



## ارزیابی تجربی اثر فشار پشتی بر کارپذیری و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری در فرایند ایکپ سرد

رضا ناصری<sup>۱،۲\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

### چکیده

اعمال فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید (SPD) نظیر فرایند پرسکاری در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار موسوم به ایکپ (ECAP)، منجر به اعمال کرنش‌های شدید بر ماده‌ی فلزی و در نتیجه تحولات میکروساختاری می‌گردد. در اثر این تحولات میکروساختاری ساختار دانه‌بندی فوق ریزدانه شده و به بهبود خواص مکانیکی می‌انجامد. در این تحقیق تیتانیوم خالص تجاری به عنوان یک فلز با تغییرشکل‌پذیری سخت، تحت فرایند ایکپ سرد در کانال ۱۳۵ درجه همراه با اعمال فشار پشتی قرار گرفت و اثر فشار پشتی بر خواص مکانیکی و کارپذیری آن بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد که با اعمال همزمان فشار پشتی و غلاف کردن بیلت در لوله از جنس مس خالص، نمونه‌ی دوفلزی مورد استفاده تا چهار پاس ایکپ شد. با توجه به اینکه در حالت بدون فشار پشتی تنها دو پاس موفق وجود داشت، نتیجه گرفته شد که با اعمال فشار پشتی به دلیل تحمل کرنش بیشتر در پاس‌های بالاتر، کارپذیری بیلت‌های تیتانیومی افزایش یافته است. همچنین نشان داده شد که با اعمال فشار پشتی، استحکام نهایی فشاری ماده به طور قابل توجهی از ۸۹۹ به ۱۱۶۳ و ۱۳۱۷ مگاپاسکال و میکروسختی از ۱۶۳ به ۲۰۳ و ۲۶۲ ویکرز افزایش یافته و همچنین و ریزش‌دگی دانه‌ها از ۴۹ به ۳۴ و ۲۴ میکرومتر اتفاق افتاده است. این نتایج به ترتیب برای ماده اولیه آنیل شده و حالت‌های بدون و با اعمال فشار پشتی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** تیتانیوم خالص تجاری؛ فرایند ایکپ سرد؛ فشار پشتی؛ کارپذیری؛ خواص مکانیکی.

## Experimental evaluation of back-pressure effect on workability and mechanical properties of commercially pure titanium in cold-ECAP process

Reza Naseri<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Assis. Prof., Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

The applying of Severe Plastic Deformation (SPD) processes, such as Equal Channel Angular Pressing (ECAP), leads to the introducing of high strains on the metallic material and consequently microstructural evolution. As a result of these microstructural evolution, the grains structure were changed to ultra-fine and leads to the improvement of mechanical properties. In this research, commercially pure titanium, as a difficult deformable metal, was subjected to cold-ECAP process in channel angle of 135° with back pressure, and the effect of back pressure on its mechanical properties and workability was investigated. The experimental results showed that by simultaneously applying back pressure and encapsulating the billet in a pure copper tube, the bimetallic work-piece was processed up to four passes. Considering that there were only two successful passes in ECAP process without back pressure, it can be concluded that the workability of pure titanium billets increased by applying back pressure due to the higher strains in higher passes. It was also demonstrated that by subjecting the back pressure, the ultimate compressive strength of material significantly increased from 899 to 1163 and 1317 MPa and microhardness is enhanced from 163 to 203 and 262 Vickers. In addition, the refining of the grains was occurred from 49 to 34 and 24  $\mu\text{m}$ . These results were presented for initial annealed material and the states without and with back pressure, respectively.

**Keywords:** Commercially Pure Titanium; Cold-ECAP Process; Back Pressure; Workability; Mechanical Properties.

## ۱- مقدمه

فرایند ایکپ (ECAP<sup>۱</sup>) یکی از موثرترین و پرکاربردترین فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید است. در این فرایند نمونه‌هایی فلزی به صورت میله‌های با مقاطع مربع یا دایره از یک کانال متقاطع، تحت فشار عبور داده شده و در اثر اعمال تنش برشی ساده در محل تقاطع، کرنش‌های شدید بر قطعه وارد می‌آید. این کرنش‌های بالا به تغییرشکل هندسی ماده، تحولات میکروساختاری و در نهایت فوق‌ریزدانه شدن ساختار کریستالی می‌انجامد و منجر به ارتقای خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده نظیر استحکام، سختی، مقاومت به خستگی، خوردگی و غیره می‌گردد [۱].

در فرایند ایکپ، شکل‌پذیر بودن ماده نقش بسزایی را ایفا می‌کند. یکی از راه‌های افزایش تغییرشکل‌پذیری، استفاده از فشار هیدرواستاتیک است. فشار هیدرواستاتیک نیروهای کششی و فشاری را کاهش می‌دهد بدون آنکه بر تنش برشی اثر بگذارد. لذا می‌تواند تمایل مواد سخت را به ترک‌خوردگی کاهش داده و تغییرشکل‌پذیری را توسعه بخشد. در این فرایند، فشار هیدرواستاتیک می‌تواند مستقیماً توسط اعمال فشار پستی بر ماده‌ی بیلت وارد شود. هنگامی که فشار پستی وارد می‌شود احتمال وجود ترک در نمونه‌های تغییرشکل یافته کمتر می‌شود زیرا کرنش برشی تحت فشار هیدرواستاتیک فشاری قرار می‌گیرد [۲]. فشار پستی در فرایند ایکپ، در کانال خروجی و بر انتهای بیلت در حال تغییرشکل با استفاده از حرکت جانبی قالب کانال خروجی، سنبه‌ی دوم یا جک‌های هیدرولیک و یا افزایش اصطکاک در کانال خروجی اعمال می‌شود [۱].

فشار پستی نقش بسیار مهمی را در فرایند ایکپ آلیاژهای با شکل‌پذیری کم، نظیر تیتانیوم و منیزیم بازی می‌کند. اگرچه افزایش تعداد گذرها به یک تعداد بهینه، می‌تواند کرنش نهایی اعمالی را افزایش دهد و منجر به بهبود خواص مکانیکی ماده گردد؛ ولی اعمال تعداد زیادی گذر بر آلیاژهای سخت‌کارپذیر غیر ممکن است. در حقیقت در حین فرایند ایکپ بعد از تعدادی گذر، ترک‌ها روی نمونه پدیدار می‌شوند. تعداد گذرهایی که منجر به تولید قطعه‌کاری سالم می‌شود، به نوع ماده وابسته است. با افزایش دما می‌توان بر تعداد گذرها افزود ولی افزایش دما به دلیل امکان تبلور مجدد یک راه حل عملی

مناسب نیست. از طرفی دیگر افزایش زاویه‌ی قالب نیز پیشنهاد نمی‌شود زیرا مقدار کل تغییرشکل پلاستیک را کاهش می‌دهد؛ لذا به‌کارگیری فشار پستی در حین ایکپ به عنوان راهی جایگزین جهت بهبود خواص ماده معرفی شد. تحقیقات نشان داده است که ماده در فرایند ایکپ تحت اعمال فشار پستی می‌تواند گذرهای بالاتری را تحمل کند. به محض اینکه بیلت از تقاطع کانال عبور می‌کند، تنش میانگین فشاری (منفی) به کششی (مثبت) تغییر می‌یابد که این تنش کششی منجر به پیدایش ترک در قطعه‌کار می‌گردد. با اعمال فشار پستی، تنش هیدرواستاتیک فشاری منجر به تنش برشی شده و به دلیل استفاده از حالت تنش-کرنش یکنواخت در ماده، آسیب‌های کمتری را سبب می‌گردد [۳]؛ همچنین با استفاده از فشار پستی یک تغییرشکل برشی ساده‌ی ایده‌آل می‌تواند بدست آید. با اعمال فشار پستی، با وارد نمودن کرنش‌های کمتر، افزایشی سریع در چگالی نابجایی‌ها و تبدیل‌های ریزدانه‌ای نسبت به ایکپ بدون فشار پستی اتفاق می‌افتد [۲].

همانطور که از منابع می‌توان دریافت، کارپذیری به عنوان حد یک ماده در تحمل کرنش بدون ایجاد عیوب و شرایط نامطلوب در مقیاس میکرو و ماکرو تعریف می‌شود [۴]. یک نقش مهم فشار پستی بهبود قابل توجه کارپذیری نمونه‌های ایکپ شده است، به طوری که از ترک‌خوردگی نمونه‌ها و انباشت عیوب در گذرهای بالاتر جلوگیری می‌کند. فایده‌ی مهم دیگر فشار پستی، افزایش قابل توجه یکنواختی سیلان فلزی در حین فرایند ایکپ است. در واقع به‌کارگیری فشار پستی به پرشدن قوس خارجی کانال و متعاقباً رفع منطقه‌ی مرده منجر می‌شود که می‌تواند ریزش‌دهی میکروساختاری یکنواختی را در تمام مقطع بیلت ایجاد کند. نتایج نشان داد که با اعمال فشار پستی، کاهش در اندازه دانه رخ می‌دهد و طبق گزارش‌ها، مطالعات بیشتری بر مواد دیگر نیز نیاز است که تعیین شود این ریزتر شدن دانه‌ها به دلیل تغییر در الگوی سیلان فلزی در حین تغییرشکل است یا اینکه فشار اعمالی توسط فشار پستی مستقیماً بر دگرگونی‌های میکروساختاری موثر است [۱، ۵، ۶]. با بررسی توسط شبیه‌سازی اجزاء محدود نیز نشان داده شد که اعمال فشار پستی منجر به افزایش کرنش اعمالی و ارتقای همگنی توزیع کرنش می‌گردد [۷]. همچنین می‌توان از فشار پستی برای یکپارچه‌سازی<sup>۲</sup> پودرها و تراشه‌های

<sup>۲</sup> Consolidation<sup>۱</sup> Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

خواص خستگی ماده‌ی بدست آمده و مقایسه‌ی آن با خواص ماده‌ی صرفاً ایکپ شده، نشان داد که اثر ایکپ به مراتب بیشتر از این فرایند می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ استرین<sup>۳</sup> و همکارانش [۲۰] تیتانیوم خالص را در حضور فشار پستی در دمای °C ۳۵۰ تا ۴ گذر ایکپ کردند و بهبود خواص استحکامی و همین‌طور زیست‌سازگاری نانوساختار بدست آمده را بازتولید بافت-های استخوانی در بدن خرگوش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تیتانیوم خالص فوق ریزدانه زیست‌ماده‌ای قابل اعتماد است. اعمال فشار پستی در این تحقیق منتهی به تولید ریزساختاری با اندازه دانه‌ی ۲۰۰ nm شد. لازم به ذکر است که با استفاده از این تیتانیوم نانوساختار، تحقیقات مشابه دیگری نیز جهت بررسی‌های میکروساختاری، زیست‌سازگاری و خواص مکانیکی، توسط استرین و همکارانش انجام شد [۲۱]، [۲۲]. جاگر<sup>۴</sup> و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از فشار پستی، تیتانیوم خالص رده‌ی ۲ را تا ۴ گذر در کانال °C ۹۰ در دمای محیط ایکپ کردند. مقدار فشار پستی در همه‌ی گذرها بین ۵۹۰-۲۷۰ MPa تنظیم شد. اندازه دانه‌ی ۱۵۰ nm گویای بهبود خواص مکانیکی در آن است و در نهایت بررسی ناهمسان‌گردی و میکروساختار حاصل از اعمال ایکپ بر تیتانیوم خالص انجام شد.

در این تحقیق، فرایند ایکپ سرد بر تیتانیوم خالص تجاری غلاف شده اعمال شد. با استفاده از اکستروژن انتهایی قالب، فشار هیدرواستاتیک به صورت فشار پستی بر نمونه وارد گردید و اثر فشار پستی بر میکروساختار، کارپذیری و خواص مکانیکی نمونه‌ی تیتانیومی مورد بررسی واقع شد. اعمال فرایند ایکپ سرد بر تیتانیوم خالص غلاف شده و اعمال همزمان فشار پستی از نوآوری‌های قابل توجه این تحقیق است؛ همچنین به صورت مبتکرانه برای اولین بار از اکستروژن انتهایی برای اعمال فشار پستی در فرایند ایکپ استفاده شد.

## ۲- مواد و روش‌های آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و قالب ایکپ

قالب ایکپ مورد استفاده در دو لنگه و متشکل از چهار کانال دایروی شکل و از جنس فولاد ابزار گرم‌کار AISI 1.2714 ساخته و تا RC ۵۲ سخت‌کاری شد. در این تحقیق صرفاً از

فلزی نظیر آلومینیوم، مس، تیتانیوم و غیره در فرایند ایکپ استفاده کرد و در نهایت به جامدها یا بالک‌هایی با استحکام بالا دست یافت [۸-۱۱]. علی‌رغم فواید ذکر شده، سطح بالایی از فشار پستی می‌تواند باعث انباشت کرنش در اطراف گوشه‌ی کانال شده که این امر موجب تغییرشکل شدید موضعی گشته و یکنواختی کرنش را کاهش می‌دهد [۳].

به طور خلاصه، اعمال فشار هیدرواستاتیک در فرایند ایکپ جهت افزایش تغییرشکل‌پذیری، بهبود همگنی تغییرشکل و کاهش اندازه‌ی دانه با استفاده از اعمال فشار پستی در کانال خروجی صورت می‌گیرد [۲، ۳]. بررسی اثر فشار پستی بر میزان کارپذیری، تحولات میکروساختاری، چکش‌خواری، خواص مکانیکی، ریزش‌دگی دانه‌ها، همگنی و یکنواختی دانه‌ها، پتانسیل شکل‌دهی در دمای پایین، خوردگی، نرخ تبلور مجدد، رفتار مکانیکی حرارتی و غیره در مواد فلزی مختلف نظیر مس [۱۲]، آلومینیوم آلیاژی [۱۳-۱۵] و منیزیم [۱۶، ۱۷] به عنوان فلز سخت‌کارپذیر تاکنون صورت گرفته و فواید و نتایج مثبت این روش کمکی مشخص شده است. تاکنون تحقیقات بسیار کمی در بررسی اثر فشار پستی بر ایکپ موفق تیتانیوم خالص انجام شده است. در سال ۲۰۰۴، راب<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۸] تیتانیوم خالص را در دمای °C ۴۰۰-۲۰۰ در کانالی °C ۱۲۰ همراه با اعمال فشار پستی تحت ایکپ قرار دادند. فشار پستی با کنترل اصطکاک در کانال خروجی وارد شد. مقادیر فشار پستی بسته به دما و مسیر فرایند، ۶۴۰-۲۸۰ MPa انتخاب شد و اندازه دانه‌هایی nm ۵۰۰-۲۰۰ را ایجاد کرد. هدف از تحقیق آنها مطالعه‌ی اثرات دما و فشار پستی بر میکروساختار CP-Ti در فرایند ایکپ بوده است. نتایج آنها نشان داد که افزایش فشار پستی حتی در صورت کاهش دما منجر به ارتقای شکل‌پذیری ماده شده و در نتیجه می‌توان کرنش‌های بالاتری بر ماده وارد کرد. چروینسکی<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۱ تیتانیوم خالص رده‌ی ۲ را با فشار مستقیم ۱۸۰۰ MPa و فشار پستی کنترل-شده‌ی ۱۰۰ MPa در دماهای °C ۵۰۰-۳۰۰ تا ۴ گذر در کانال °C ۹۰ تحت ایکپ قرار دادند و عمر خستگی و شکل‌پذیری آن را بررسی کردند. مطالعه‌ی اثر فرایند ترموهیدروژنه با نفوذ کنترل‌شده‌ی هیدروژن در تیتانیوم خالص، در شکل‌پذیری و

<sup>۳</sup> Y. Estrin

<sup>۴</sup> A. Jager

<sup>۱</sup> G.I. Raab

<sup>۲</sup> A. Czerwinski

برابر ۱۰۰ mm و ۱۵ mm می‌باشند. این میل‌گردها جهت اعمال عملیات حرارتی آنیل به مدت نیم ساعت در دمای °C ۳۷۵ قرار داده شده و در کوره‌ی خاموش سرد گردیدند [۳۰]. شکل ۲ نمایی واقعی از قطعه کار و میلگرد فشار پستی را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص BT1-0، مس خالص و آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ به صورت درصد وزنی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری BT1-0، مس خالص تجاری و آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۷۰ (درصد وزنی)

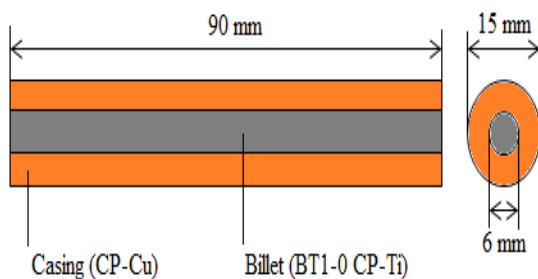
تیتانیوم خالص تجاری BT1-0					
Ti	Al	Fe	Mn	C	V
۹۹/۹۶	۰/۳۷	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲

مس خالص تجاری						
Cu	Fe	Zn	Cd	Pb	Ag	Si
۹۹/۹۶	۰/۳۷	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۲

آلومینیوم خالص تجاری ۱۰۷۰									
Al	Fe	Sn	Mg	V	Ga	Zn	Mn	Ti	Si
۹۹/۸۴	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰



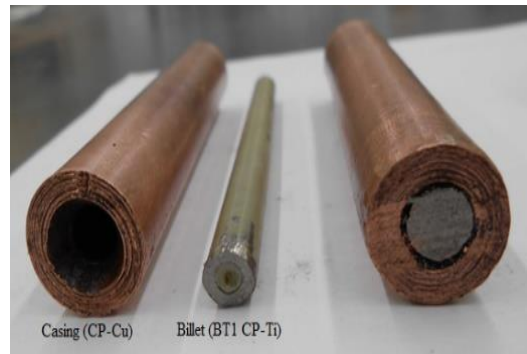
شکل ۱- نمایی شماتیک همراه با ابعاد نمونه‌ی دوفلزی مورد استفاده در بررسی اثر فشار پستی

کانال ۱۳۵° به قطر ۱۵ mm با قابلیت اکستروژن انتهایی به قطر ۱۰ mm استفاده شد. هدف از طراحی کانال خروجی با قابلیت اکستروژن یا به عبارتی کاهش قطر در روزنه‌ی اکستروژن در انتهای کانال خروجی از ۱۵ mm به ۱۰ mm، انجام فرایند اکستروژن در حین فرایند ایکپ با استفاده از قطعه‌کار فرعی موجود در کانال خروجی و استفاده از نیروی اکستروژن متقابل آن جهت اعمال فشار پستی بر ماده‌ی قطعه-کار بوده است.

جهت بررسی اثر فشار پستی بر کارپذیری تیتانیوم خالص غلاف شده، از نمونه‌ای دوفلزی با بیلت از جنس تیتانیوم خالص BT1-0 و غلاف از جنس مس خالص تجاری استفاده شد. در این سری آزمایش‌ها غلاف‌هایی لوله‌ای شکل از جنس مس خالص با قطر داخلی، خارجی و طول تقریبی به ترتیب برابر ۶ mm، ۱۵ mm و ۹۰ mm تهیه و میل‌گردهایی از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 با قطر و طول تقریبی به ترتیب برابر ۶ mm و ۹۰ mm در این غلاف‌ها به صورت انطباق بررسی با تیرانس ۱/۰+ قرار داده شد. پیش از انطباق، جهت انجام عملیات حرارتی آنیل، نمونه‌های از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0، به مدت ۱ ساعت در دمای °C ۸۰۰ در کوره قرار داده و سپس در داخل کوره سرد شدند و کلیه‌ی قطعات ساخته شده از مس خالص تجاری نیز، در دمای °C ۶۰۰ برای یک ساعت حرارت‌دهی و در داخل کوره‌ی خاموش سرد شدند [۲۴، ۲۵]. این نمونه‌های دوفلزی تهیه شده متعاقباً تحت فرایند ایکپ با و بدون اعمال فشار پستی قرار گرفتند. کاهش نیروی پرسکاری، بهبود خواص مکانیکی، افزایش همگنی تغییرشکل و افزایش یکنواختی توزیع کرنش [۲۶، ۲۷] و همچنین اطمینان از اجرای یک ایکپ موفق در دمای محیط [۲۸، ۲۹] از دلایل استفاده از نمونه دوفلزی یا نمونه غلاف شده در مواد سخت‌شکل‌پذیر است. در شکل ۱ نمایی شماتیک از نمونه‌ی دوفلزی مذکور همراه با ابعاد آن نشان داده شده است.

در این تحقیق برای اعمال فشار پستی از تعبیه فرایند اکستروژن مستقیم در انتهای کانال خروجی استفاده شد. بدین منظور ماده‌ی آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ به دلیل سیلان راحت‌تر، به عنوان ماده‌ی فشار پستی در نظر گرفته شد تا ضمن اکستروژن به قطعه‌کار ایکپ فشاری به عنوان فشار پستی وارد کند. میل‌گردهای ساخته شده دارای طول و قطر به ترتیب

نمود؛ ولی در گذر سوم ترک‌های مشهودی در سطح بالایی بیلت از جنس تیتانیوم خالص دیده شد؛ لذا ضمن بررسی عیوب سطحی و زیرسطحی با استفاده از ابزارهای ماکروسکوپی و میکروسکوپی نتیجه گرفته شد که بدون اعمال فشار پستی، تا ۲ گذر در مسیر BC می‌توان ایکپ موفق داشت. شکل ۴ ترک‌های سطحی موجود در سطح بالایی بیلت بعد از گذر سوم را نشان می‌دهد.



(الف)



(الف)



(ب)

شکل ۲- نمای واقعی از (الف) نمونه‌ی دوفلزی مورد استفاده در بررسی اثر فشار پستی قبل و بعد از انطباق پرسی و (ب) میل‌گرد از جنس آلومینیوم خالص ۱۰۷۰ به عنوان قطعه‌کار اعمال فشار پستی

## ۲-۲- اعمال فرایند ایکپ

### بدون اعمال فشار پستی

جهت اعمال فرایند ایکپ بدون فشار پستی از قالب طراحی و ساخته شده در کانال  $135^\circ$  به قطر کانال ۱۵ mm استفاده شد. پرسکاری نیز توسط پرس هیدرولیک ۶۰ تن با سرعت فک ۹ mm/s انجام شد. در حالت بدون اعمال فشار پستی، قطعه‌کار دوفلزی در کانال ورودی قرار داده شد و تا سه گذر در مسیر BC تحت فرایند ایکپ قرار گرفت. سطوح کانال و قطعه‌کار نیز جهت سیلان بهتر ماده توسط روانکار با نام تجاری مولیکوت آغشته شد. در شکل ۳ نمونه‌های دوفلزی بعد از اعمال گذرهای سه‌گانه‌ی ایکپ در دو حالت قبل و بعد از جدا کردن غلاف از روی بیلت نشان داده شده است؛ همچنین در این شکل‌ها به راحتی می‌توان نمایی از بیلت از جنس تیتانیوم خالص BT1-0 و غلاف از جنس مس خالص را قبل از انطباق پرسی مشاهده

شکل ۳- نمونه‌های دوفلزی ایکپ شده بدون فشار پستی (الف) قبل و (ب) بعد از جداکردن غلاف از روی بیلت (علامت  $\checkmark$ ) بیانگر نمونه‌ی سالم و ( $\times$ ) بیانگر نمونه‌ی معیوب

در کانال خروجی قرار داده شد و تحت اکستروژن قرار گرفت؛ لذا میزان فشار پستی در همه‌ی گذرها یکسان می‌باشد. شکل ۶ نمونه‌های دوفلزی را بعد از اعمال ۴ گذر ایکپ موفق همراه با فشار پستی، قبل و بعد از جداکردن غلاف از روی بیلت نشان می‌دهد. بررسی سطح و زیرسطح بیلت‌های تیتانیومی در هر ۴ گذر نشان داده است که هیچ‌گونه ترک سطحی و عیب زیرسطح محسوسی در آن‌ها وجود ندارد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- نمایی از قالب و قطعه‌کارها (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فرایند ایکپ همراه با فشار پستی



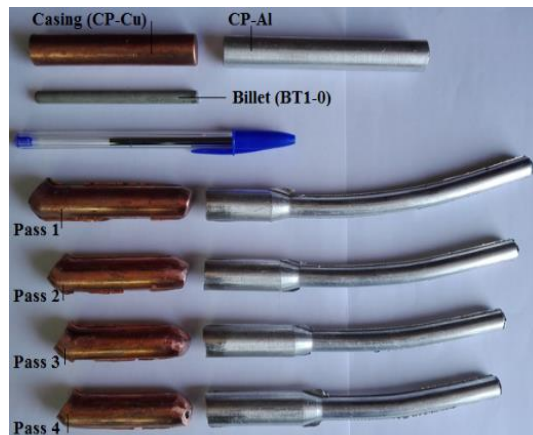
شکل ۶- وجود ترک‌های سطحی روی بیلت بعد از اعمال گذر سوم ایکپ در حالت بدون فشار پستی

#### ▪ با اعمال فشار پستی

فرایند ایکپ همراه با اعمال فشار پستی بر نمونه‌ی دوفلزی مذکور، در شرایط پرسکاری کاملاً مشابه با حالت بدون اعمال فشار پستی انجام شد تا بتوان مقایسه‌ی درستی از عملکرد فشار پستی بر کارپذیری و خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت داشت. تنها تفاوت این دو فرایند در اعمال فشار پستی بوده است که جهت اعمال فشار پستی میل‌گردی از جنس آلومینیوم خالص تجاری با قطر و طول به ترتیب برابر ۱۵ mm و ۱۰۰ mm در کانال خروجی قرار داده شد و این قطعه‌کار با شروع فرایند ایکپ و سیلان قطعه‌کار دو فلزی از کانال ورودی به کانال خروجی، از روزه‌ی اکستروژن انتهای قالب طی تغییر قطر از ۱۵ mm به ۱۰ mm خارج شد. نیروی مورد نیاز جهت اکستروژد، فشار لازم بر انتهای نمونه‌ی دوفلزی هدف را به عنوان فشار پستی در فرایند ایکپ، تامین می‌کند. مقدار فشار ایجاد شده توسط اکستروژن انتهایی تقریباً برابر مقدار ۱۸۵ MPa بوده است که از اختلاف نیروی شکل‌دهی بین حالت ایکپ با فشار پستی و بدون فشار پستی بدست آمده است. نتایج آزمون کشش نشان داد که آلومینیوم خالص تجاری آنیل شده مورد استفاده به ترتیب دارای کرنش نهایی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی حدود ۰/۳۳، ۶۱ MPa و ۸۹ MPa است. در شکل ۵ نمایی از قالب و قطعه‌کارها قبل و بعد از اعمال فرایند ایکپ همراه با فشار پستی نمایش داده شده است. با استفاده از این روش نمونه‌ی دوفلزی با بیلت از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 و غلاف از جنس مس خالص تا ۴ گذر با موفقیت در کانال ۱۳۵° در مسیر BC ایکپ شد. لازم به ذکر است که در هر گذر یک قطعه‌کار آلومینیومی با ابعاد ذکر شده

نیز در دستگاه تک‌محوره‌ی زوئیک Z-250 با نرخ کرنش  $s^{-1}$  ۰/۰۰۴ [۳۱] تحت استاندارد ASTM E9-89 صورت پذیرفت. جهت سختی‌سنجی نمونه‌های ایکپ شده از میانه‌ی نمونه و عمود بر جهت اکستروژن یا محور طولی، برش داده شدند. سطح مقطع ماده‌ی اولیه‌ی آنیل شده و همه‌ی بیلت‌های مورد مطالعه از جنس تیتانیوم خالص BT1-0؛ با استفاده از کاغذهای سنباده سیلیکون کارباید (SiC) به شماره‌های ۱۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ در نهایت با صیقل کاری دستی و اتوماتیک به ترتیب با ذرات آلومینا با اندازه‌ی  $0.5 \mu m$  و  $0.3 \mu m$  تا کیفیت سطح شبه آینه آماده‌سازی شدند. سپس کلیه‌ی مقادیر میکروسختی ویکرز (Hv) با استفاده از یک دستگاه سختی‌سنج بوهرلر بر طبق استاندارد ASTM E92 بدست آورده شدند. سختی‌سنجی‌ها تحت بار  $1 \text{ kgf}$  و زمان بارگذاری برابر  $10 \text{ s}$  انجام شدند و به منظور دستیابی به درجه‌ی بالایی از صحت، هر داده‌ی میکروسختی گزارش شده میانگین حداقل ۵ اندازه‌گیری جداگانه بوده است.

جهت بررسی تغییرات میکروساختار BT1-0 قبل و بعد از اعمال فرایند ایکپ با و بدون فشار پشتی و همچنین جهت اثبات ریزش‌دگی دانه‌ها، از میکروسکوپ نوری (OM) اولیمپس مدل BX60M و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO 1450VP با ولتاژ  $20 \text{ kV}$  استفاده شد. نمونه‌های متالوگرافیکی برای آنالیز میکروساختار از وسط بیلت و عمود بر جهت پرسکاری بریده شدند. پس از ماند داغ با پودر رسانا با استفاده از ورق سنباده‌های سیلیکون کارباید (SiC) به ترتیب با شماره‌های ۱۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ سنباده زنی شده و متعاقباً با صیقل کاری مکانیکی به صورت دستی و اتوماتیک با استفاده از ذرات آلومینای به ترتیب  $0.5 \mu m$  و  $0.3 \mu m$  تا سطح شبه آینه صیقل کاری شدند. سپس این نمونه‌های مطالعاتی، برای نشان دادن مرزدانه‌ها با غوطه‌وری تا  $70 \text{ s}$  در محلول  $(2 \text{ Hf} + 5 \text{ mL } 35\% \text{ H}_2\text{O}_2 + 100 \text{ mL H}_2\text{O})$  محتوی آب‌مقطر، اسید فلوئوریدریک و هیدروژن پراکسید اچ شدند. بلافاصله بعد از اچ به وسیله‌ی الکل شسته و با گرمای مستقیم خشک شدند. با این کار مرزدانه‌ها به دلیل ناپایداری بیشتر خورده شده و در زیر میکروسکوپ دانه‌ها را مشخص می‌سازند. اندازه متوسط دانه‌ها از تصاویر میکروساختاری بدست آمده، با روش جدایش خطی و با



(الف)



(ب)

شکل ۶- نمونه‌های دوفلزی ایکپ شده با فشار پشتی (الف) قبل و (ب) بعد از جداکردن غلاف از روی بیلت

### ۲-۳- عملیات و آزمون‌های تجربی

از آزمون فشار جهت بررسی استحکام فشاری تیتانیوم خالص BT1-0 استفاده شد. بر این ماده بعد از گذرهای صفر، ۱ و ۲ بدون اعمال فشار پشتی و گذرهای ۱ تا ۴ با اعمال فشار پشتی در کانال  $135^\circ$ ، آزمون فشار صورت گرفت. کلیه‌ی آزمون‌های فشار در دمای محیط انجام و جهت صحت‌بخشی به نتایج نیز از حداقل دو آزمون فشار در هر مورد استفاده شد. جهت کاهش اثرات اصطکاکی نیز کلیه‌ی سطوح تماس بین نمونه و فک‌های دستگاه با استفاده از روانکار دی سولفید مولیبدن به خوبی روغن کاری شد. کلیه‌ی نمونه‌های استوانه‌ای فشار، با قطر  $4/5 \text{ mm}$  و ارتفاع  $8 \text{ mm}$  تهیه شدند. نسبت ارتفاع به قطر در این نمونه‌ها نیز تقریباً برابر  $1/78$  در نظر گرفته شد. این آزمون‌ها

استفاده از نرم‌افزار تحلیل عکس MIP و بر طبق استاندارد ASTM E 112-96 تعیین شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر فشار پستی بر کارپذیری

اگر کارپذیری در فرایند ایکپ، تعداد گذرهای موفق ایکپ بدون عیوب سطحی و زیرسطحی نظیر ترک، تکه‌تکه شدگی و شکست تعریف شود؛ در این تحقیق ثابت شد که فشار پستی تأثیری چشمگیر در افزایش کارپذیری تیتانیوم خالص تجاری در فرایند ایکپ غلافی در کانال  $135^\circ$  در دمای محیط داشته است. از اکستروژن آلومینیوم خالص تجاری در انتهای کانال خروجی به عنوان نیروی مورد نیاز جهت اعمال فشار پستی استفاده شد و تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 غلاف شده درون غلاف مسی تا ۲ گذر در ایکپ بدون فشار پستی و تا ۴ گذر در ایکپ با فشار پستی با موفقیت تحت شکل‌دهی واقع گردید. در گذر سوم در ایکپ بدون فشار پستی، ترک خوردگی جزئی در سطح بالایی بیلت دیده شد؛ لذا ۲ گذر در این حالت به عنوان شکل‌دهی موفق در نظر گرفته شد. می‌توان مشاهده کرد که اعمال فشار پستی در این تحقیق منجر به کارپذیری بیشتر تیتانیوم خالص تجاری در دمای محیط شده است. بر اساس رابطه کرنش معادل پلاستیک [۱]؛ میزان کرنش وارد شده در هر گذر ایکپ در کانال  $135^\circ$  با زاویه گوشه‌ی  $20^\circ$  برابر  $0/5$  در نظر گرفته شود؛ در حالت ایکپ بدون فشار پستی با ۲ گذر ایکپ، کرنشی در حدود ۱ و در حالت ایکپ با فشار پستی کرنشی با ۴ گذر ایکپ، کرنشی در حدود ۲ بر ماده‌ی بیلت از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 وارد شده است.

مطالعات گذشته‌ی موجود در منابع که با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود و تجربی صورت گرفته‌اند؛ ثابت کرده است که فشار پستی با افزایش همگنی سیلان، افزایش یکنواختی تغییرشکل، ارتقای همگنی توزیع کرنش، کاهش منطقه‌ی تغییرشکل پلاستیک، کاهش تنش اصلی حداکثر در منطقه‌ی پلاستیک، حذف منطقه‌ی مرده و ممانعت از تمرکز موضعی برشی در بیلت؛ منجر به کاهش چشمگیر تمایل ماده‌ی بیلت به ترک خوردگی، تکه‌تکه‌شدگی و شکست می‌شوند و در نهایت کارپذیری ماده‌ی بیلت را به خصوص در مواد سخت‌کارپذیر نظیر تیتانیوم و منیزیم و غیره حتی در دماهای پایین بهبود می‌بخشند [۲۳، ۳۲-۳۵]. می‌توان نتیجه

گرفت که در این تحقیق نیز دلیل اصلی افزایش کارپذیری BT1-0 در دمای محیط به اعمال فشار پستی در فرایند ایکپ سرد و تأثیرات مثبت آن وابسته است.

#### ۳-۲- اثر فشار پستی بر استحکام فشاری

جهت بررسی خواص مکانیکی استحکامی، ۷ نمونه‌ی آزمون فشار از تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 ایکپ نشده (گذر صفر)، ۲ گذر ایکپ شده بدون فشار پستی و ۴ گذر ایکپ شده با فشار پستی تهیه شد و تحت آزمون فشار قرار گرفت تا استحکام فشاری نمونه‌ها تحت شرایط مختلف ایکپ و اثر فشار پستی بر استحکام فشاری ماده‌ی بیلت، مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که با اعمال فشار پستی استحکام فشاری بالاتری نسبت به حالت بدون اعمال فشار پستی بدست می‌آید. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمون فشار در شکل ۷ ارائه شده‌اند. از این منحنی‌ها مشخص است که در هر دو حالت ایکپ نشده (CG) و ایکپ شده (UFG) اصطلاحاً یک حالت پایدار وجود نداشته و در هر دو مورد، یک افزایش یکنواخت در میزان تنش سیلان با افزایش کرنش در منطقه‌ی پلاستیک یا به عبارتی کرنش‌سختی وجود دارد. در حالات ایکپ شده ابتدا یک افزایش تیز در رفتار تنش-کرنش فشاری مشاهده می‌شود و با ادامه‌ی کرنش، در شیب کمتر به پیک تنش می‌رسد؛ در حالی که در حالت ایکپ نشده ابتدا افزایش ملایم‌تر تنش و سپس رسیدن به پیک در محدوده‌ی بزرگ پلاستیک مشاهده می‌شود. ثابت شده است که رفتار تنش-کرنش فشاری به شدت به دما و نرخ کرنش وابسته است. لازم به ذکر است که منحنی‌های بدست آمده از لحاظ کیفی انطباق مناسبی با مطالعات گذشته دارند [۳۶]. جدول ۲ نیز استحکام تسلیم، نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها را نشان می‌دهد؛ همچنین در شکل ۸ روند تغییر استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ها ارائه شده است.

از نتایج بدست آمده مشخص است، که در حالت بدون فشار پستی؛ با اعمال اولین گذر ایکپ بر میزان استحکام ماده افزوده و از میزان شکل‌پذیری کاسته می‌شود. در گذر دوم نیز استحکام نسبت به گذر اول افزوده شده است ولی شکل‌پذیری به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. در حالت اعمال فشار پستی، بعد از اولین گذر ایکپ به طور چشمگیری بر میزان استحکام افزوده می‌شود و کمی از شکل‌پذیری ماده کاسته می‌گردد که



جدول ۲- استحکام تسلیم، نهایی، درصد افزایش استحکام تسلیم و نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه‌های BT1-0. ایکپ نشده و ایکپ شده طی ۲ و ۴ گذر به ترتیب بدون و با اعمال فشار پستی

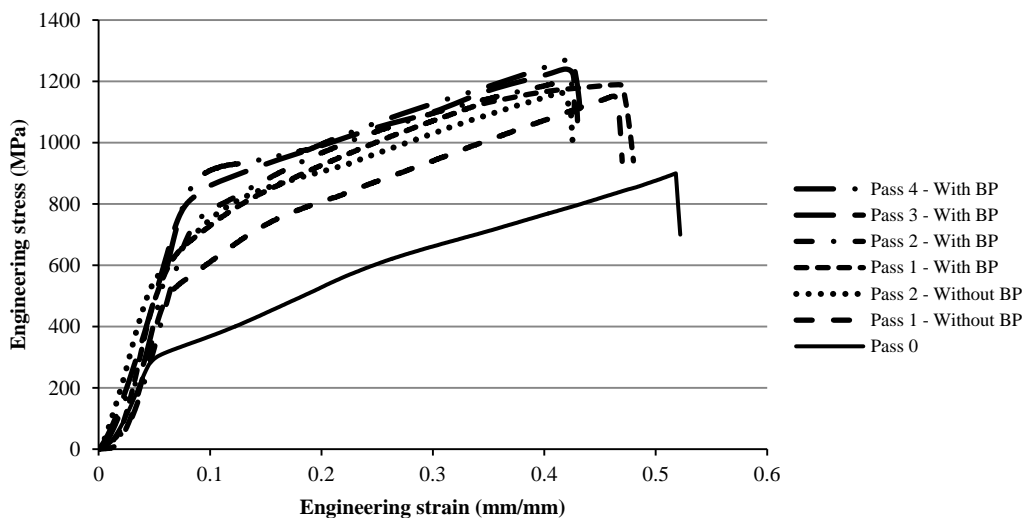
CP-Ti	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_y$ / $\sigma_{yPO}$ (%)	$\sigma_U$ (MPa)	$\sigma_U$ / $\sigma_{UP0}$ (%)	$\delta$ (%)
Pass 0	۲۶۷	-	۸۹۹	-	۵۱/۸
Pass 1 Without BP	۴۷۶	۷۸/۳	۱۱۵۲	۲۸/۱	۴۶/۲
Pass 2 Without BP	۵۲۲	۹۵/۵	۱۱۶۳	۲۹/۴	۴۱/۶
Pass 1 With BP	۶۱۳	۱۲۹/۶	۱۱۸۹	۳۲/۳	۴۶/۵
Pass 2 With BP	۷۲۶	۱۷۱/۹	۱۲۰۰	۳۳/۵	۴۱/۸
Pass 3 With BP	۷۸۵	۱۹۴	۱۲۴۰	۳۷/۹	۴۲/۳
Pass 4 With BP	۸۷۳	۲۲۷	۱۲۷۳	۴۱/۶	۴۲/۵

### ۳-۳- اثر فشار پستی بر سختی

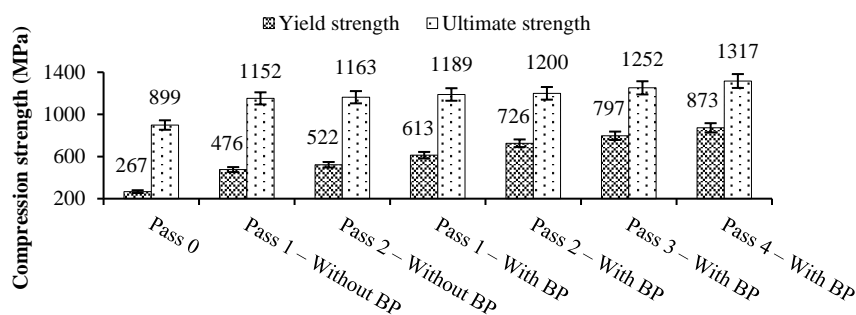
کلیه‌ی نمونه‌های BT1-0 قبل و بعد از ایکپ با و بدون اعمال فشار پستی تحت آزمون میکروسختی ویکرز قرار گرفتند. شکل ۹ نتایج میانگین میکروسختی ویکرز در سطح مقطع هر نمونه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال اولین گذر ایکپ بدون فشار پستی بر میزان سختی به طور قابل توجهی افزوده می‌شود؛ ولی با اعمال دومین گذر ایکپ بدون فشار پستی، سختی نمونه به میزان کمی افزایش می‌یابد. در حالت ایکپ با اعمال فشار پستی، در اولین گذر ایکپ سختی بدست آمده حتی از دومین گذر ایکپ بدون فشار پستی بیشتر بوده و با افزایش تعداد گذرها از ۲ الی ۴ به تدریج بر میزان سختی افزوده می‌گردد.

میزان استحکام بدست آمده حتی از گذر دوم بدون اعمال فشار پستی بیشتر است و شکل‌پذیری بیشتری حتی از گذر اول بدون اعمال فشار پستی دارد. با افزایش گذر ایکپ در حالت با اعمال فشار پستی به تدریج بر میزان استحکام فشاری افزوده شده و شکل‌پذیری در کلیه‌ی گذرهای ۲ الی ۴ تقریباً ثابت و برابر با حالت گذر دوم بدون اعمال فشار پستی باقی می‌ماند. حتی می‌توان گفت شکل‌پذیری در گذرهای ۲ الی ۴ با اعمال فشار پستی از گذر ۲ بدون اعمال فشار پستی کمی بیشتر نیز می‌باشد. این نشان می‌دهد که استحکام و شکل‌پذیری ماده‌ی بیلت با اعمال فشار پستی در فرایند ایکپ نسبت به حالت بدون اعمال فشار پستی به میزان بیشتری بهبود یافته و فشار پستی منجر به بهبود خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت می‌گردد.

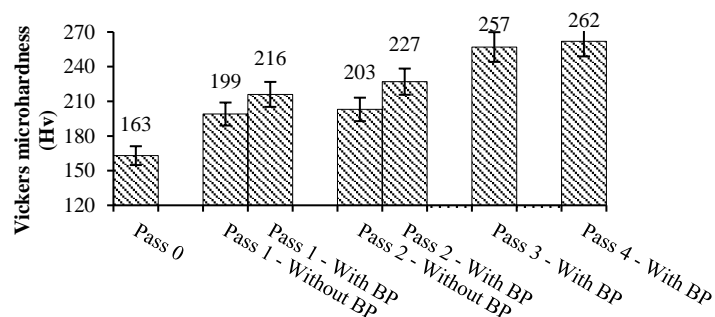
نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که با اعمال فشار پستی در فرایند ایکپ خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت نظیر استحکام، سختی و شکل‌پذیری ارتقاء می‌یابد [۳۴، ۳۷-۴۰]. دلیل بهبود خواص مکانیکی این است که فشار پستی منجر به اعمال کرنش‌های بالاتر شده و با بهبود یکنواختی تغییرشکل و سیلان همگن‌تر نمونه، همگنی توزیع کرنش پلاستیک را افزایش می‌دهد که متعاقباً به ارتقای خواص مکانیکی ماده می‌انجامد [۷، ۳۵، ۴۱، ۴۲]. از سویی دیگر ثابت شده است که با اعمال فشار پستی، چگالی نابعایی‌ها در اثر کرنش اعمالی بالاتر افزایش می‌یابد، ریزش‌دگی دانه‌ها به میزان بیشتری اتفاق می‌افتد و همچنین کسر حجمی بالاتری از مرزدانه‌های زاویه‌بالا ایجاد می‌شود که با بهبود کیفیت و همگنی بافت میکروساختاری و دانه‌بندی ماده؛ خواص مکانیکی ماده‌ی بیلت نظیر استحکام، سختی و شکل‌پذیری را به میزان قابل توجهی بالا می‌برد [۳۷-۴۱، ۴۳]. لازم به ذکر است که استحکام فشاری بدست آمده در اثر ۴ گذر ایکپ همراه با اعمال فشار پستی با مقادیر مربوط به آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V قابل مقایسه است و تقریباً با اغماض برابر هستند [۴۴].



شکل ۷- منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی حاصل از آزمون فشار نمونه‌های BT1-0، ایکپ نشده و ایکپ شده طی ۲ و ۴ گذر به ترتیب بدون و با اعمال فشار پستی



شکل ۸- نمودار روند افزایش استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌های BT1-0، ایکپ نشده و ایکپ شده طی ۲ و ۴ گذر به ترتیب بدون و با اعمال فشار پستی



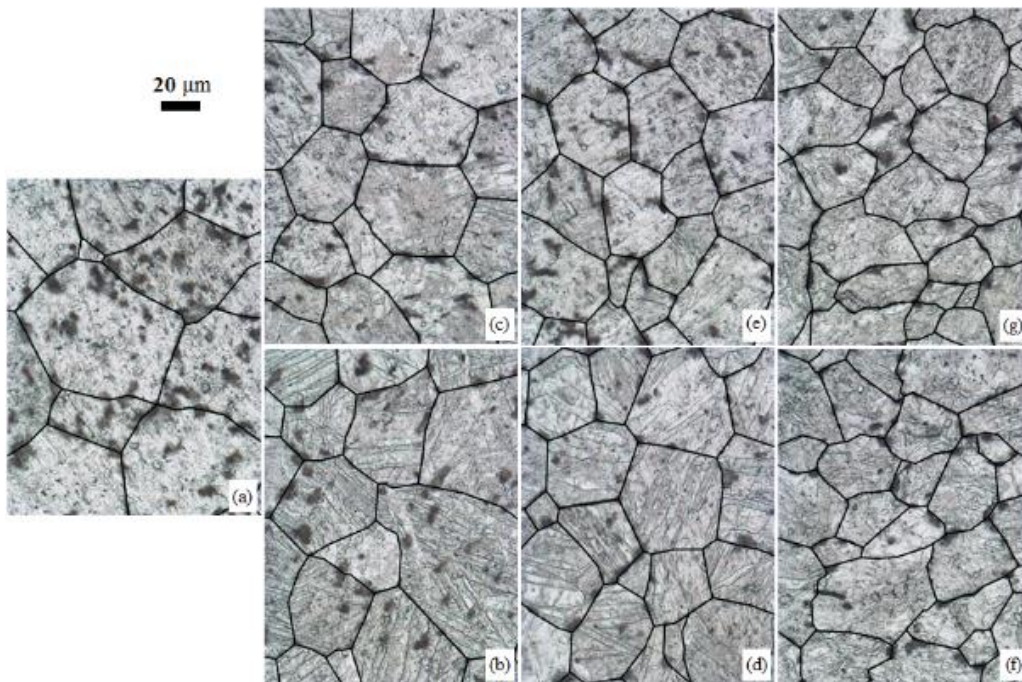
شکل ۹- نمودار روند افزایش میکروسختی ویکرز نمونه‌های BT1-0، ایکپ نشده و ایکپ شده طی ۲ و ۴ گذر به ترتیب بدون و با اعمال فشار پستی

میکروسکوپ نوری مرزدانه‌ها که با استفاده از خطوط سیاه پررنگ شده‌اند به وضوح مشخص بوده و به صورت کیفی می‌توان تغییر اندازه‌ی دانه‌ها را مشاهده کرد. در شکل ۱۲ اندازه دانه‌ی بدست آمده از تصاویر OM برای هر یک از نمونه‌ها ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است؛ بعد از گذر اول اندازه‌ی دانه از  $49 \mu\text{m}$  به  $36 \mu\text{m}$  و  $34 \mu\text{m}$  به ترتیب برای گذرهای ۱ و ۲ بدون اعمال فشار پستی کاهش می‌یابد. نمونه‌های ایکپ شده با اعمال فشار پستی بعد از گذرهای ۱ تا ۴ نیز به ترتیب مقادیر نزولی  $31 \mu\text{m}$ ،  $29 \mu\text{m}$ ،  $26 \mu\text{m}$  و  $24 \mu\text{m}$  را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است؛ با اعمال فرایند ایکپ دانه‌ها ریزتر شده و اعمال فشار پستی بر ریزتر کردن دانه‌ها تأثیر مثبتی دارد؛ به طوری که گذر اول با اعمال فشار پستی ( $31 \mu\text{m}$ ) منجر به اندازه دانه‌ی کمتری حتی نسبت به گذر دوم بدون اعمال فشار پستی ( $34 \mu\text{m}$ ) می‌شود. با افزایش گذر سرانجام در گذر چهارم اندازه دانه‌ی حداقل  $24 \mu\text{m}$  بدست می‌آید.

نتایج در حالت کلی نشان می‌دهد که اعمال فشار پستی در فرایند ایکپ به افزایش قابل توجه میزان سختی بیلت نسبت به ایکپ بدون فشار پستی منتهی می‌گردد. این افزایش سختی در اثر اعمال فشار پستی را نیز همچون دلایل ارائه شده در ارتقای خواص استحکام فشاری؛ می‌توان به تکاملات میکروساختاری، کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، افزایش چگالی نابجایی‌ها، زیاد شدن کسر حجمی مرزدانه‌های زاویه‌بالا، افزایش کرنش اعمالی، همگنی توزیع کرنش و غیره در ماده‌ی بیلت در اثر اعمال فشار پستی نسبت داد [۳۷-۴۱، ۴۳].

### ۳-۴- اثر فشار پستی بر ساختار دانه‌بندی

میکروساختار تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 قبل و بعد از اعمال فرایند ایکپ با و بدون اعمال فشار پستی با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی (SEM) مورد بررسی واقع شد. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب تصاویر OM و SEM از سطح مقطع نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در تصویر حاصل از



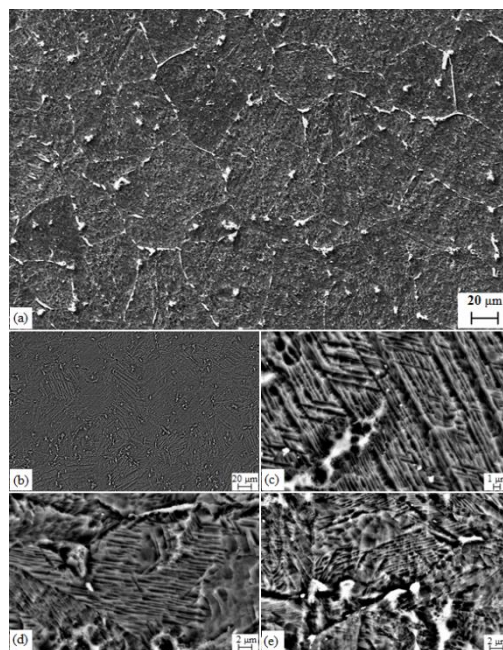
شکل ۱۰- تصاویر OM از ساختار دانه‌بندی BT1-0. (a) قبل از ایکپ، (b) گذر ۱ بدون فشار پستی، (c) گذر ۲ بدون فشار پستی، (d) گذر ۱ با فشار پستی، (e) گذر ۲ با فشار پستی، (f) گذر ۳ با فشار پستی و (g) گذر ۴ با فشار پستی

در محل تقاطع کانال نسبت داد. با توجه به این تحقیق و نتایج بدست آمده از بررسی اثر غلاف در فرایند ایکپ [۲۵] می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از غلاف بهتر است اختلاف استحکام غلاف و بیلت چندان زیاد نبوده و همچنین از غلاف با ضخامت بالا استفاده نشود [۲۵]. با بررسی میکروساختاری حاضر می‌توان گفت که بهبود خواص مکانیکی نظیر افزایش استحکام فشاری و سختی بدست آمده در این تحقیق بیشتر ناشی از تحولات میکروساختاری درون دانه‌ای شامل تشکیل ساختارهای لایه‌ای، نوارهای برشی، میکرو دوقلوبی‌ها، دوقلوبی‌های لایه‌ای [۳، ۴۵] و همچنین افزایش چگالی نابجایی‌ها و به تبع قفل‌شدگی مرزدانه‌ای بوده [۳] و به میزان کمتری از کوچک شدن اندازه دانه تأثیر می‌پذیرد. در تصاویر ارائه شده می‌توان تحولات میکروساختاری در نمونه‌های BT1-0 ایکپ شده در این تحقیق را که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تهیه شده است، مشاهده کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بخشی از تحقیقات انجام شده در این مطالعه بر بررسی اثر فشار پستی در فرایند ایکپ متمرکز شده است. بیلت‌های از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 در غلاف‌های مسی قرار داده شدند و تحت ۲ و ۴ گذر ایکپ سرد ۱۳۵° در مسیر BC به ترتیب بدون اعمال فشار پستی و همراه با آن قرار گرفتند. با بررسی کارپذیری، استحکام فشاری، سختی و اندازه‌ی دانه‌ی بیلت‌ها، نتایج کلی و کیفی زیر بدست آمده است:

- اگر کارپذیری در فرایند ایکپ تعداد گذرهای موفق بدون عیوب سطحی و داخلی بیلت، تعریف شود؛ بدون اعمال فشار پستی تنها ۲ گذر ایکپ موفق و با اعمال فشار پستی ۴ گذر ایکپ موفق بدست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که با اعمال فشار پستی می‌توان میزان کارپذیری را بهبود بخشید و میزان کرنش‌های عملی بدون ایجاد عیوب را طی فرایند ایکپ افزایش و متعاقباً خواص مکانیکی را بهبود داد.
- بررسی استحکام فشاری ماده‌ی ایکپ نشده و بیلت‌های ایکپ شده با و بدون اعمال فشار پستی، نشان داد که می‌توان خواص استحکام استاتیکی فشاری ماده را با اعمال فشار پستی به میزان قابل توجهی افزایش داد.

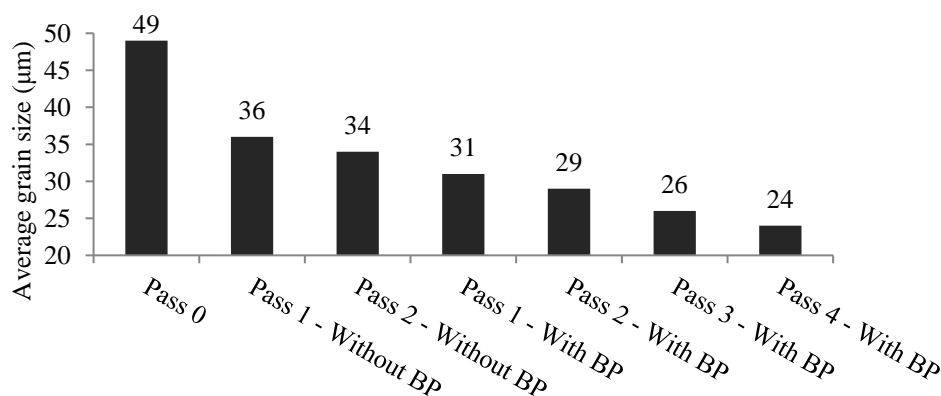


شکل ۱۱- تصاویر SEM از میکروساختار BT1-0، (a) قبل از ایکپ، (b) گذر ۱ بدون فشار پستی، (c) گذر ۲ بدون فشار پستی، (d) گذر ۲ با فشار پستی و (e) گذر ۳ با فشار پستی

با توجه به اینکه بعد از ۴ گذر ایکپ در کانال ۱۳۵° کرنشی در حدود ۲ بر ماده‌ی بیلت وارد می‌آید؛ انتظار می‌رود که اندازه دانه‌ی بسیار کوچکتری حتی زیر میکرون در این حالت بدست آید. ولی کاهش اندازه دانه بعد از ۴ گذر ایکپ چندان زیاد نبوده و تصاویر به صورت کیفی نشان می‌دهند که با وجود ریزش دانه‌ها تغییرات چشمگیری دیده نشده است و کشیدگی دانه اتفاق نیفتاده و دانه‌ها به صورت هم‌محور کمی ریزتر شده‌اند. جهت انجام فرایند، بیلت‌های از جنس تیتانیوم خالص تجاری BT1-0 به قطر ۶ mm در غلاف‌های مسی نسبتاً ضخیم به ضخامت ۴/۵ mm و قطر خارجی mm ۱۵ قرار داده شدند و تحت ایکپ قرار گرفتند. از آنجا که اختلاف استحکام مس خالص به عنوان غلاف و BT1-0 به عنوان بیلت زیاد است؛ بر طبق مشاهدات عینی حدس زده می‌شود که تفاوت چشمگیر در تنش سیلان غلاف و بیلت، منجر به تغییر شکل بسیار غیریکنواخت غلاف، چرخش و فرورفتگی بیلت در غلاف به خصوص در گذرهای بالاتر می‌گردد. ضخامت نامتقارن غلاف مسی برش داده شده گویای این مطلب است. لذا می‌توان دلیل این عدم ریزشگی محسوس را به بیشتر بودن سهم خمش محض نسبت به سهم برش ساده

ایکپ دارد. با اعمال فشار پشتی می‌توان به اندازه دانه‌های ریزتری در یک گذر یکسان نسبت به حالت بدون اعمال فشار پشتی دست یافت.

- بررسی میکروسختی سطح مقطع بیلت‌های ایکپ شده نشان داد که اعمال فشار پشتی منجر به افزایش چشمگیر سختی ماده‌ی بیلت طی فرایند ایکپ می‌گردد.
- تحلیل‌های میکروساختاری نشان داد که فشار پشتی اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان کاهش اندازه دانه طی فرایند



شکل ۱۲ میانگین اندازه دانه‌ی BT1-0 قبل از فرایند ایکپ و بعد از ۲ و ۴ گذر به ترتیب بدون و با اعمال فشار پشتی

[8] K. Xia, X. Wu (2005) Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles. *Scr. Mater.* 53(11): 1225-1229.

[9] M. Haouaoui, I. Karaman, K.T. Harwig, H.J. Maier (2004) Microstructure evolution and mechanical behavior of bulk copper obtained by consolidation of micro-and nanopowders using equal-channel angular extrusion. *Metall. Mater. Trans. A* 35(9): 2935-2949.

[10] Q. Pham, Y.G. Jeong, S.H. Hong, H.S. Kim (2006) Equal channel angular pressing of carbon nanotube reinforced metal matrix nanocomposites. *Key Eng. Mater.*, Trans Tech Publications, 326: 325-328.

[11] G.G. Yapici, I. Karaman, Z.P. Luo, H. Rack (2003) Microstructure and mechanical properties of severely deformed powder processed Ti-6Al-4V using equal channel angular extrusion. *Scr. Mater.* 49(10): 1021-1027.

[12] Y.L. Wang, R. Lapovok, J.T. Wang, Y.S. Qi, Y. Estrin (2015) Thermal behavior of copper processed by ECAP with and without back pressure. *Mater. Sci. Eng., A* 628: 21-29.

[13] A. Mogucheva, E. Babich, B. Ovsyannikov, R. Kaibyshev (2013) Microstructural evolution in a 5024 aluminum alloy processed by ECAP with and without back pressure. *Mater. Sci. Eng., A* 560: 178-192.

[14] P. Mckenzie, R. Lapovok (2010) ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 1: Microstructure. *Acta Mater.* 58(9): 3198-3211.

#### مراجع

[1] R.Z. Valiev, T.G. Langdon (2006) Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog. Mater. Sci.* 51(7): 881-981.

[2] B. Ravisankar, J.K. Park (2008) ECAP of commercially pure titanium: a review. *Trans. Indian Inst. Met.* 61(1): 51-62.

[3] P.S. Roodposhti, N. Farahbakhsh, A. Sarkar, K.L. Murty (2015) Microstructural approach to equal channel angular processing of commercially pure titanium—A review. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 25(5): 1353-1366.

[4] B. Raddad, A. Frefer, M. Abdel-Rahman, A. Tajouri (2013) Some Aspects of Workability of Engineering Materials. *TMS2013 Suppl. Proc.* 593-600.

[5] V.V. Stolyarov, R. Lapovok, I.G. Brodova, P.F. Thomson (2003) Ultrafine-grained Al-5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure. *Mater. Sci. Eng., A* 357(1): 159-167.

[6] K. Xia, J.T. Wang, X. Wu, G. Chen, M. Gurvan (2005) Equal channel angular pressing of magnesium alloy AZ31. *Mater. Sci. Eng., A* 410: 324-327.

[7] F. Djavanroodi, M. Ebrahimi (2010) Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. *Mater. Sci. Eng., A* 527(4): 1230-1235.

- strength of coarse and ultrafine grain commercially pure titanium produced by ECAP. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 18(3): 755-767.
- [28] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati (2017) Static mechanical properties and ductility of biomedical ultrafine-grained commercially pure titanium produced by ECAP process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 27(9): 1964-1975.
- [29] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, M. Kadkhodayan (2022) Corrosion-fatigue resistance of ultrafine grain commercially pure titanium in simulated body fluid. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process Mech. Eng.* DOI: 10.1177/09544089221140682.
- [30] X.G. Qiao, M.J. Starink, N. Gao (2009) Hardness inhomogeneity and local strengthening mechanisms of an Al1050 aluminium alloy after one pass of equal channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng., A* 513: 52-58.
- [31] L. Wang, Y.C. Wang, A.P. Zhilyaev, A.V. Korznikov, S.K. Li, E. Korznikova, T.G. Langdon (2014) Microstructure and texture evolution in ultrafine-grained pure Ti processed by equal-channel angular pressing with subsequent dynamic compression. *Scr. Mater.* 77: 33-36.
- [32] R. Kocich, A. Macháčková, V.A. Andreyachshenko (2015) A study of plastic deformation behaviour of Ti alloy during equal channel angular pressing with partial back pressure. *Comput. Mater. Sci* 101: 233-241.
- [33] R.Y. Lapovok (2005) The role of back-pressure in equal channel angular extrusion. *J. Mater. Sci.* 40(2): 341-346.
- [34] C. Xu, K. Xia, T.G. Langdon (2007) The role of back pressure in the processing of pure aluminum by equal-channel angular pressing. *Acta Mater.* 55(7): 2351-2360.
- [35] F. Kang, J.T. Wang, Y.L. Su, K.N. Xia (2007) Finite element analysis of the effect of back pressure during equal channel angular pressing. *J. Mater. Sci.* 42(5): 1491-1500.
- [36] X.Y. Liu, X.C. Zhao, X.R. Yang, C. Xie, G.J. Wang (2013) Compression deformation behaviours of ultrafine and coarse grained commercially pure titanium. *Mater. Sci. Technol.* 29(4): 474-479.
- [37] P.W.J. Mckenzie, R. Lapovok (2010) ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 1: Microstructure. *Acta Mater.* 58(9): 3198-3211.
- [38] P.W.J. Mckenzie, R. Lapovok (2010) ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 2: Mechanical properties and texture. *Acta Mater.* 58(9): 3212-3222.
- [39] V.V. Stolyarov, R. Lapovok (2004) Effect of backpressure on structure and properties of AA5083
- [15] P. Mckenzie, R. Lapovok (2010) ECAP with back pressure for optimum strength and ductility in aluminium alloy 6016. Part 2: Mechanical properties and texture. *Acta Mater.* 58(9): 3212-3222.
- [16] X.N. Gu, N. Li, Y.F. Zheng, F. Kang, J.T. Wang, L. Ruan (2011) In vitro study on equal channel angular pressing AZ31 magnesium alloy with and without back pressure. *Mater. Sci. Eng., B* 176(20): 1802-1806.
- [17] C. Xu, K. Xia, T.G.J.M.S. Langdon, E. A (2009) Processing of a magnesium alloy by equal-channel angular pressing using a back-pressure. *Mater. Sci. Eng., A* 527(1-2): 205-211.
- [18] G.I. Raab, E.P. Soshnikova, R.Z. Valiev (2004) Influence of temperature and hydrostatic pressure during equal-channel angular pressing on the microstructure of commercial-purity Ti. *Mater. Sci. Eng., A* 387: 674-677.
- [19] A. Czerwinski, R. Lapovok, D. Tomus, Y. Estrin, A. Vinogradov (2011) The influence of temporary hydrogenation on ECAP formability and low cycle fatigue life of CP titanium. *J. Alloys Compd.* 509(6): 2709-2715.
- [20] Y. Estrin, H.E. Kim, R. Lapovok, H.P. Ng, J.H. Jo (2013) Mechanical strength and biocompatibility of ultrafine-grained commercial purity titanium. *Biomed Res. Int.* 2013: 1-6.
- [21] Y. Estrin, C. Kasper, S. Diederichs, R. Lapovok (2009) Accelerated growth of preosteoblastic cells on ultrafine grained titanium. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* 90(4): 1239-1242.
- [22] Y. Estrin, E.P. Ivanova, A. Michalska, V.K. Truong, R. Lapovok, R. Boyd, (2011) Accelerated stem cell attachment to ultrafine grained titanium. *Acta Biomater.* 7(2): 900-906.
- [23] A. Jäger, V. Gärtnerova, K. Tesař (2015) Microstructure and anisotropy of the mechanical properties in commercially pure titanium after equal channel angular pressing with back pressure at room temperature. *Mater. Sci. Eng., A* 644: 114-120.
- [24] R. Naseri, M. Shariati, M. Kadkhodayan (2015) Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing. *Modares Mech. Eng.* 15(6): 157-166.
- [25] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati (2016) The investigation of spring-back of UFG commercially pure titanium in threepoint bending test. *Modares Mech. Eng.* 16(11): 266-276.
- [26] R. Naseri, M. Kadkhodayan, M. Shariati (2017) An experimental investigation of casing effect on mechanical properties of billet in ECAP process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90(9): 3203-3216.
- [27] R. Naseri, H. Hiradfar, M. Shariati, M. Kadkhodayan (2018) A comparison of axial fatigue

- [43] P.W.J. Mc Kenzie, R. Lapovok, Y. Estrin (2007) The influence of back pressure on ECAP processed AA 6016: Modeling and experiment. *Acta Mater.* 55(9): 2985-2993.
- [44] A. Mohammadhosseini, S.H. Masood, D. Fraser, M. Jahedi (2015) Dynamic compressive behaviour of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam melting under high strain rate loading. *Adv. Manuf.* 3(3): 232-243.
- [45] X. Zhao, X. Yang, X. Liu, C.T. Wang, Y. Huang, T.G. Langdon (2014) Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature. *Mater. Sci. Eng., A* 607: 482-489.
- alloy processed by ECAP. *J. Alloys Compd.* 378(1): 233-236.
- [40] C. Xu, K. Xia, T.G. Langdon (2009) Processing of a magnesium alloy by equal-channel angular pressing using a back-pressure. *Mater. Sci. Eng., A* 527(1): 205-211.
- [41] F. Kang, J.Q. Liu, J.T. Wang, X. Zhao (2010) Equal Channel Angular Pressing of a Mg-3Al-1Zn Alloy with Back Pressure. *Adv. Eng. Mater.* 12(8): 730-734.
- [42] I.H. Son, J.H. Lee, Y.T. Im (2006) Finite element investigation of equal channel angular extrusion with back pressure. *J. Mater. Process. Technol.* 171(3): 480-487.