار جابجایی برای همه‌ی 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 شبیه‌سازی المان محدود در شکل 13 ارائه شده است. مقادیر 603، 787، 904 و 1158 نیوتن بیانگر مقادیر نیروی بیشینه در حالت تجربی و مقادیر 627، 824، 936 و 1203 نیوتن بیانگر مقادیر نیروی بیشینه در حالت شبیه‌سازی و هرکدام به ترتیب برای ماده‌ی ECAP نشده و ECAP شده در گذرهای اول تا سوم می‌باشند. انطباق مناسبی بین نتایج نیروی بیشینه حاصل از شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد

بر حسب هندسه‌ی نشان داده شده در شکل 6 و ابعاد منطبق بر آزمون تجربی مدل شدند. شکل 10 نمایی از ترکیب بندی اجزاء فرایند خمکاری سه نقطه‌ای شامل دو تکیه‌گاه، 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 صرفاً در جهت محور Y بوده و در سایر درجات آزادی شش‌گانه مقید گردید. جهت تحلیل پلاستیک فرایند خمکاری، خواص الاستیک-پلاستیک تیتانیوم 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 وابستگی نتایج به تعداد المان‌ها و دستیابی به نتایج شبیه‌سازی صحیح، تعداد المان‌های نمونه‌ی خمکاری بر اساس حساسیت مش تعیین و با مقایسه‌ی نیروی حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر حاصل از آزمون تجربی، به نتایج شبیه‌سازی اعتماد شد. نتایج بررسی حساسیت مش نشان داد که بزرگترین اندازه‌ی مش 0.475 میلی‌متر با 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 تکیه‌گاه‌ها و سنبه به دلیل صلب بودن قطعات، به مقادیر اندازه‌ی المان پیش‌فرض نرم‌افزار یعنی 1 میلی‌متر یا به عبارتی تعداد 465 المان اعتماد شد.

جهت اندازه‌گیری مقدار برگشت فنری از نتایج شبیه‌سازی، از نمونه‌ی خمکاری شده در حین بارگذاری در جابجایی 26 میلی‌متر و بعد از باربرداری توسط خروجی نرم‌افزار آباکوس تصویرهای تغییرشکل پلاستیک تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر<sup>1</sup> زاویه‌ی بین راستای تارخشی (خط میانی ضخامت نمونه) در دو پای نمونه‌ی خمکاری شده در دو مرحله‌ی بارگذاری و باربرداری، مقایسه شد. اختلاف زاویه‌ی بین راستای تارخشی در دو پای نمونه‌ی خمکاری مقدار برگشت فنری را نشان می‌دهد.

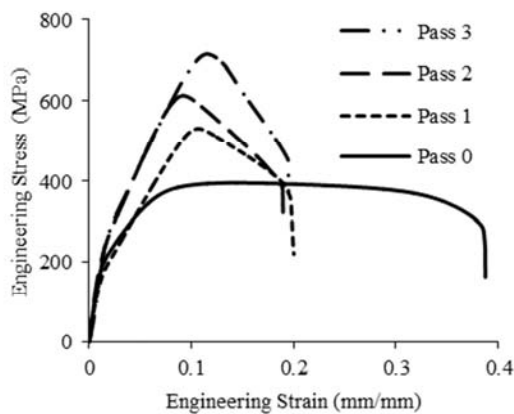
هدف از شبیه‌سازی المان محدود در این مطالعه، بررسی برگشت فنری نمونه‌های ECAP شده دارای خم پلاستیک و قابلیت‌سنجی امکان استفاده از نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل پدیده‌ی برگشت فنری و تحلیل نیرویی خمکاری سه نقطه‌ای نمونه‌های با کارسختی متفاوت بوده است.

#### 4- نتایج و بحث

##### 1-1- میکروساختار

میکروساختار تیتانیوم 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 میکروسکوپی 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. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد گذرهای ECAP دانه‌ها ریزتر می‌شوند. بعد از گذر اول، باندهای برشی موازی شامل چگالی بالایی از نایجایی‌ها، باندهای پیچیده‌تر متقاطع در دو جهت مختلف و چگالی بالایی از دوقلوبی‌های موازی با ساختار کشیده شده تشکیل می‌شود. توسعه‌ی مرز دانه‌های زاویه پایین به مرز دانه‌های زاویه بالا بعد از اولین گذر ECAP در فلزات با ساختار شبکه‌ی کریستالی شش وجهی نظیر تیتانیوم همواره اتفاق می‌افتد [53,39,36,6]. در گذرهای بالاتر

<sup>1</sup> Digimizer 4.1.1.0



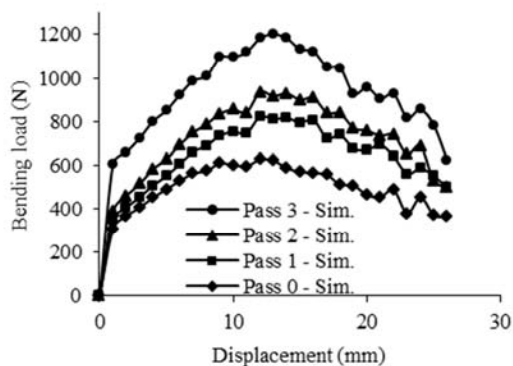
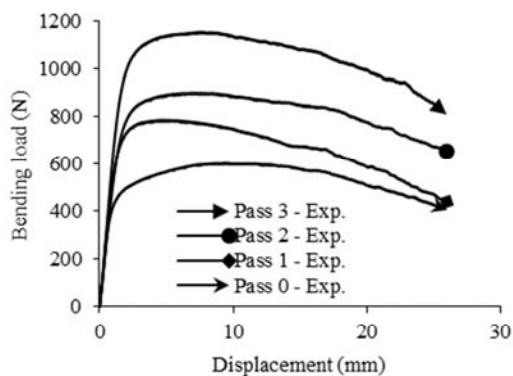
**Fig. 12** Engineering stress-strain curves for un-ECAPed and ECAPed CP-Ti samples for 1-3 passes.

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

جدول 2 خواص کششی تیتانیوم خالص تجاری بعد از گذرهای 0 الی 3.

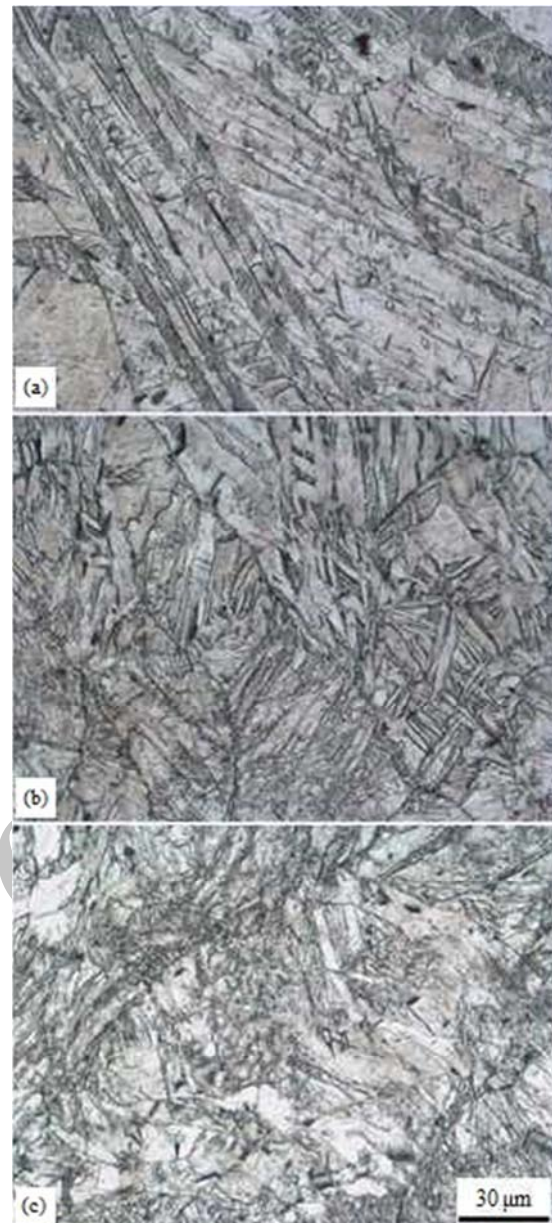
**Table 2** Tensile properties of CP-Ti samples for 0-3 passes of ECAP.

$\delta$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Passes (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 حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی در خمکاری نمونه‌های تیتانیوم 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 می‌رساند. همان‌طور که دیده می‌شود 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 می‌توان علاوه بر استحکام کششی، استحکام خمشی را نیز با اعمال فرایند ECAP بر تیتانیوم خالص به میزان چشمگیری ارتقاء داد. دلیل افزایش استحکام خمشی با اعمال فرایند ECAP را نیز می‌توان به ریزشدگی دانه‌ها و تکامل به آرایه‌ای از مرزدهانه‌های زاویه بالا و افزایش نابجایی‌ها نسبت داد [6].

#### 4-4- برگشت فوری

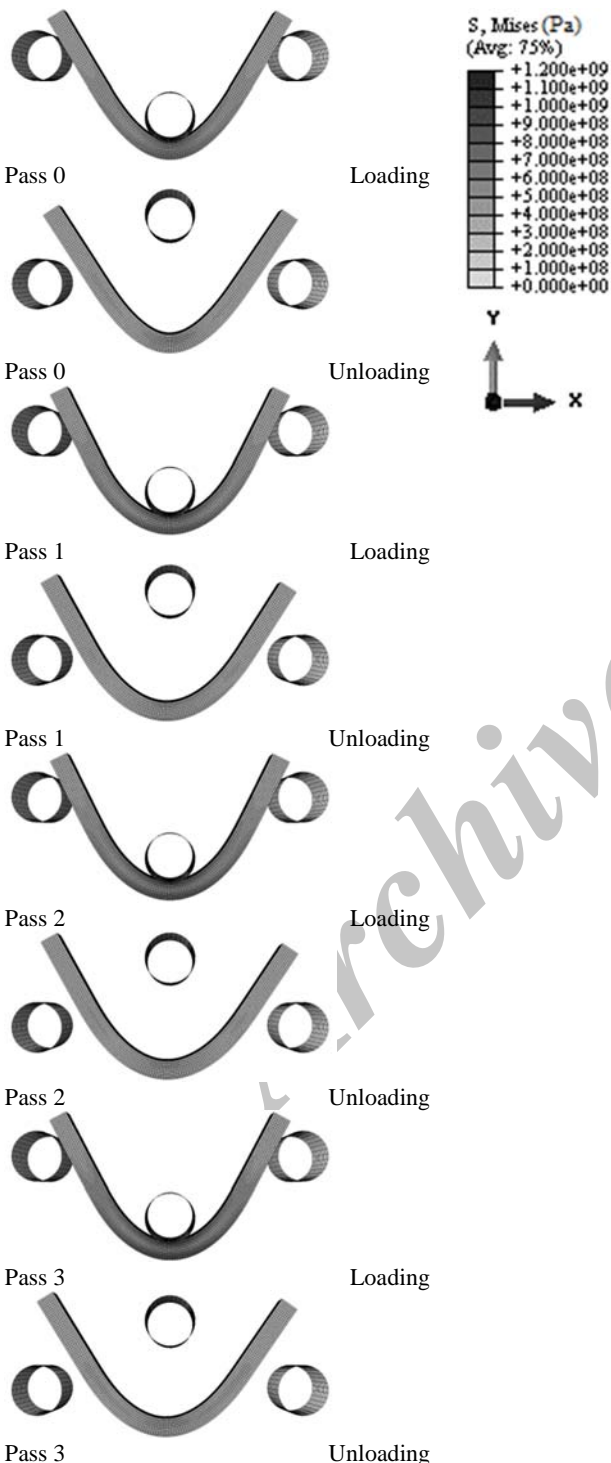
نمایی از تغییرشکل نمونه‌های خمکاری در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در نرم‌افزار شبیه‌ساز المان محدود، در شکل 14 نشان داده شده است. با در



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

### 5- نتیجه‌گیری

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



**Fig. 14** Deformation appearance of the G2 CP-Ti specimens during the loading and after the unloading in the software interface.

شکل 14 نمایشی از تغییر شکل نمونه‌های خمکاری تیتانیوم خالص تجاری در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در محیط نرم‌افزار.

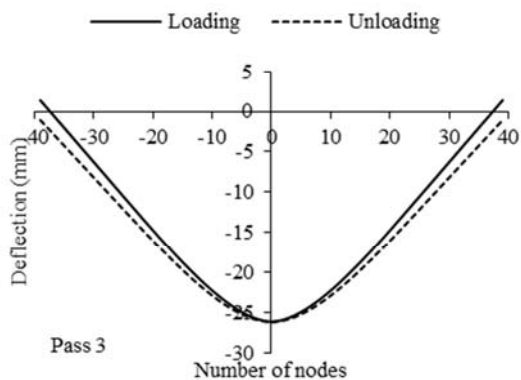
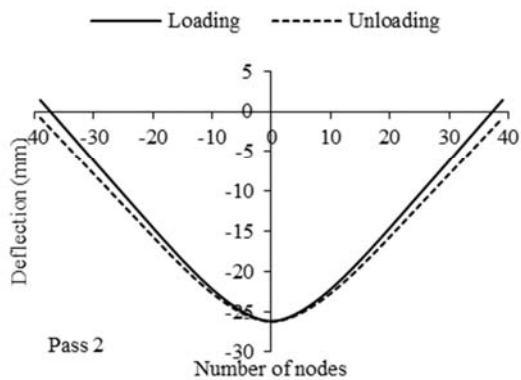
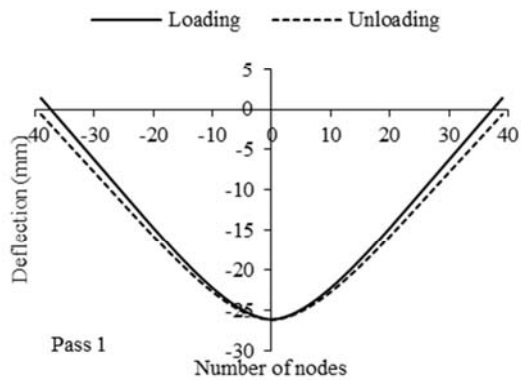
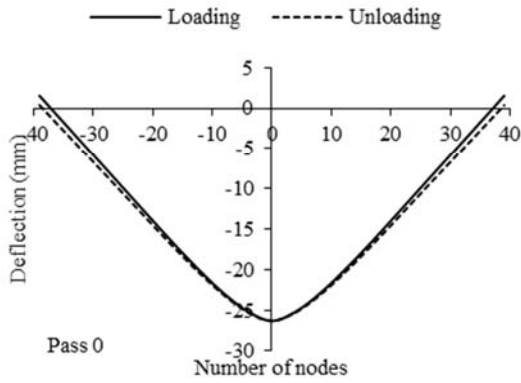
نظر گرفتن میانه‌ی ضخامت قطعات به عنوان تار خنثی و محاسبه‌ی زاویه‌ی بین راستاهای دو پای نمونه‌ی خمکاری، مقادیر زاویه‌ی خم در حین بارگذاری و بعد از باربرداری در حالت شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شد. مقدار زاویه‌ی خم در حین بارگذاری در پایین‌ترین حد جابجایی یعنی 26 میلی‌متر محاسبه شد. شکل 15 نمایشی از نمونه‌های خمکاری را بعد از باربرداری تجربی همراه با مقدار زاویه‌ی خم در گذرهای مختلف نشان می‌دهد. می‌توان در شکل 16 مقادیر زاویه‌ی خم حاصله از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود را در دو حالت بارگذاری و باربرداری دید.

همان‌طور که از شکل‌های 14 و 16 مشاهده می‌شود بعد از اعمال اولین گذر ECAP از میزان زاویه‌ی بارگذاری و باربرداری به طور ناگهانی کاسته می‌شود و با افزایش گذر اعمالی تا گذر سوم تدریجاً بر میزان این زوایا افزوده می‌گردد. کاهش زاویه از حالت ECAP نشده به حالت ECAP شده طی گذر 1 می‌تواند ناشی از افزایش ناگهانی میزان کارسختی در گذر 1 باشد. همان‌طور 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 می‌شود. طول قوس موجود در کمین‌های هر نمونه‌ی خمکاری حاصله از گذرهای 1 الی 3، گویای این مطلب است. در گذر 0 کشیدگی بیشتر است لذا ناحیه‌ی خم به شکل سنبله یعنی قوس دایروی آن نزدیک تر است لذا طول قوس کاهش می‌یابد که منجر به زیاد شدن زاویه‌ی خم می‌شود. با اعمال گذر 1 میزان کشیدگی کمتر شده مقاومت تغییر شکل بیشتر می‌شود که منجر به افزایش طول قوس در قسمت خم می‌شود و اختلاف قوس سنبله و ناحیه‌ی خم زیاد می‌شود؛ 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 می‌شود.

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 می‌گردد و این یک نقطه‌ی منفی در اعمال فرایند ECAP بر تیتانیوم 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 زیاده‌تر شدن منطقه‌ی الاستیک با افزایش گذر، افزایش برگشت فنری قابل توجه 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.

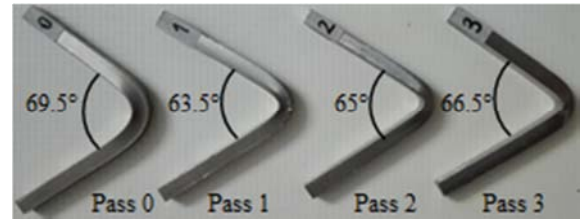
در شکل 18 تغییرات خیز در راستای Y به ازای گره‌های موجود در تارخنثی یا به عبارتی در میانه‌ی ضخامت نمونه‌ی خمکاری، در دو حالت بارگذاری و باربرداری رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود زاویه‌ی باربرداری نسبت به زاویه‌ی بارگذاری بیشتر است و به طور شهودی اختلاف آن دو با افزایش گذرهای ECAP بیشتر می‌شود. در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





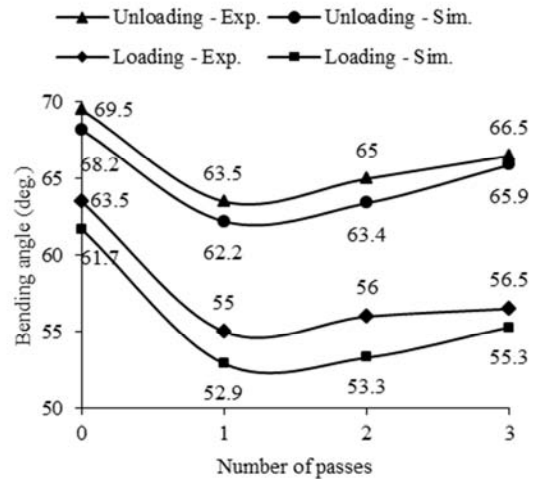
**Fig. 18** Effect of ECAP passes on the deflection of CP-Ti beam during the loading and after the unloading.

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



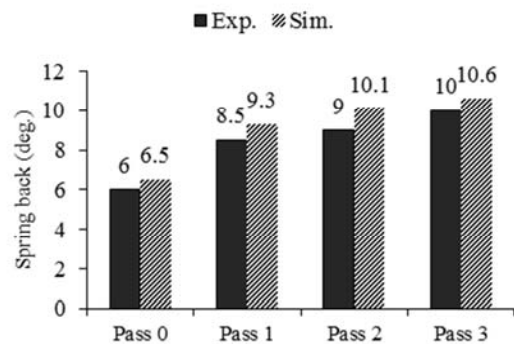
**Fig. 15** Experimental unloading angle of G2 CP-Ti specimens.

شکل 15 زاویه‌ی باربرداری تجربی نمونه‌های تیتانیوم خالص تجاری گرید 2.



**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 تیتانیوم خالص تجاری در آزمون خمکاری سه نقطه‌ای.



**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 تیتانیوم خالص تجاری در آزمون خمکاری سه نقطه‌ای.

تیتانیوم خالص تجاری گرید 2 به عنوان یک بایو مواد انجام شد. نتایج نشان داد که اعمال فرایند ECAP سرد خواص مکانیکی استاتیکی این ماده را با تولید ساختار فوق ریزدانه بهبود قابل توجهی می‌دهد. از این کار مطالعاتی نتایج موردی زیر بدست آمده است:

- تیتانیوم خالص تجاری گرید 2 با موفقیت تا 3 گذر توسط فرایند ECAP در دمای محیط و با استفاده از یک قالب با زاویه‌ی کانال 135 درجه در مسیر B<sub>C</sub> تحت کار سرد واقع شد. از آنجا که ترک‌های ریزی روی سطح بالایی بیلت بعد از گذر چهارم دیده

- [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)
- [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-to-work 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-Channel Angular Pressing with Backpressure, *Russian Metallurgy Metall C/C of Izvestiya-Akademiia Nauk SSSR Metall*, 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 thermo-mechanical 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, 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. 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 دانه‌ی تیتانیم 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، تقریباً ازدیاد طول نسبی ثابتی بدست آمد. در واقع با اعمال اولین گذر ECAP از مقدار کشیدگی کاسته شد و با افزایش تعداد گذرها تا 3 گذر اختلاف کشیدگی در گذرهای 1 الی 3 قابل نظر بوده است. 174، 183، 216 و 273 مگاپاسکال به ترتیب بیانگر مقادیر تنش تسلیم و 396، 531، 613 و 715 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 نیز به ترتیب برابر 38.7، 20، 18.9 و 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 می‌شود. 603، 787، 904 و 1158 نیوتن به ترتیب بیانگر مقادیر تجربی نیروی خمش بعد از گذرهای 0 الی 3 می‌باشد. این نشان می‌دهد که مقاومت در مقابل خمش می‌تواند با اعمال فرایند ECAP بر تیتانیم خالص به میزان چشمگیری ارتقاء یابد.

- میزان تجربی برگشت فتری 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 فتری نمونه‌های خمکاری سه نقطه‌ای به دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود نشان داد که با افزایش گذر ECAP بر میزان برگشت فتری به عنوان یک پارامتر مضر افزوده می‌گردد و باید این موضوع در طراحی و ساخت قطعات ساخته شده از مواد کار سرد شده و فوق‌ریزدانه شده لحاظ گردد.

## 6- مراجع

- [1] 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. Farahbaksh, 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.
- [4] 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.
- [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.

- 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 فارسی)
- [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. Bakhshii Jooybari, B. Rahmani, V. Daezadeh, 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. Daneshlab, 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/Al/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. Tekiner, 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. Tesaf, 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 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*