

Research Paper

A Review of the Most Important Methods for Severe Plastic Deformation of Titanium

Sayyed Mohammadreza Sedehi¹, Mohammadreza Maraki^{2*}, Ali Jalali³, Hadi Ezadi³

1. School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

3. Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Received: 2023/12/23

Revised: 2024/02/02

Accepted: 2024/02/07

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2024.32878.2021](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.32878.2021)

Keywords:

Titanium, Severe Plastic Deformation, Simple Shear Extrusion, Equal Channel Angular Pressing, Accumulative Roll Bonding.

Abstract

In recent years, extensive studies have been conducted on severe plastic deformation based on suitable processes for sheets and solid materials. Considering the limitations in some properties and crucial applications of titanium metal, these methods are considered intriguing avenues for enhancing the efficiency of this practical metal. Therefore, efforts have been made to investigate and develop effective severe plastic deformation processes for producing titanium samples. Severe plastic deformation is widely recognized as the primary method for producing ultrafine and nanostructured materials with high strength and hardness. This study focuses on exploring the most recent methods in this family suitable for producing nanostructured titanium samples with ultrafine grains. Furthermore, the study assesses the impact of several key severe plastic deformation methods on titanium properties, comparing them based on the advantages and disadvantages of these methods from both processing and property perspectives.

Findings: In this regard, in recent years, severe plastic deformation methods have been introduced and extensively studied. In this research, by examining and reviewing the latest studies related to the advantages and disadvantages of three methods: simple shear extrusion, accumulative roll bonding, and equal channel angular pressing, the following results have been obtained :

1. All past research indicates that these three methods have a significant and positive impact on the mechanical properties of titanium metal. These positive effects show an increasing acceleration up to a certain number of passes and then reach a saturation point.
2. Temperature, speed, and appropriate processing are three fundamental and important factors concerning severe plastic deformation of titanium metal.
3. Some studies suggest that pure titanium metal can also be processed at room temperature using methods of severe plastic deformation.
4. The frequency of using these methods in relation to titanium metal and its alloys includes methods such as ECAP, accumulative roll bonding, and simple shear extrusion, respectively.
5. A noticeable weakness in most studies conducted on processed titanium using severe plastic deformation methods is the lack of investigation into the biocompatibility properties of titanium concurrently with its mechanical properties after the process.
6. It can be almost stated that in none of the studies conducted on severe plastic deformation methods, a specific industrial output has been introduced, and it remains at the level of research work.

Citation: Sayyed Mohammadreza Sedehi, Mohammadreza Maraki, Ali Jalali, Hadi Ezadi, A Review of the Most Important Methods for Severe Plastic Deformation of Titanium. Quarterly Journal of New Materials. 2023; 14 (52): 19-41.

*Corresponding author: Mohammadreza Maraki

Address: Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Tell: +989156667343

Email: Maraki@birjandut.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Titanium is the ninth element and the fourth most abundant metal in the earth's crust, which is among the light metals. Depending on the alloying elements, the crystal structure of titanium is different at ambient temperature, so pure titanium at room temperature has a compact hexahedral crystal structure (α) and at a temperature of 883 C⁰, it changes phase to a cubic-centered crystal structure (β). If titanium has β -phase stabilizing elements, its phase becomes β - α at ambient temperature. Based on the amount of α and β phases present in the structure at room temperature, titanium is divided into two main categories: pure commercial and alloy (1). Abundant use in environments with high corrosive power and medical uses such as implants is considered one of the characteristics of commercial pure titanium in today's industries. The low mechanical strength of commercial pure titanium has been one of the main obstacles in their common use, which has led to the use of other titanium alloys that often contain harmful elements such as aluminum and vanadium from a biological point of view for human health (2). Pure commercial or non-alloy titanium generally contains 99 to 99.5% titanium with amounts of iron, hydrogen, nitrogen, carbon and oxygen as impurities. Pure commercial titanium has higher corrosion resistance and lower strength than titanium alloys. Based on the amount of impurity elements, titanium is divided into 4 categories, from grade 1 to grade 4, impurity, strength and Young's modulus increase and corrosion resistance decreases (3). One of the practical titanium alloys is grade 5 or Ti6Al4V, which has 6% aluminum and 4% vanadium by weight and is considered β - α alloy. This material has good mechanical strength and wear resistance, but low corrosion resistance. Research has shown that aluminum and vanadium metals release ions in the body (4) and the release of ions makes the body prone to allergies and implant rejection (5). This material can be used where high wear resistance

is required and it is not in contact with the body tissue, such as root connecting screws and dental implant ceramics, and in case of contact with the tissue, a suitable coating should be given (1). Unlike grade 5 alloy titanium, pure titanium does not have the undesirable alloy elements of aluminum and vanadium, so it has acceptable biocompatibility, but this material does not have enough strength to produce an implant. Titanium is widely used in medical applications due to the formation of a very resistant passive layer of TiO₂ on its surface, lower elastic modulus (compared to stainless steel), lightness compared to other surgical metals, and less effects in computed tomography (6). The use of commercial pure titanium (CP-Ti) can be an alternative approach, but its strength is too low for implants to be used in load-bearing situations (7). By improving the microstructure, the mechanical properties of metals can be increased to an acceptable level. Microstructure improvement is usually achieved by performing methods known as severe plastic deformation. These methods are a way to produce ultra-fine-grained and nanostructured materials in which severe strains are applied to the material and the microstructure and mechanical properties of the material are improved. During the last twenty years, many severe plastic deformation methods have been proposed, which are mainly distinguished based on the deformation behavior and different geometry of the parts. It is difficult to process complex shapes with these methods. Recently, Aktash and Kisioglu (8) compared the two processes of machining and thread rolling for the production of dental implants and concluded that the thread rolling process is effective in improving implant strength and fatigue life. Another solution to overcome this problem (low strength of CP-Ti for implants) is to increase the mechanical properties by grain refinement using severe plastic deformation methods. For example, simple shear extrusion, multidirectional forging, and pressure in an equal angle channel have been used to investigate the microstructure, mechanical properties, and

erosion-corrosion behavior of commercial pure titanium using grain refinement (9-11). The results show that the strength improves significantly by increasing the number of passes and decreasing the process temperature. The corrosion resistance of titanium is also improved by increasing the pass steps (due to the formation of a passive oxide layer on the surface of the material) (12). According to the Hall-Patch equations (13), when the grain size decreases, the strength of the material increases greatly at normal room temperature. A structural mechanical property of the material depends on the microstructural properties at room temperature. It is a known fact that a polycrystalline material can be made infinitely strong by reducing its grain size. One of the main features of the polycrystalline metal microstructure is the grain size (13). Advanced metal forming processes are known for their high level of hydrostatic stress based on severe plastic deformation. These methods produce materials with very fine grains with high angular grain boundaries and are unique to changing the cross-sectional area of the material. High hydrostatic pressure and shear deformation for metal processing is the basis of severe plastic deformation methods today (13). In industrial laws, structures larger than 10 micrometers are called coarse-grained materials, 1 to 10 micrometers fine-grained, less than 1 micrometer, ultrafine-grained, and materials whose grain size is less than 100 nanometers are called nanostructures. These materials use common thermomechanical and metal forming processes (14). Common metal forming processes have limited amounts of hydrostatic compressive stress and very small grain boundary angles (15). Increasing the scale of extreme plastic deformation methods for industrial applications is a real challenge for the scientific community (13). In this review research, an attempt has been made to examine more closely three conventional methods from the family of severe plastic deformation for titanium metal and its alloys, including simple

shear extrusion, pressure in an equal-angled channel, and cumulative rolling connection, which have industrial capabilities. It has more development than other methods, in addition to extracting the strengths and weaknesses of previous works, it gained a clearer view of future industrial needs.

Conclusion

Temperature, speed proper lubrication are 3 basic and important factors to severe plastic deformation of titanium metal. The frequency of use of the above three methods to titanium metal and its alloys includes ECAP, Accumulative Roll Bonding, and Simple Shear Extrusion, respectively. The weak point that is evident in most of the research conducted on titanium processed by severe plastic deformation methods is the failure to investigate the biocompatibility properties of titanium at the same time as its mechanical properties after the process. It can almost be said that in none of the research carried out to the methods of severe plastic deformation, no specific industrial output has been introduced and it remains only at the level of research work.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Data collection: Seyyed Mohammadreza Sadeei

Data analysis and results: Mohammad Reza Merki

Final writing: Ali Jalali, Hadi Izadi

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

مروری بر مهمترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید تیتانیوم

سید محمدرضا سده^۱، محمدرضا مرکی^{۲*}، علی جلالی^۳، هادی ایزدی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

مقدمه: در طی سال‌های اخیر، مطالعه تغییرشکل پلاستیک شدید بر اساس فرآیندهای مناسب برای ورق و مواد جامد انجام شده است. با توجه به ضعف برخی خواص و کاربردهای مهم فلز تیتانیوم، این روش‌ها موضوعی جذاب برای افزایش راندمان این فلز کاربردی تلقی می‌شود. بنابراین، تلاش‌هایی برای بررسی و توسعه فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید موثر و مناسب برای تولید نمونه‌های تیتانیومی صورت گرفته است. تغییرشکل پلاستیک شدید به عنوان روش اصلی برای تولید مواد بسیار ریزدانه و نانو ساختار با استحکام و سختی بالا شناخته شده است. مطالعه حاضر در مورد بررسی جدیدترین روش‌های این خانواده مناسب برای تولید نمونه‌های تیتانیومی نانو ساختار با دانه‌های فوق ریز است. این مطالعه همچنین تأثیر برخی از مهمترین روش‌های مختلف تغییرشکل پلاستیک شدید را بر خواص تیتانیوم نشان و با مقایسه بین آن‌ها بر اساس مزایا و معایب روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید بر اساس دیدگاه پردازش و خواص انجام می‌شود.

یافته‌ها: دما، سرعت روانکاری مناسب ۳ عامل اساسی و مهم برای تغییر شکل پلاستیک شدید فلز تیتانیوم است. فراوانی استفاده از سه روش فوق برای فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن به ترتیب شامل روش های ایکپ، اتصال نورد تجمعی و اکستروژن برشی ساده می باشد. نقطه ضعفی که در اکثر تحقیقات انجام شده بر روی تیتانیوم فرآوری شده با روش های تغییر شکل پلاستیک شدید مشهود است، عدم بررسی خواص زیست سازگاری تیتانیوم همزمان با خواص مکانیکی آن پس از فرآیند است. تقریباً می توان گفت که در هیچ یک از تحقیقات انجام شده در مورد روش های تغییر شکل شدید پلاستیک، خروجی صنعتی خاصی معرفی نشده است و تنها در سطح کار تحقیقاتی باقی مانده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2024.32878.2021](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.32878.2021)

واژه‌های کلیدی:

تیتانیوم، تغییر شکل پلاستیک شدید، اکستروژن برشی ساده، ایکپ، اتصال نورد تجمعی.

* نویسنده مسئول: محمدرضا مرکی

نشانی: گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تلفن: ۰۹۱۵۶۶۶۷۳۳۳

پست الکترونیکی: Maraki@birjandut.ac.ir

مقدمه

بسیاری از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مطرح شده است که عمدتاً بر اساس رفتار تغییر شکل و هندسه مختلف قطعات متمایز می‌شوند. پردازش اشکال پیچیده با این روش‌ها دشوار است. اخیراً آکتاس^۱ و کیسی اوگو (۸) با مقایسه دو فرآیند ماشینکاری و نورد رزوه برای تولید کاشتنی‌های دندانی به این نتیجه رسیدند که فرآیند نورد رزوه در بهبود استحکام کاشتنی و عمر خستگی موثر است. راه حل دیگر برای غلبه بر این مشکل (استحکام کم CP-Ti برای کاشتنی)، افزایش خواص مکانیکی با پالایش دانه با استفاده از روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک است. به عنوان مثال، روش‌های اکستروژن برشی ساده، آهنگری چند جهته و فشار در کانال زاویه ای برابر برای بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار فرسایشی - خوردگی تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از پالایش دانه استفاده شده است (۹-۱۱). نتایج نشان می‌دهد که استحکام با افزایش تعداد پاس و کاهش دمای فرایند به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. مقاومت به خوردگی تیتانیوم نیز با افزایش مراحل پاس (به دلیل ساخت یک لایه اکسید غیرفعال بر روی سطح ماده) بهبود می‌یابد (۱۲). بر طبق معادلات هال پیچ (۱۳) وقتی اندازه دانه کاهش یابد، استحکام ماده را در دمای معمولی اتاق بسیار بالا می‌برد. یک ویژگی مکانیکی ساختاری مواد به خواص ریزساختاری در دمای اتاق بستگی دارد. این یک واقعیت شناخته شده است که یک ماده پلی کریستالی را می‌توان با کاهش اندازه دانه آن بی نهایت قوی ساخت. یکی از ویژگی‌های عمده ریزساختار فلزی پلی کریستالی، ابعاد دانه است (۱۳). فرآیندهای شکل‌دهی فلزی پیشرفته بر سطح بالایی از تنش هیدرواستاتیکی مبتنی بر تغییر شکل پلاستیک شدید شناخته می‌شوند. این روش‌ها موادی با دانه‌های بسیار ریز تولید می‌کنند که با مرز دانه‌های زاویه‌دار بالا و منحصر به تغییر سطح مقطع مواد هستند. فشار هیدرواستاتیک بالا و تغییر شکل برشی برای پردازش فلز، اساس روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید امروزه است (۱۳). در قوانین صنعتی به ساختارهای بزرگتر از ۱۰ میکرومتر مواد درشت دانه، ۱ تا ۱۰ میکرومتر ریزدانه، کمتر از یک میکرومتر، فوق ریزدانه و به موادی که اندازه دانه ساختار آن‌ها کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد نانو ساختار می‌گویند. این مواد از فرآیندهای متداول ترمومکانیکی و شکل‌دهی فلزات استفاده می‌کنند (۱۴). فرآیندهای متداول شکل‌دهی فلز دارای مقادیر محدودی از تنش فشاری هیدرواستاتیک و زاویه مرزدانه‌های بسیار کوچک هستند (۱۵). افزایش مقیاس روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای کاربردهای صنعتی یک چالش واقعی برای جامعه علمی است (۱۳). در این پژوهش مروری، سعی بر آن شده است تا با بررسی دقیق‌تر سه روش مرسوم از خانواده تغییر شکل پلاستیک شدید برای فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن، شامل اکستروژن برشی ساده، پرس در کانال زاویه‌دار برابر و اتصال نورد تجمعی، که قابلیت صنعتی - سازی بیشتری نسبت به روش‌های دیگر دارد، علاوه بر استخراج نقاط ضعف و قوت کارهای پیشین، دیدگاهی روشن‌تر نسبت به نیازهای صنعتی آینده به دست آورد.

روش‌های مرسوم تغییر شکل پلاستیک شدید تیتانیوم

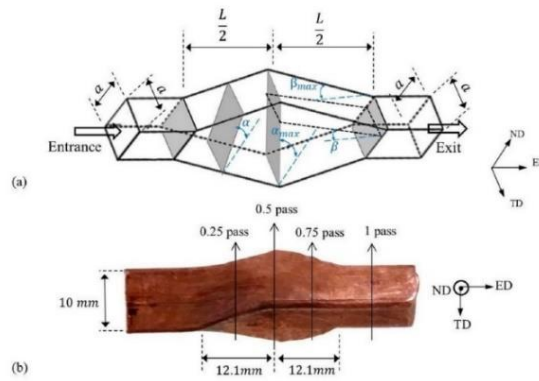
۱- اکستروژن برشی ساده

تیتانیوم، نهمین عنصر و و چهارمین فلز فراوان در پوسته زمین بوده که در زمره فلزات سبک قرار می‌گیرد. بسته به عناصر آلیاژی، ساختار کریستالی تیتانیوم در دمای محیط متفاوت است، به طوری که تیتانیوم خالص در دمای اتاق دارای ساختار کریستالی ۶ وجهی فشرده (α) بوده و در دمای ۸۸۳ درجه سانتیگراد به ساختار کریستالی مکعب مرکزدار (β) تغییر فاز می‌دهد. اگر تیتانیوم عناصر پایدار کننده فاز β داشته باشد در دمای محیط فاز آن α - β می‌شود. تیتانیوم بر اساس میزان فازهای α و β موجود در ساختار در دمای اتاق به دو دسته اصلی خالص تجاری و آلیاژی تقسیم بندی می‌شود (۱). کاربرد فراوان در محیط‌های با قدرت خوردگی زیاد و مصارف پزشکی نظیر کاشتنی‌ها از خصوصیات تیتانیوم خالص تجاری در صنایع امروزی محسوب می‌شود. استحکام مکانیکی پایین تیتانیوم خالص تجاری اما یکی از موانع اصلی در استفاده رایج از آن‌ها بوده که این مسئله موجب استفاده از آلیاژهای دیگر تیتانیوم که اغلب دارای عناصر مضر مانند آلومینیوم و وانادیوم از نظر بایویی برای سلامت انسان می‌باشد، شده است (۲). تیتانیوم خالص تجاری یا غیر آلیاژی عموماً شامل ۹۹ الی ۹۹/۵ درصد تیتانیوم با مقادیر آهن، هیدروژن، نیتروژن، کربن و اکسیژن به عنوان ناخالصی می‌باشد. تیتانیوم خالص تجاری نسبت به آلیاژهای تیتانیوم مقاومت به خوردگی بالاتر و استحکام پایین‌تری دارد. بر اساس میزان عناصر ناخالصی تیتانیوم به ۴ دسته تقسیم شده که از درجه ۱ به سمت درجه ۴، ناخالصی، استحکام و مدول یانگ افزایش و مقاومت به خوردگی کاهش می‌یابد (۳). یکی از آلیاژهای کاربردی تیتانیوم، درجه ۵ یا Ti6Al4V است که ۶٪ وزنی آلومینیوم و ۴٪ وزنی وانادیوم داشته و آلیاژ α - β به شمار می‌رود. این ماده استحکام مکانیکی و مقاومت به سایش خوب اما مقاومت به خوردگی پایین دارد. تحقیقات نشان داده است فلزات آلومینیوم و وانادیوم در بدن یون آزاد کرده (۴) و آزاد شدن یون، بدن را مستعد آلرژی و پس زدن کاشتنی می‌کند (۵). از این ماده در جایی که نیاز به مقاومت سایشی بالا بوده و با بافت بدن در تماس نباشد مثل پیچ متصل کننده ریشه و سرامیک کاشتنی دندان می‌توان استفاده کرد و در صورت تماس با بافت باید پوششی سازگار داده شود (۱). برخلاف تیتانیوم آلیاژی درجه ۵، تیتانیوم خالص فاقد عناصر آلیاژی نامطلوب آلومینیوم و وانادیوم بوده لذا از زیست سازگاری قابل قبولی برخوردار است اما این ماده از استحکام کافی برای تولید یک کاشتنی برخوردار نیست. تیتانیوم به دلیل تشکیل یک لایه غیرفعال بسیار مقاوم از TiO_2 بر روی سطح آن، مدول الاستیک پایین تر (نسبت به فولاد ضد زنگ)، سبک بودن نسبت به سایر فلزات جراحی و ایجاد آثار کمتر در توموگرافی کامپیوتری در کاربردهای پزشکی کاربرد زیادی دارد (۶). استفاده از تیتانیوم خالص تجاری (CP-Ti) می‌تواند یک رویکرد جایگزین باشد، اما استحکام آن برای کاشتنی‌ها برای استفاده در موقعیت‌های باربر بسیار کم است (۷). با بهبود ریزساختار می‌توان خواص مکانیکی فلزات را تا حد قابل قبولی افزایش داد. بهبود ریزساختار معمولاً با انجام روش‌های موسوم به تغییر شکل پلاستیک شدید حاصل می‌شود. این روش‌ها، راهی برای تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار است که در آن‌ها کرنش‌های شدیدی به ماده اعمال و ریزساختار و خواص مکانیکی ماده بهبود پیدا می‌کند. در طول بیست سال گذشته،

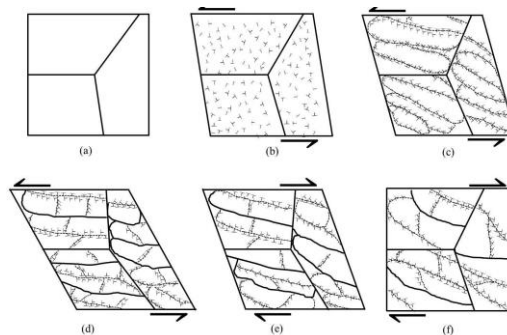
1- Aktas

سده ئی و همکاران (۹) در پژوهشی با ساخت کامپوزیت تیتانیوم از طریق روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، این نمونه‌های تولیدی را بعد از آنیل در دمای اتاق با روش اکستروژن برشی ساده ریزدانه کرده و سپس خواص مکانیکی آنان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج خواص مکانیکی این پژوهش نشان دهنده آن است که سختی نمونه تیتانیوم خالص آنیل شده، بعد از ۱ و ۲ پاس اکستروژن برشی ساده به ترتیب ۲۰۰، ۳۴۰، ۴۱۱ ویکرز و مقادیر استحکام کششی به همین ترتیب ۶۳۰، ۹۰۰ و ۹۱۵ مگاپاسکال را ثبت کرده است. شکل ۳ نمونه‌های تولیدی، نتایج استحکام کششی و شکل ۴، تصاویر متالوگرافی مراحل مختلف این پژوهش را نشان داده است. روش اکستروژن برشی ساده در رابطه با تیتانیوم کمتر از دیگر روش‌ها، کار شده است.

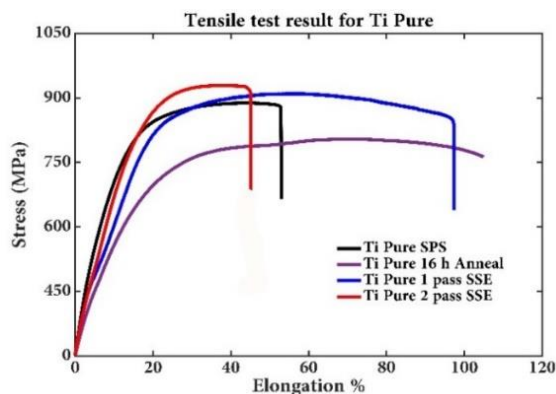
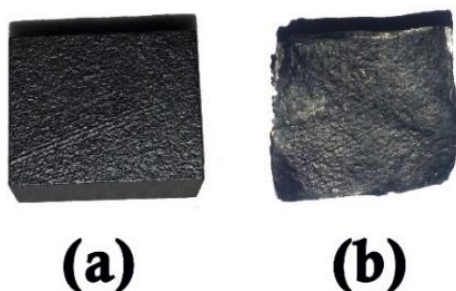
اکستروژن برشی ساده که در سال ۲۰۰۹ توسط پردیس و ابراهیمی (۱۶) معرفی شد، یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مبتنی بر پرس مواد در کانال اکستروژن مستقیم است. در میان فرآیندهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید، این فرآیند می‌تواند مقادیر فشار بالا را به تدریج اعمال کند. علاوه بر این، طراحی خاص این فرآیند منجر به اعمال فشار کمکی به نمونه‌هایی می‌شود که از کانال عبور می‌کنند (۱۷). با عبور از کانال اکستروژن برشی ساده، مقطع اولیه ماده به متوازی الاضلاع با زاویه اعوجاج α تبدیل می‌شود. حداکثر کرنش برشی در وسط کانال با حداکثر زاویه چرخش (α_{max}) اعمال می‌شود. زاویه اعوجاج به تدریج در نیمه دوم کانال اکستروژن برشی ساده به صفر کاهش می‌یابد (۱۸). شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب شماتیک روش و تکامل ریزساختار در طی گذر از کانال قالب اکستروژن برشی ساده را نشان می‌دهد (۱۹).



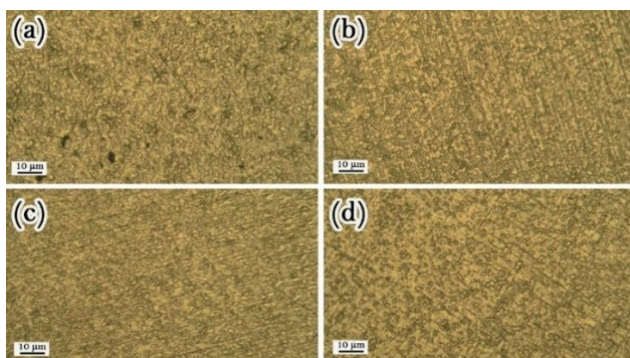
شکل ۱- (a) ارائه شماتیک کانال و (b) یک نمونه در طول فرآیند اکستروژن برشی ساده. (مکان های انتخاب شده برای بررسی ریزساختار و سختی نیز گنجانده شده است) (۱۹)



شکل ۲- شماتیک از تکامل ریزساختاری در طی یک گذر اکستروژن برشی ساده: برش جلو: (b-d) و برش معکوس: (e-f). (a) ساختار سلولی اولیه. (b) توزیع همگن نابجایی‌ها. (c) تشکیل سلول دراز. (d) نابجایی‌های مسدود شده توسط مرزهای زیردانه و شکستن زیردانه‌های کشیده. (e) کاهش زاویه جهت‌گیری نادرست و یا حذف کامل مرزهای دررفتگی. (f) ریزساختار نهایی در خروجی کانال (۱۹)



شکل ۳- نمونه‌های تولیدی، نتایج استحکام کششی قبل و بعد از اکستروژن برشی ساده (۹)



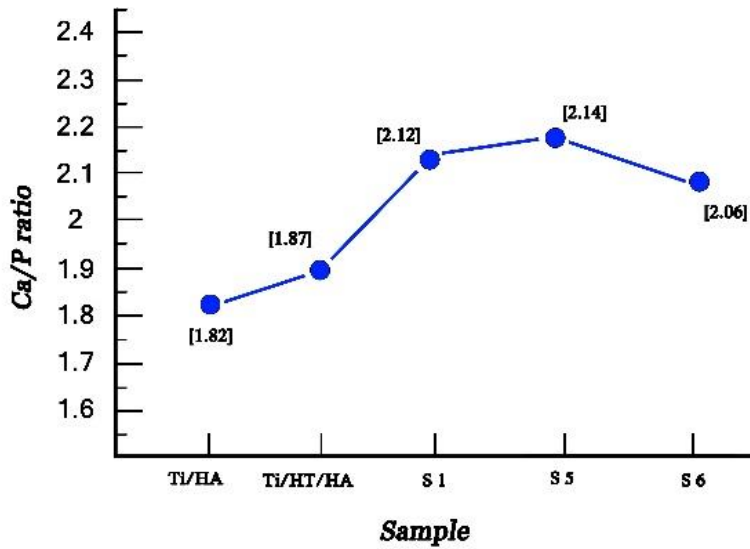
شکل ۴- (a) تفجوشی (b) آنیل (c) یک و (d) دو پاس اکستروژن برشی ساده (۹)

شده - ۲۸ روز (نمونه ۶) ، نمونه دارای ۰/۱ درصد گرافن دو پاس ریزدانه شده - ۷ روز (نمونه ۷) ، نمونه دارای ۰/۱ درصد گرافن دو پاس ریزدانه شده - ۲۸ روز (نمونه ۸) و نمایش شکل ۵ نشان دادند که بعد از قرارگیری نمونه‌های پردازش شده در محلول شبیه‌ساز بدن در مدت ۷ و ۲۸ روز، نمود حضور عناصر استخوانی در سطح به صورت آشکار، قابل مشاهده است. علاوه، آنالیز EDS نمونه‌ها نشان داده شده حضور عناصر P و Ca را به عنوان عناصری جدید در ساختار تایید می‌کند. به طور کلی زمانی می‌توان ادعا نمود که نمونه‌ها نسبت به شرایط شبیه‌سازی شده بدن واکنش مثبت نشان داده‌اند که مقدار Ca/P آن نزدیک بافت استخوانی انسان و چیزی در

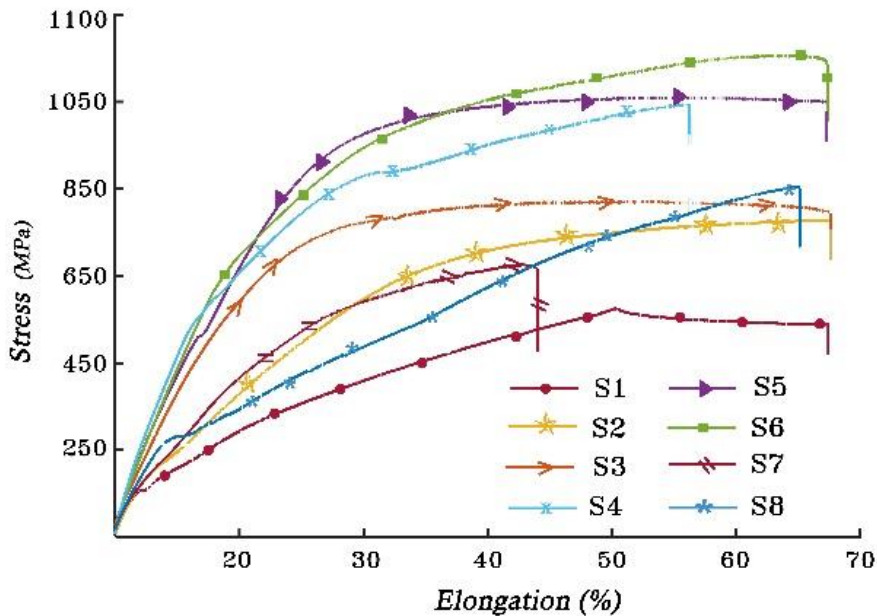
محققین این پژوهش در ادامه کار قبلی خود به بررسی خواص زیست سازگاری تیتانیوم بعد از انجام فرایند اکستروژن برشی ساده پرداخته و نشان دادند که نمونه ریزدانه شده توسط این روش، رفتاری با ارتقا خواص مکانیکی و زیست سازگاری به طور همزمان از خود نشان می‌دهد (۲۰). آنان با نام- گذاری نمونه‌های آزمایش به ترتیب نمونه خالص سینتر شده - ۷ روز (نمونه ۱) نمونه خالص سینتر شده - ۲۸ روز (نمونه ۲)، نمونه دارای ۰/۰۵ درصد گرافن مرحله آنیل - ۷ روز (نمونه ۳)، نمونه دارای ۰/۰۵ درصد گرافن مرحله آنیل - ۲۸ روز (نمونه ۴)، نمونه دارای ۰/۱ درصد گرافن یک پاس ریزدانه شده - ۷ روز (نمونه ۵) ، نمونه دارای ۰/۱ درصد گرافن یک پاس ریزدانه

تشکیل کلسیم بر سطوح بیرونی و شکست نمونه‌ها به وضوح مشاهده می‌شوند. همانگونه که قبلاً اشاره شد، میزان ایجاد کلسیم بر روی بدنه نمونه اول بیشتر از دو نمونه دیگر بوده اما در سطح مقطع شکست نمونه دوم، نسبت Ca/P، درصد وزنی مقدار بالاتری را نشان می‌دهد.

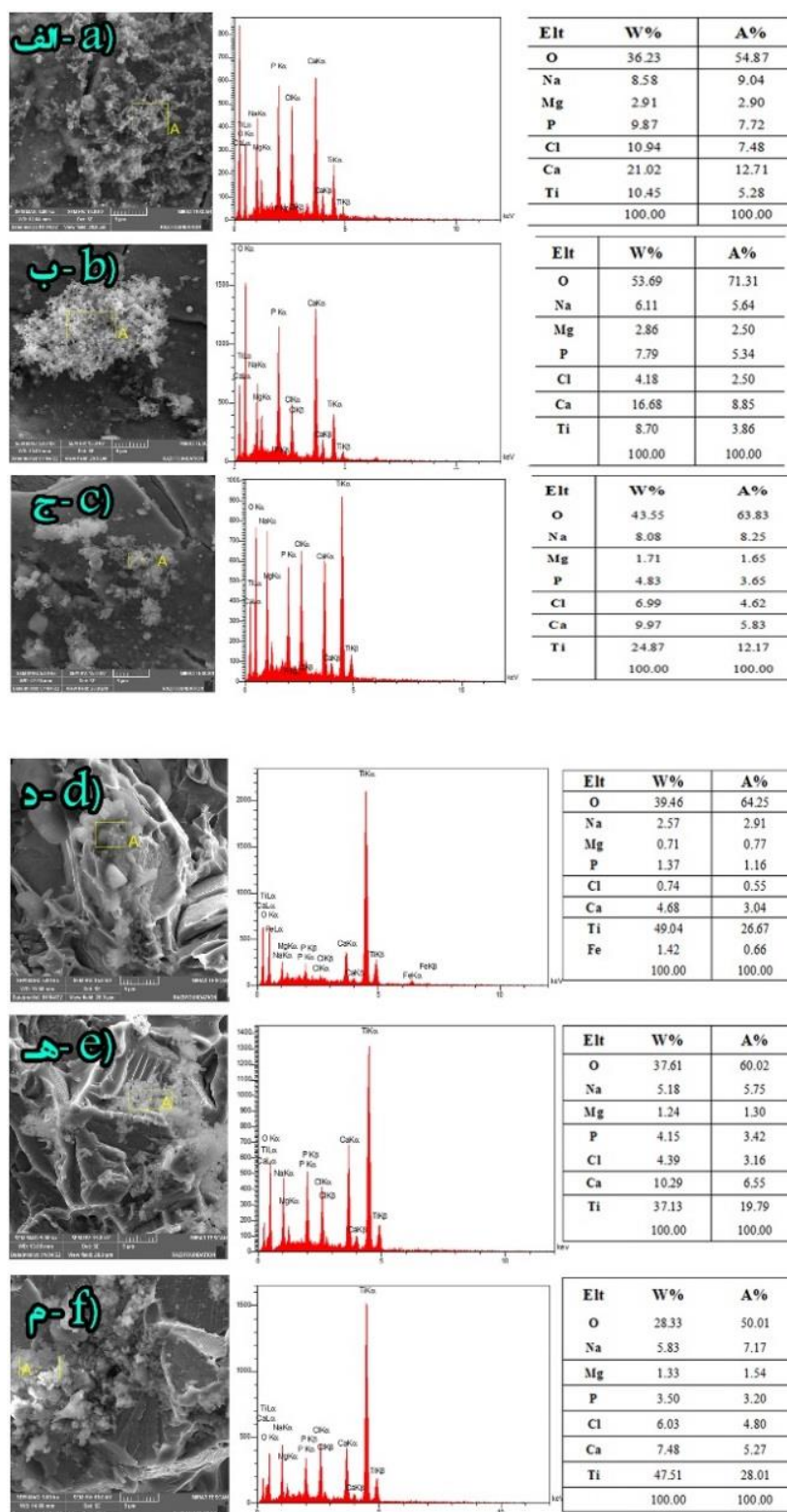
حدود ۱/۶۷ باشد (۱۲). که این متغیر به ترتیب برای نمونه‌های ۱، ۵ و ۶ که دارای حداقل و حداکثر خواص نتایج آزمون کشش هستند، مقدار ۲.۱۲، ۲.۱۴ و ۲.۰۶ را ثبت کرده است (شکل ۶). تصاویر SEM مورفولوژی بدنه و سطح شکست نمونه‌ها در مراحل مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵ - نتایج حضور عناصر استخوانی (۲۰)



شکل ۶ - نتایج آزمون کشش (۲۰)

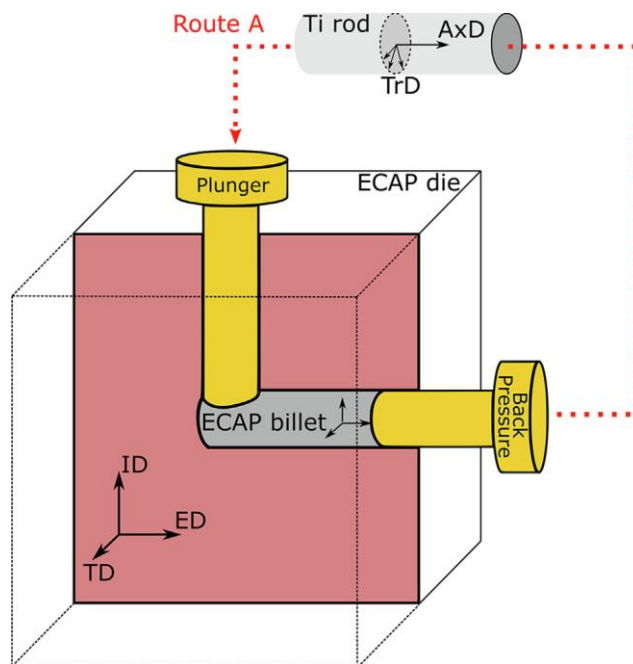


شکل ۷ - تصاویر SEM از بدنه کامپوزیت: الف) نمونه اول ب) نمونه پنجم ج) نمونه ششم و از سطح مقطع شکست د) نمونه اول ه) نمونه پنجم م) نمونه ششم (۲۰)

۱- پرس در کانال زاویه دار برابر

یانکسیا^۱ و همکاران (۳۰) در پژوهشی به بررسی اثر بازپخت کوتاه مدت بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی فلز فوق ریزدانه تیتانیوم خالص تولید شده توسط روش کانال زاویه دار برابر که به توسعه سریع صنایع دریایی کمک می کند، می پردازد. پس از فرایند پیوسته در دمای ۴۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ پاس، استحکام بیشتری به دست آمد، در حالی که بازپخت کوتاه مدت اضافی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه منجر به بهبود فوق العاده استحکام شد که با تقویت بافت در ارتباط بود. استحکام تسلیم از ۳۶۲ مگاپاسکال در حالت اولیه به ۵۶۱ مگاپاسکال در حالت انیل شده پس فرایند و استحکام کششی نهایی از ۴۵۰ به ۶۶۳ مگاپاسکال افزایش یافت. تیتانیوم ریزدانه شده با این روش مقاومت خوردگی بهتری در آب دریا نسبت به نمونه اولیه دارد. شکل ۹ نتایج مرتبط با آزمون های کشش و خوردگی این تحقیق را نشان می دهد.

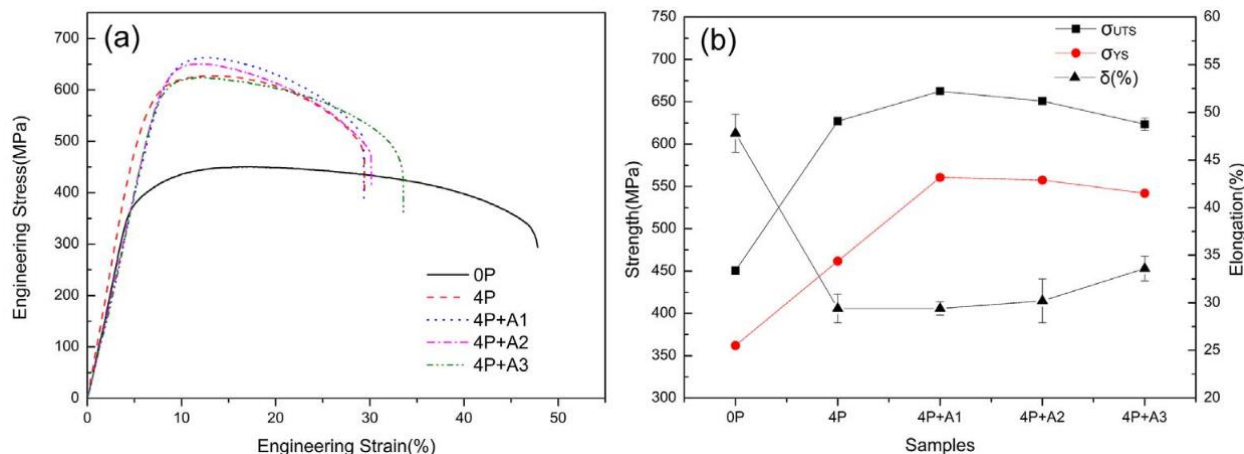
فرایند پرس زاویه ای با کانال برابر به عنوان یکی از برجسته ترین روش های تغییر شکل پلاستیک شدید، می تواند پیشرفت مواد حجیم را برای کاربردهای صنعتی و زیست پزشکی فراهم کند (۲۱). تیتانیوم خالص یک گزینه مناسب است که می تواند از خواص مکانیکی قابل دستیابی توسط فرایند کانال زاویه دار برابر بهره مند شود (۲۲). ریزساختار و خواص سطحی مطلوب می تواند زیست سازگاری محصول نهایی را افزایش دهد، به عنوان مثال یک کاشتنی دندان، بدون اثرات منفی عناصر آلیاژی (۲۳). چندین پارامتر وجود دارد که به شدت بر خواص تیتانیوم تولید شده توسط این روش تأثیر می گذارد، مانند دمای فرایند، هندسه قالب، فشار برگشتی و مسیر کانال، که به تفصیل در تحقیقات دیگر توضیح داده شده است (۲۴-۲۵). ریزساختار حاصل از تیتانیوم نانوکریستالی یا فوق ریزدانه، بافت قوی (۲۶) از خود نشان می دهد و پایداری حرارتی آن باید به دقت مورد توجه قرار گیرد تا خواص مفید آن به ویژه از نظر رشد دانه (۲۷) و نواقص بازپخت (۲۸) حفظ شود. شماتیک این فرایند در شکل ۸ نشان داده شده است (۲۹).



شکل ۸ - شماتیک فرایند پرس زاویه ای با کانال برابر، طرح قالب کانال زاویه دار برابر با سیستم مختصات و طرح میله تیتانیوم با جهت های اصلی که به عنوان چارچوب مرجع برای نمونه های قبل از کانال زاویه دار برابر عمل می کند. اختصارات ID، ED و TD به ترتیب نشان دهنده جهات ورود، اکستروژن و عرضی هستند. اختصارات AxD و TrD به ترتیب نشان دهنده جهت محوری و عرضی میله هستند (۲۹).

1- Yanxia

| Sample | E_{corr} (V) | I_{corr} (nA cm ⁻²) |
|--------------------|-----------------------|--|
| As-received | -0.405 ± 0.011 | 68.37 ± 2.04 |
| ECAP processed | -0.428 ± 0.007 | 56.76 ± 1.36 |
| Post-ECAP annealed | -0.407 ± 0.010 | 41.77 ± 1.81 |

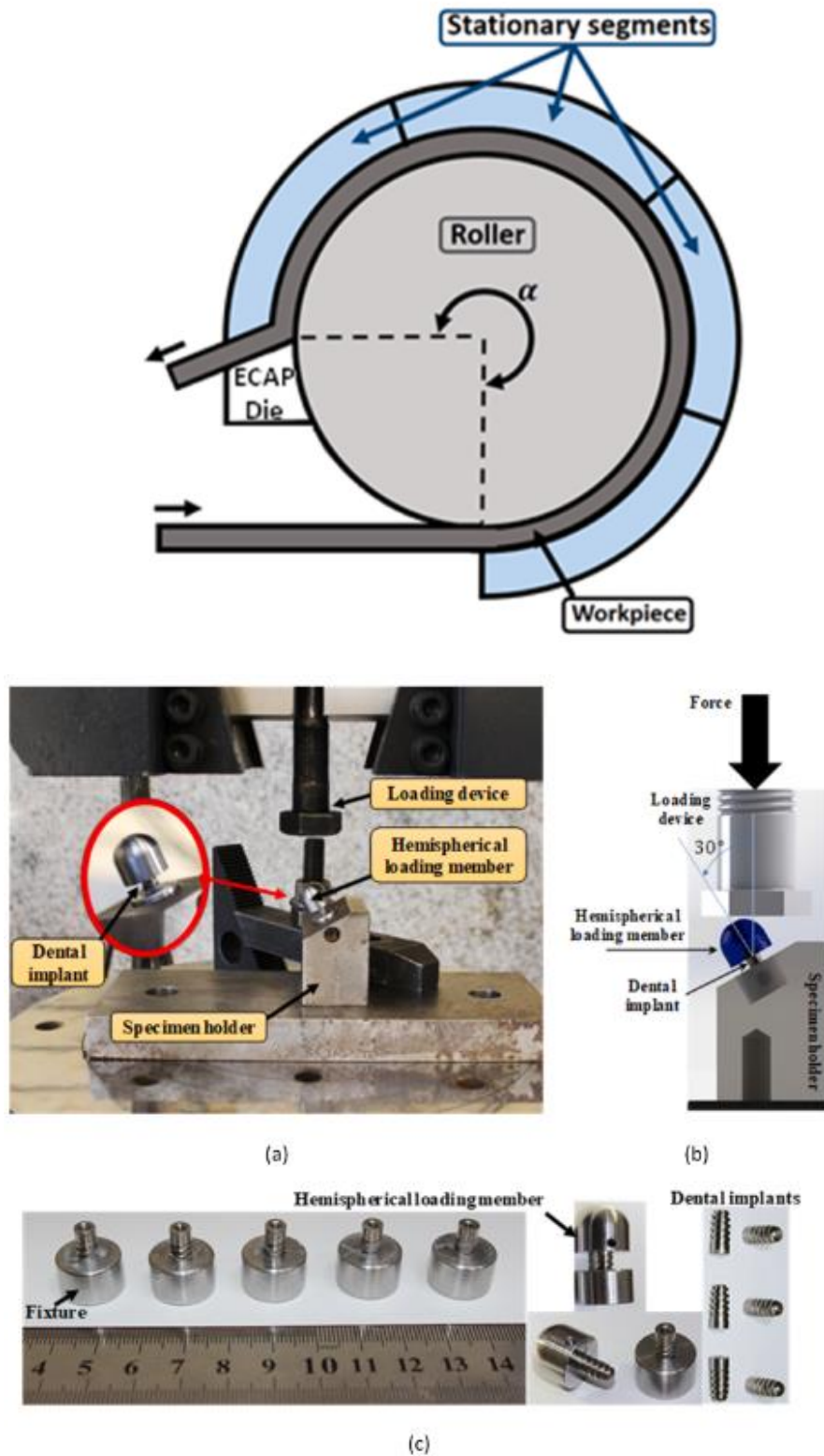


شکل ۹ - خواص خوردگی و خواص کششی تیتانیوم خالص در حالت اولیه، پس از ۴ پاس و پس از بازپخت پس از انجام فرایند در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه (A1)، ۳۰ دقیقه (A2) و ۶۰ دقیقه (A3): (a) منحنی‌های کششی، (b) تغییر استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و ازدیاد طول شکست (۳۰).

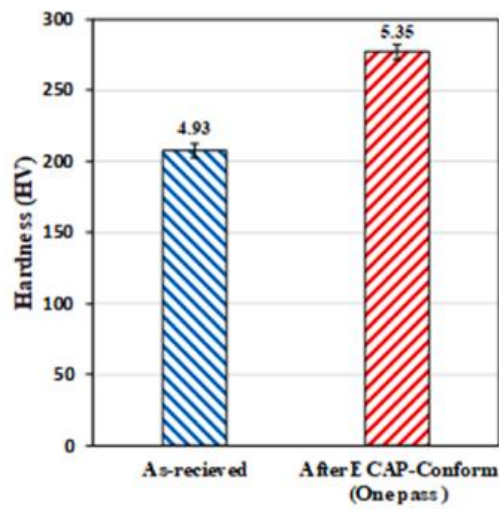
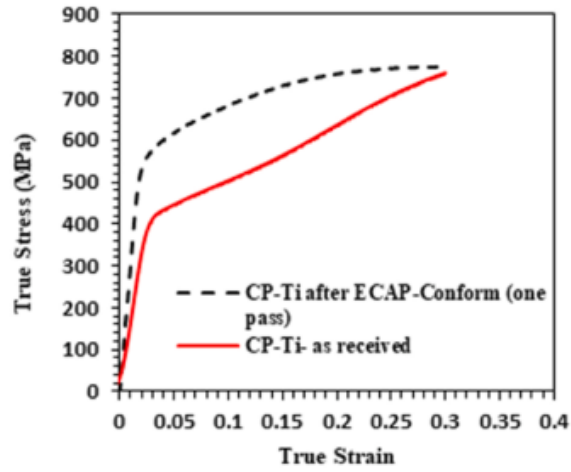
همچنین انحراف استاندارد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. استحکام تسلیم CP-Ti اولیه پس از یک پاس ECAP-Conform از ۳۸۸ مگاپاسکال به ۵۴۰ مگاپاسکال (یعنی حدود ۱۵۲ مگاپاسکال) و متوسط سختی از ۲۰۷ به ۲۷۷ ویکرز افزایش یافته است. بررسی ریزساختار پس از یک پاس فرآیند ECAP-Conform در بزرگنمایی بالا (شکل ۱۲)، نشان می‌دهد که نوارهای برشی خالص ایجاد شده در دانه‌ها در طول فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار برابر باعث کشیده شدن دانه‌ها در جهت خط برشی در تقاطع کانال‌های قالب می‌شود. پس از اولین گذر، کرنش‌های شدید ایجاد شده در نمونه منجر به افزایش چگالی نایجابی در صفحات لغزش می‌شود که معمولاً منجر به تشکیل نوارهای برشی با چگالی بالا از نایجابی‌ها و دوقلوها به موازات ساختار کشیده می‌شود. در فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار برابر فلزات با ساختارهای کریستالی شش ضلعی (مانند تیتانیوم)، مرزهای دانه با زاویه پایین به مرزهای دانه با زاویه بالا تغییر می‌کند که نقش مهمی در بهبود استحکام و چقرمگی شکست دارد.

نصرتی و همکاران (۱۲) با مطالعه کاربرد فرآیند ECAP-Conform جهت تولید تیتانیوم تقویت شده برای تولید کاشتنی‌های دندانی پرداخته و برای این منظور، تیتانیوم خالص تجاری (CP-Ti) درجه ۲ را در دمای ۲۴۰ تحت فرآیند ECAP-Conform با قالب مقطع مربعی قرار داده و موفق شدند خواص مکانیکی CP-Ti درجه ۲ پس از یک بار عبور بهبود بخشند، به طوری که هم استحکام و هم سختی ۳۵٪ افزایش یافته است. خواص عملکردی کاشتنی‌های دندانی تولید شده از تیتانیوم تقویت شده و CP-Ti دریافتی مورد مقایسه قرار گرفت که میانگین دانه پس از یک گذر از فرآیند ECAP-Conform کاهش ۶ میکرومتری را نشان داده است. این متغیر از ۸.۳۵ میکرومتر به ۲.۳۵ میکرومتر یعنی حدود ۷۲٪ کاهش یافت. همچنین، استحکام و جذب انرژی کاشتنی‌های دندانی CP-Ti ساخته شده پس از یک بار عبور ECAP-Conform به ترتیب ۵۳ و ۱۳۹ درصد افزایش یافت.

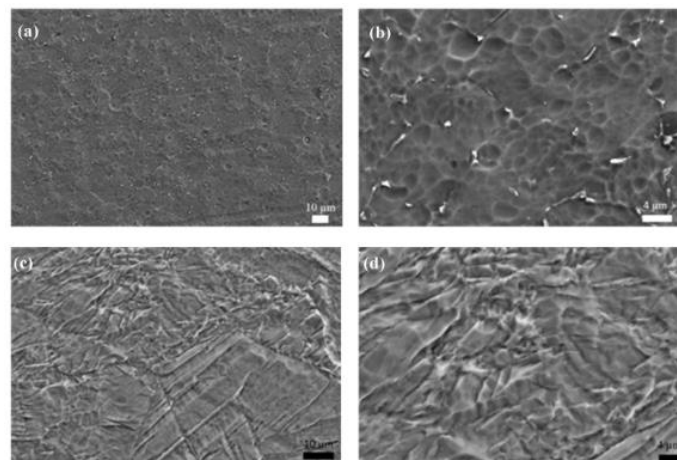
برای بررسی خواص مکانیکی CP-Ti درجه ۲ پس از یک بار عبور از فرآیند ECAP-Conform، آزمایش‌های فشرده‌سازی مطابق با استاندارد ASTM E9 و آزمون میکروسختی ویکرز برای هر دو مرحله قبل و بعد از فرایند انجام شد. منحنی‌های تنش-کرنش واقعی و مقدار متوسط سختی و



شکل ۱۰ - شماتیک و نمونه‌های تولیدی (۱۲)



شکل ۱۱ - خواص مکانیکی نمونه تولیدی قبل و بعد از فرایند (۱۲)



شکل ۱۲ - تصاویر SEM از ساختار نمونه‌های تولیدی (a و b) نمونه اولیه، (c و d) بعد از فرایند (۱۲)

به ۶۷۱ مگاپاسکال و مقاومت کششی نهایی از ۵۴۹ به ۷۳۰ مگاپاسکال افزایش یافت. با این حال، توانایی کرنش شدن مواد به دلیل پردازش بسیار کاهش یافت. در نتیجه، این ماده در شکل‌پذیری از ۳۱.۹٪ کشیدگی تا شکست در فرم پردازش نشده تا ۲۱.۱٪ در فرم ریزدانه دچار افت می‌شود. در نهایت، مورفولوژی شکست نمونه‌های قبل و بعد از فرایند، ویژگی‌های شکست شکل‌پذیر را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

۳- اتصال نورد تجمعی

روش اتصال نورد تجمعی برای اصلاح خواص مکانیکی بسیاری از فلزات و کامپوزیت‌های مبتنی بر فلز استفاده شده است (۳۳-۳۵). فرآیند اتصال نورد تجمعی به توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده و کاهش تخلخل منجر می‌شود. ذرات تقویت‌کننده باعث ایجاد ساختاری با پردازش بهتر در طول فرایند می‌شوند. همچنین با فرآیند اتصال نورد تجمعی می‌توان یک کامپوزیت لایه‌ای بین فلزات مختلف ایجاد کرد. ایجاد کامپوزیت با ذرات تقویت‌کننده یا با فلزات با استحکام بالاتر، مقاومت در برابر سایش را بهبود می‌بخشد (۳۶-۳۷). شماتیک فرایند اتصال نورد تجمعی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. غفاری و همکاران (۳۹) با برش یک صفحه تیتانیوم با خلوص ۹۹.۹ درصد وزنی و ضخامت ۸ میلی‌متر سه مرحله فرایند اتصال نورد تجمعی را بر روی قطعات اعمال کردند. پس از هر چرخه، نوارها بلافاصله در آب فرو می‌روند تا از رشد نامطلوب دانه جلوگیری شود. کل سوبه‌های معادل پس از چرخه اول، دوم و سوم به ترتیب ۳/۲، ۴ و ۴/۸ برآورد شد. نویسندگان با ارائه نتایج بررسی‌های میکروسکوپی نوری تکامل ریزساختار در نمونه‌های HP-Ti در طول نورد سرد و نورد تجمعی نشان دادند به وضوح می‌توان دید که ریزساختار نمونه آنیل شده از دانه‌های هم محور با اندازه متوسط حدود ۲۵ میکرومتر تشکیل شده است. پس از نورد سرد تا ۷۰٪ کاهش ضخامت، دانه‌های هم محور به طور کامل با دانه‌های کشیده شده در جهت نورد جایگزین می‌شوند. انتظار می‌رود، نورد به سمت کاهش‌های بالاتر باعث ساختار دانه-های لایه‌ای کشیده‌تر با ضخامت دانه‌های کوچکتر شده است. نتایج به دست‌آمده از آزمایش کشش نمونه‌های آنیل شده، نورد سرد، و نمونه‌های پردازش شده نورد تجمعی حاکی از آنست که کرنش سرد به طور چشم‌گیری سطح استحکام کششی HP-Ti را افزایش داده در حالی که باعث کاهش قابل توجه مقادیر کرنش شکست شده است. حدود نیمی از نمونه آنیل شده طبق نمودارها، نمونه آنیل شده با کرنش شکست بالای ۵۰٪ بسیار انعطاف‌پذیر است و به ترتیب استحکام تسلیم و کششی حدود ۱۰۰ و ۱۷۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. نورد سرد با کاهش ۷۰ درصدی ضخامت، استحکام کششی را به بالاترین سطح ۷۶۵ مگاپاسکال افزایش داد در حالی که شکل‌پذیری کششی را تا حدود ۳۰٪ کاهش داد. پردازش نورد تجمعی نوارهای نورد سرد برای یک و سه چرخه اندکی سطوح مقاومت کششی را به ترتیب به حدود ۶۹۰ و ۶۶۵ مگاپاسکال کاهش داد. این در حالی است که

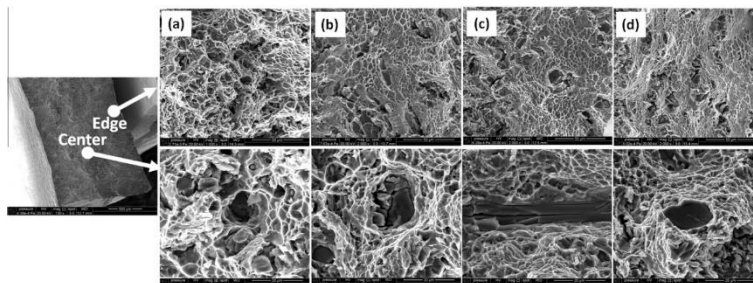
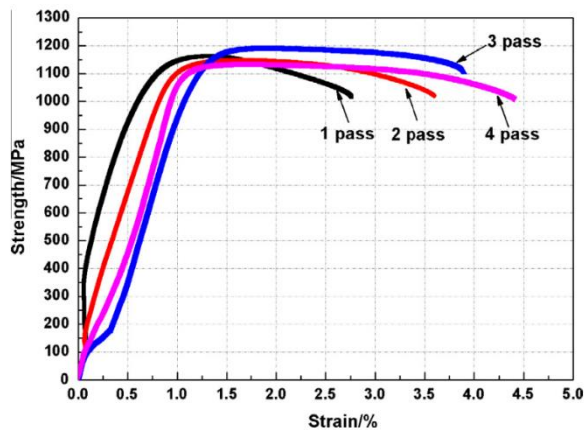
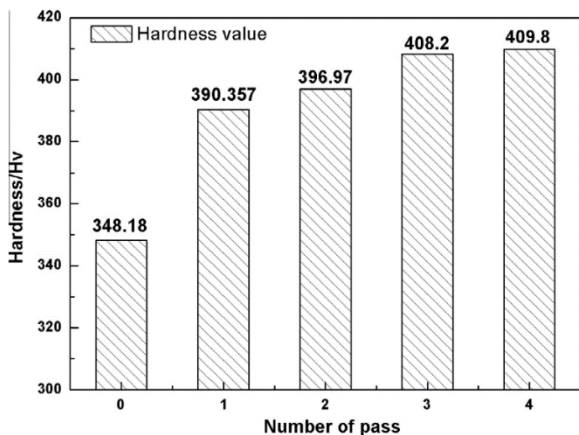
یوانفی و همکاران (۳۱) در مطالعه‌ای، با ریزدانه کردن موفق کامپوزیت زمینه تیتانیوم از طریق روش پرس در کانال زاویه‌دار برابر در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر تعداد پاس فرایند بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی پس از هر عبور را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اندازه تقویت‌کننده‌ها و دانه‌ها هر دو به طور کامل در مقیاس کوچک‌تر دچار تغییر شده‌اند، استحکام کششی با افزایش تعداد پاس‌ها افزایش و پس از چهار پاس کانال زاویه‌دار برابر، در استحکام تسلیم ۱۲۰۰ مگاپاسکال اشیاع شد. همچنین ریزسختی نیز با استفاده از این فناوری به طور قابل توجهی بهبود یافت. شکل‌پذیری کامپوزیت نیز پس از چهار پاس کمی بیشتر از اولین پاس بوده است. نتایج خواص مکانیکی و شکست‌نگاری از نمونه‌های ۱ الی ۴ پاس در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

افتخاری و همکاران (۱) با استناد به مطالعات گذشته در رابطه با پارامترهای قالب کانال زاویه دار برابر تیتانیوم خالص گرید ۲ دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را برای انجام پژوهش خود انتخاب نموده‌اند، زیرا از سویی در پایین‌تر از این دما خطر افزایش نیرو و متعاقباً کماتش سمبه و یا احتمال ترک خوردن قطعه وجود داشت و در دماهای بالاتر از آن هم وقوع درشت دانگی و افت استحکام محتمل بود. در این پژوهش برای کاهش اصطکاک بین قطعه و دیواره قالب از روانکار مولیبدن دی سولفید استفاده شده است. نویسندگان این پژوهش با ارائه شکل ۱۴ که نتایج آزمون کشش، قبل و بعد از انجام فرایند کانال زاویه دار برابر است عنوان کرده‌اند که در اندازه دانه‌های کوچکتر از ۲۰ نانومتر، پیش‌بینی‌های پیچ‌دیگر صادق نبوده و استحکام با ریزتر شدن دانه‌ها کاهش می‌یابد (۱).

قرانی و همکاران (۳۲) با بیان اینکه تغییر شکل شدید پلاستیک یک روش موثر برای تولید ساختارهای دانه‌بندی فوق ریز در فلزات است. این مواد را که با اندازه متوسط دانه > ۱ میکرومتر و عمدتاً با مرزهای دانه با زاویه بالا مشخص می‌شوند را پیشرفت‌های استثنایی در استحکام، رفتار فوق پلاستیک و در برخی موارد افزایش زیست‌سازگاری معرفی می‌کنند. آنان همچنین در پژوهشی جزئیات پردازش تیتانیوم خالص را با استفاده از فرآیند I-ECAP، با هدف بهبود ویژگی‌های استحکام آن تا چهار پاس در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از قالب I-ECAP با زاویه کانال ۹۰ درجه با موفقیت انجام دادند. روش پراش پراکندگی برگشتی الکترونی برای توصیف ریزساختار پس از اولین و چهارمین گذر فرآیند استفاده شد. تجزیه و تحلیل نمونه گذر اول ساختار ناهمگن با مخلوطی از دانه‌های هم محور کشیده و تصفیه شده را نشان داد. علاوه بر این، وجود {۱۰۱۲} دوقلو کششی در ریزساختار نیز مشاهده شد. پالایش قابل توجهی پس از پاس چهارم به دست آمد و ساختار فوق ریزدانه با موفقیت به دست آمد. آزمایش‌های کششی که در دمای اتاق بر روی مواد در قبل و بعد از انجام فرایند صورت پذیرفته است، بهبود استحکام را نشان می‌دهد. استحکام تسلیم مواد فرآوری شده از ۳۰۸

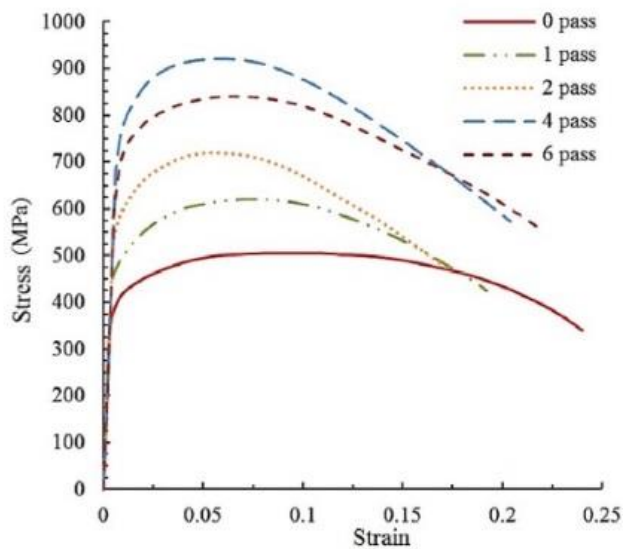
مشابهی را نشان داد، که نشان می‌دهد انتشار ترک خستگی به جهت ورق بستگی ندارد. با این حال، دانه‌های بسیار ریز و کشیده و بافت کریستالوگرافی مطمئناً بر انتشار ترک خستگی تأثیر می‌گذارد. نمونه ۶ چرخه شامل دانه‌های بسیار ریز و کشیده با نسبت ابعاد ۲ و دانه‌های فوق ریز هم محور است. میانگین ضخامت، عرض و طول دانه‌های کشیده به ترتیب ۱۳۱، ۱۱۸ و ۲۶۸ نانومتر بود. میانگین قطر دانه‌های هم محور ۹۵ نانومتر بود. بافت کریستالوگرافی با افزایش چرخه نورد تجمعی افزایش یافت. در نمونه ۶ چرخه، محور C از جهت عادی خود به سمت جهت عرضی (TD) ورق‌ها شکافت و ۲۴ متمایل شد. تشکیل بافت کریستالوگرافی منجر به خستگی و خواص کششی وابسته به جهت ورق شد. وابستگی عمر شروع ترک خستگی به جهت ورق را می‌توان با سهولت لغزش منشوری توضیح داد (۴۱). از سوی دیگر، انتشار ترک خستگی ظاهراً به جهت ورق بستگی ندارد زیرا اثرات دانه‌های کشیده و بافت کریستالوگرافی بر انتشار ترک خستگی متقابلاً لغو می‌شود.

مقادیر کرنش شکستگی به ترتیب به ۲۸ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر کیتاهارا^۱ و همکاران (۴۰) خواص خستگی در تیتانیوم خالص ساخته شده توسط اتصال نورد تجمعی مورد بررسی قرار دادند. حد خستگی به طور قابل توجهی بعد از اتصال نورد تجمعی افزایش می‌یابد. بعد از بررسی وابستگی مورفولوژی دانه و بافت کریستالوگرافی به خواص خستگی در ورقه‌های تیتانیوم خالص پردازش شده با ۶ سیکل اتصال نورد تجمعی مشخص شد که نمونه‌های ۶ چرخه از دانه‌های ریز هم محور و کشیده به موازات جهت نورد تشکیل شده و دارای بافت پایه‌ای با یک محور C مایل به ۲۴ درجه از جهت نرمال به سمت جهت عرضی ورقه می‌باشند. تست دامنه تنش ثابت و تست رشد ترک ناشی از خستگی به منظور ارزیابی خواص خستگی نمونه‌های ۶ چرخه در فرکانس ۱۰ هرتز در دمای اتاق انجام گرفت. بافت کریستالوگرافی به شدت عمر شروع ترک ناشی از خستگی را تحت تأثیر قرار داد و در مقابل، رفتار رشد ترک ناشی از خستگی به دلیل اثرات متقابل مورفولوژی دانه و بافت کریستالوگرافی به جهت ورق بستگی ندارد. شکل ۱۷ سطوح شکستگی نمونه‌های ۰ و ۶ چرخه را پس از آزمایش CT نشان می‌دهد. سطح شکست نمونه ۶ سیکلی بسیار متفاوت از نمونه سیکل صفر است. مقایسه سطوح شکست برای بارگذاری RD و TD مورفولوژی

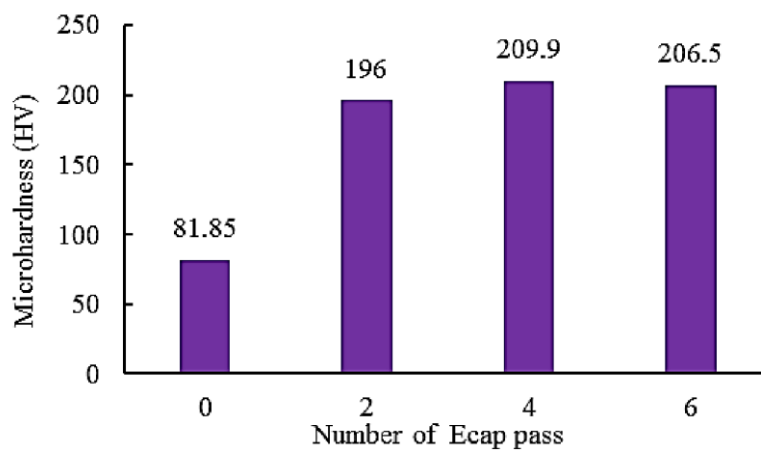


شکل ۱۳ - نتایج مکانیکی و شکست نگاری نمونه‌های (a) یک (b) دو (c) سه و (d) چهار پاس (۳۱)

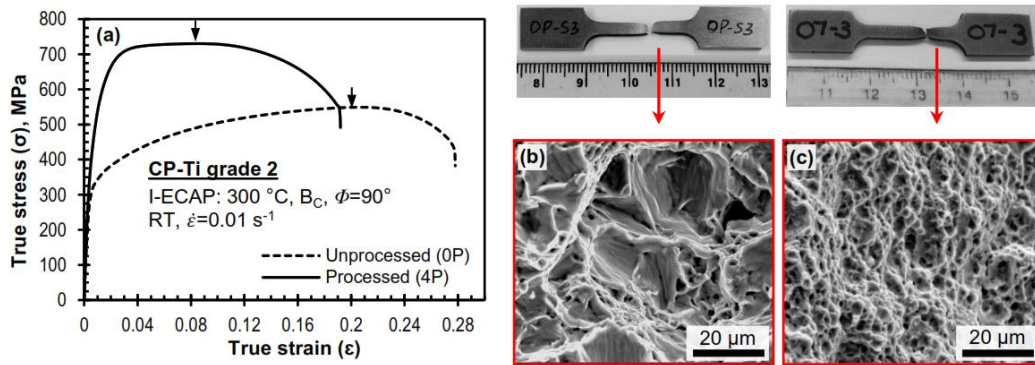
1- Kitahara



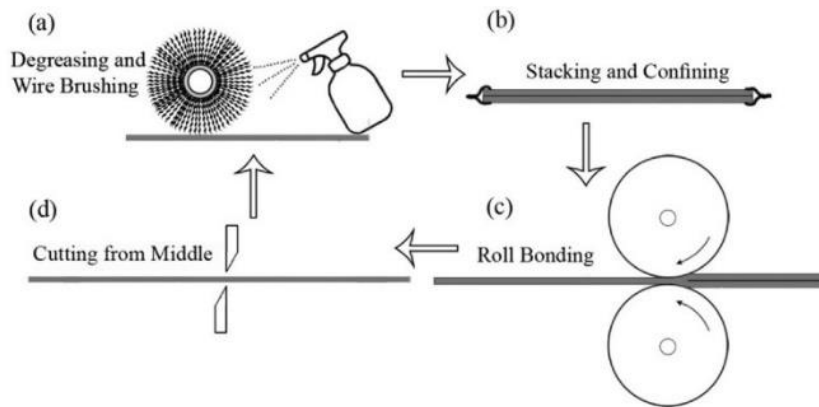
| نام نمونه | تنش تسلیم (MPa) | تنش نهایی (MPa) | درصد ازدیاد طول (%) |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 0 پاس ایکپ (حالت اولیه) | 341 | 505 | 24 |
| 1 پاس ایکپ | 440 | 620 | 19.2 |
| 2 پاس ایکپ | 528 | 719 | 17.3 |
| 4 پاس ایکپ | 682 | 921 | 20.4 |
| 6 پاس ایکپ | 605 | 840 | 22 |



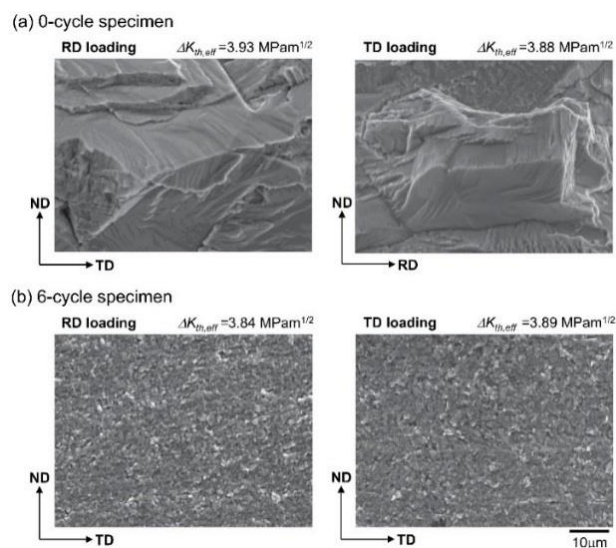
شکل ۱۴ - نتایج خواص مکانیکی نمونه‌های تیتانیوم خالص قبل و بعد از انجام فرایند پرس در کانال زاویه دار برابر (۱)



شکل ۱۵ - (a) منحنی های تنش-کرنش واقعی به دست آمده از آزمایش کشش، مورفولوژی شکست (b) نمونه بدون تغییر شکل (P۰) و (c) نمونه تغییر شکل داده شده (P۴) (۳۲)



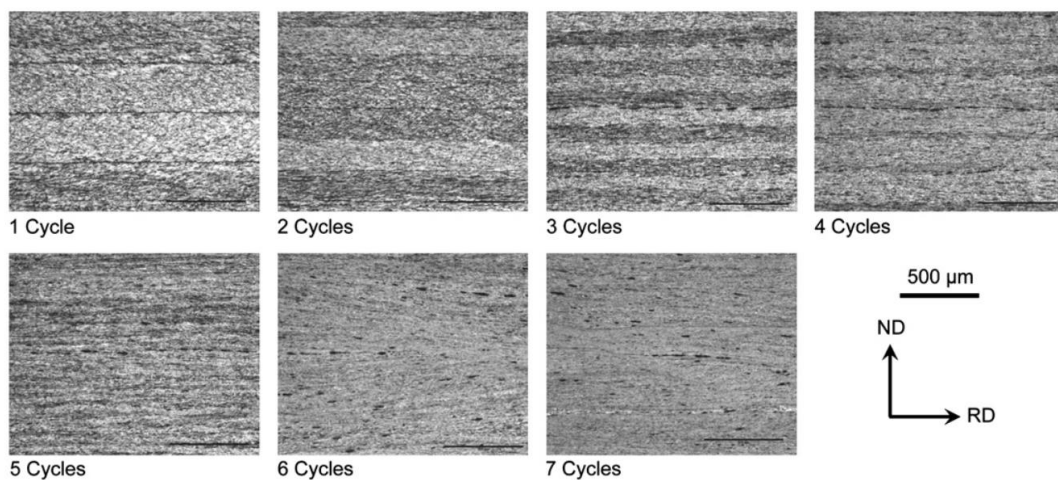
شکل ۱۶ - شماتیک فرایند اتصال نورد تجمعی (۳۸)



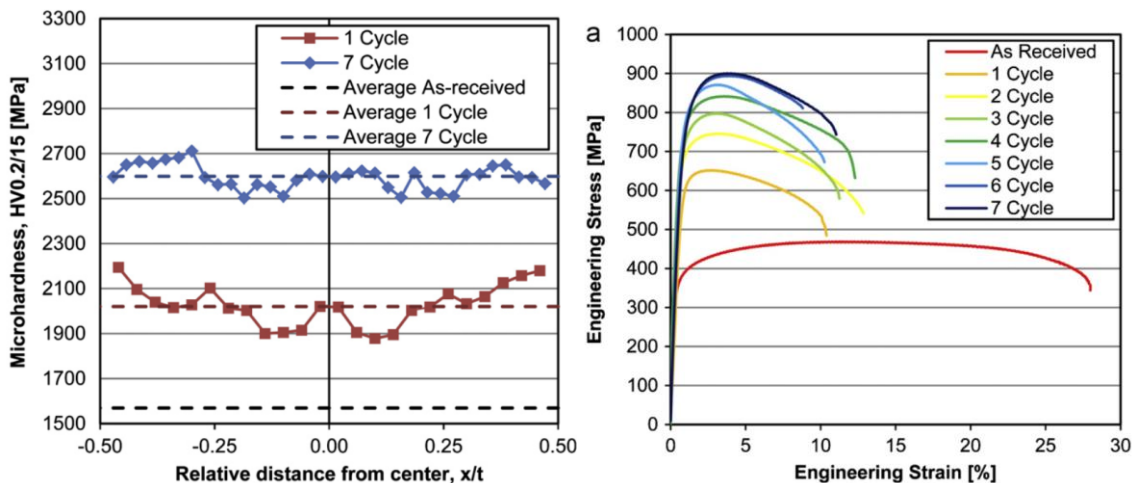
شکل ۱۷ - تصاویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه‌های خستگی قبل و بعد از انجام ۶ پاس فرایند (۴۰)

اندازه دانه از رابطه هال پیچ پیروی کرده است. خواص ماده و تقویت دانه مشاهده شده در این پژوهش، نزدیک به مواردی است که در مقالات دیگر برای ماده و روش مشابه شرایط دمایی اتاق را در نظر گرفته بودند. این نشان می‌دهد که این فرایند به صورت گرم می‌تواند به اندازه دمایی سرد آن موثر باشد، در حالی که چندین مزیت را برای استفاده صنعتی نیز ارائه می‌دهد. میکروگراف‌های نوری مقاطع طولی و نتایج آزمون‌های کشش و سختی نمونه‌های تیتانیومی قبل و بعد از انجام فرایند اتصال نورد تجمعی به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. جدول ۱ نیز به عنوان نتیجه‌گیری نهایی مقایسه بین خواص مکانیکی نمونه‌های تیتانیومی با روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید آورده شده است.

میلنر^۱ و همکاران (۴۲) در مطالعه‌ای برای پردازش تیتانیوم خالص از روش اتصال نورد تجمعی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کرده و نمونه‌های ورق را با هفت چرخه متوالی، با کرنشی معادل ۵/۶ ریزدانه نمودند. خصوصیات مکانیکی و بررسی ریزساختاری بر روی مواد پردازش شده برای ردیابی تغییرات و روابط آن‌ها با یکدیگر انجام شد. میکروسکوپ الکترونی، پالایش چشمگیر و ساختاری فوق ریزدانه حتی پس از یک چرخه گرم را در ماده نشان داد. همچنین مشخص شد که چرخه بیشتر به تدریج دانه‌های بسیار کشیده را تکه تکه کرده و در نهایت ساختار دانه‌های بسیار ریز عمدتاً هم محور با اندازه دانه متوسط ۱۰۰ نانومتر تولید می‌کند. استحکام کششی و ریزسختی مواد با تعداد چرخه‌های نورد افزایش یافت. رابطه استحکام و



شکل ۱۸ - میکروگراف‌های نوری مقاطع طولی تیتانیوم خالص پردازش شده توسط ۱ تا ۷ سیکل (۴۲)



شکل ۱۹ - نتایج آزمون‌های کشش و سختی نمونه‌های تیتانیومی قبل و بعد از انجام فرایند اتصال نورد تجمعی (۴۲)

1- Milner

جدول ۱ - مقایسه بین نتایج به دست آمده روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید تیتانیوم

| مرجع | ماده اولیه | فرایند | استحکام کششی (مگاپاسکال) | | سختی (ویکرز) | |
|-----------|---------------------|--------|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| | | | مقدار اولیه | بهترین نتیجه بعد از فرایند | مقدار اولیه | بهترین نتیجه بعد از فرایند |
| 2017 (۱) | Ti | Ecap | ۵۰۵ | ۸۴۰ | ۸۱/۸۵ | ۲۰۹/۹ |
| 2021 (۴) | Ti | SSE | ۶۳۴/۹ | ۹۳۱/۲ | ۲۰۰ | ۴۱۱ |
| 2015 (۲۲) | (TiB + TiC)/Ti6Al4V | Ecap | - | ۱۲۰۰ | ۳۴۸/۱۸ | ۴۰۹/۸ |
| 2017 (۲۳) | CP-Ti | Ecap | ۵۴۹ | ۷۳۰ | - | - |
| 2023 (۱۲) | CP-Ti | Ecap | ۳۸۸ | ۵۴۴ | ۲۰۷ | ۲۷۷ |
| 2017 (۴۳) | Gr.2 | Ecap | ۵۱۳ | ۶۹۴ | - | - |
| 2016 (۳۰) | Ti | ARB | ۳۷۸ | ۸۹۲ | - | - |
| 2013 (۳۱) | Ti | ARB | ۴۸۰ | ۹۰۰ | ۱۵۵۰ مگاپاسکال | ۲۷۰۰ مگاپاسکال |

۳- برخی از کارها نشان دهنده آن است که می‌توان فلز تیتانیوم خالص را در دمای اتاق نیز در قالب‌های مربوط به روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید پردازش نمود.

۴- تعداد دفعات استفاده از سه روش فوق، در رابطه با فلز تیتانیوم و آلیاژهای آن، به ترتیب از بیشترین به کمترین، شامل روش‌های کانال زاویه‌دار برابر، اتصال نورد تجمعی و اکستروژن برشی ساده می‌شود.

۵- نقطه ضعفی که در اکثر پژوهش‌های انجام گرفته بر روی تیتانیوم پردازش شده توسط روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید مشهود است، عدم بررسی خواص زیست‌سازگاری تیتانیوم همزمان با خواص مکانیکی آن بعد از فرایند است.

۶- تقریباً می‌توان گفت در هیچ یک از پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، هیچ خروجی صنعتی مشخصی معرفی نشده و صرفاً در حد یک کار تحقیقاتی باقی مانده است.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام تحقیقات: سیدمحمدرضا سده‌ئی؛
تحلیل داده‌ها و نتایج: محمدرضا مرکی؛
نگارش نهایی: علی جلالی، هادی ایزدی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

علاوه بر روش‌های گزارش شده در این پژوهش، روش‌های دیگری نیز بصورت محدودتر برای تغییر شکل پلاستیک شدید تیتانیوم استفاده شده (۴۴،۴۵) و با توجه به علاقه علمی و جذابیت مواد نانوساختار، بیش از ۵۹ تکنیک مشتق شده نیز شناسایی شده است (۴۶). در میان این روش‌ها، پیچش فشار بالا با سرعت بالا یک روش اصلی است (۴۷) که برای پوشش مواد و اشکالی طراحی شده است که در HPT سنتی به سختی می‌توان به آنها نزدیک شد.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت فلز تیتانیوم در صنایع مهم و حساس امروزی، نیاز است تمامی مسیرها برای ارتقاء خواص مختلف این فلز و آلیاژهای آن به کار گرفته شود که در این راستا و در سال‌های اخیر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان روش‌هایی جذاب در این زمینه معرفی و به طور مفصل کار شده است. در این پژوهش با بررسی و مرور جدیدترین تحقیقات صورت گرفته در رابطه با مزایا و معایب سه روش اکستروژن برشی ساده، اتصال نورد تجمعی و فشار در کانال زاویه‌ای برابر، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- تمامی پژوهش‌های گذشته حاکی از آن است که سه روش اکستروژن برشی ساده، اتصال نورد تجمعی و فشار در کانال زاویه‌ای برابر بر روی خواص مکانیکی فلز تیتانیوم تاثیر مثبت و قابل توجه می‌گذارند. این تاثیرات مثبت، تا تعداد پاسی معین شتاب بیشتری را ثبت نموده و بعد از آن نمایشی اشباع گونه از خود بروز می‌دهند.

۲- دما، سرعت و روانکاری مناسب، ۳ فاکتور اساسی و مهم در رابطه با تغییر شکل پلاستیک شدید فلز تیتانیوم است.

References

1. Maghsoudloo, H., Gerdooei, M., & Ghaderi, S. H. (2019). Improving Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Titanium Produced through Warm ECAP Using a Novel Lubrication System. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(5), 1047-1056.
2. Eftekhari M, Faraji G, Shapoorgan O, Baniassadi M. Experimental investigation of the effect of temperature in extrusion process of ECAPed nanostructured Titanium. *Modares Mechanical Engineering*. 2017 Jun 10;17(4):52-60.
3. R.Z. Valiev, I.P. Semenova, V.V. Latysh, H. Rack, T.C. Lowe, J. Petruzelka, L. Dluhos, D. Hrusak, J. Sochová, Nanostructured titanium for biomedical applications, *Advanced engineering materials*, 10(8) (2008).
4. Y. Okazaki, E. Gotoh, Comparison of metal release from various metallic biomaterials in vitro, *Biomaterials*, 26(1) (2005) 11-21.
5. Y. Li, C. Wong, J. Xiong, P. Hodgson, C. Wen, Cytotoxicity of titanium and titanium alloying elements, *Journal of dental research*, 89(5) (2010) 493-497.
6. Balasubramanian, R., Nagumothu, R., Parfenov, E., Valiev, R., 2021. Development of nanostructured titanium implants for biomedical implants – a short review. *Mater. Today Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.064>.
7. Polyakov, A.V., Dluhoš, L., Dyakonov, G.S., Raab, G.I., Valiev, R.Z., 2015. Recent advances in processing and application of nanostructured titanium for dental implants. *Adv. Eng. Mater.* 17, 1869–1875. <https://doi.org/10.1002/adem.201500212>.
8. Aktas, S., Kisioglu, Y., 2022. Improving the fatigue life of produced dental implants by the thread-rolling process. *Mater. Test.* 64, 1012–1025. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2159>.
9. Sedehi SM, Khosravi M, Yaghoubinezhad Y. Mechanical properties and microstructures of reduced graphene oxide reinforced titanium matrix composites produced by spark plasma sintering and simple shear extrusion. *Ceramics International*. 2021 Dec 1;47(23):33180-90.
10. Ansarian, I., Shaeri, M.H., Ebrahimi, M., Min'arik, P., Bartha, K., 2019. Microstructure evolution and mechanical behaviour of severely deformed pure titanium through multi directional forging. *J. Alloys Compd.* 776, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.196>.
11. Attarilar, S., Djavanroodi, F., Irfan, O.M., Al-Mufadi, F.A., Ebrahimi, M., Wang, Q.D., 2020. Strain uniformity footprint on mechanical performance and erosion-corrosion behavior of equal channel angular pressed pure titanium. *Results Phys.* 17, 103141 <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103141>.
12. Nosrati, Hasan Ghaforian, Mahdi Gerdooei, Khalil Khalili, and Majid Mohammadi. "Usability of the ECAP-Conform process for the production of dental implants material." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 147 (2023): 106124.
13. Bodkhe M, Sharma S, Mourad AH, babu Sharma P. A review on SPD processes used to produce ultrafine-grained and multilayer nanostructured tubes. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;46:8602-8.
14. Valder J, Rijesh M, Surendranathan AO. Forming of tubular commercial purity aluminum by ECAP. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012 Sep 1;27(9):986-9.
15. M.I. Babaghayou, A.-H.-I. Mourad, A. Ochoa, Freddys Beltrán, and Nizamudeen Cherupurakal. "Study on the thermal stability

of stabilized and unstabilized low-density polyethylene films.”, *Polym. Bull.* (2020) 1–17.

16. Pardis N, Ebrahimi R. Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique. *Materials Science and Engineering: A.* 2009 Dec 15;527(1-2):355-60.

17. Pardis N, Ebrahimi R. Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique. *Materials Science and Engineering: A.* 2009 Dec 15;527(1-2):355-60.

18. Sheikh H, Ebrahimi R, Bagherpour E. Crystal plasticity finite element modeling of crystallographic textures in simple shear extrusion (SSE) process. *Materials & Design.* 2016 Nov 5;109:289-99.

19. Bagherpour E, Qods F, Ebrahimi R, Miyamoto H. Microstructure evolution of pure copper during a single pass of simple shear extrusion (SSE): role of shear reversal. *Materials Science and Engineering: A.* 2016 Jun 1;666:324-38.

20. Sedehi, S. M. R., Khosravi, M., Yaghoubinezhad, Y., “Experimental investigation of mechanical properties, corrosion and biocompatibility of Ti/RGO composite made by the combined method of spark plasma sintering and simple shear extrusion,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 1, pp. 1921-1926, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.559027.7>
97

21. Semenova IP, Polyakova VV, Dyakonov GS, Polyakov AV. Ultrafine-Grained Titanium-Based Alloys: Structure and Service Properties for Engineering Applications. *Advanced Engineering Materials.* 2020 Jan;22(1):1900651.

22. Jäger A, Gärtnerova V, Tesař K. 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.* 2015 Sep 17;644:114-20.

23. Wu Y, Feng F, Xin H, Li K, Tang Z, Guo Y, Qin D, An B, Diao X, Dou C. Fracture strength and osseointegration of an ultrafine-grained titanium mini dental implant after macromorphology optimization. *ACS Biomaterials Science & Engineering.* 2019 Jun 20;5(8):4122-30.

24. Shaat M. Effects of processing conditions on microstructure and mechanical properties of equal-channel-angular-pressed titanium. *Materials Science and Technology.* 2018 Jul 3;34(10):1149-67.

25. Gu Y, Ma A, Jiang J, Yuan Y, Wu H. Microstructure and tensile anisotropy of pure Ti processed by up-scaled RD-ECAP. *Materials Characterization.* 2020 Oct 1;168:110513.

26. Németh G, Horváth K, Hervoche C, Cejpek P, Palán J, Duchek M, Máthis K. Characterization of the Microstructure, Local Macro-Texture and Residual Stress Field of Commercially Pure Titanium Grade 2 Prepared by CONFORM ECAP. *Metals.* 2018 Nov 29;8(12):1000.

[27] Hoseini M, Pourian MH, Bridier F, Vali H, Szpunar JA, Bocher P. Thermal stability and annealing behaviour of ultrafine grained commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A.* 2012 Jan 15;532:58-63.

28. Hajizadeh K, Alamdari SG, Eghbali B. Stored energy and recrystallization kinetics of ultrafine grained titanium processed by severe plastic deformation. *Physica B: Condensed Matter.* 2013 May 15;417:33-8.

29. Tesař K, Koller M, Vokoun D, Tyc O, Čech J, Sedlák P. Texture, elastic anisotropy and thermal stability of commercially pure titanium

- prepared by room temperature ECAP. *Materials & Design*. 2023 Feb 1;226:111678.
30. Gu Y, Ma A, Jiang J, Li H, Song D, Wu H, Yuan Y. Simultaneously improving mechanical properties and corrosion resistance of pure Ti by continuous ECAP plus short-duration annealing. *Materials Characterization*. 2018 Apr 1;138:38-47.
31. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, PR China (W. Lu).
32. Qarni MJ, Rosochowski A, Boczkal S. Influence of incremental ECAP on the microstructure and tensile behaviour of commercial purity titanium. *Procedia engineering*. 2017 Jan 1;207:1481-6.
33. Jafarian HR, Mahdavian MM, Shams SA, Eivani AR. Microstructure analysis and observation of peculiar mechanical properties of Al/Cu/Zn/Ni multi-layered composite produced by Accumulative-Roll-Bonding (ARB). *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Feb 23;805:140556.
34. Wei Z, Zheng H, Wu R, Zhang J, Wu H, Jin S, Jiao Y, Hou L. Interface behavior and tensile properties of Mg-14Li-3Al-2Gd sheets prepared by four-layer accumulative roll bonding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 Jan 1;61:254-60.
35. Ye N, Ren X, Liang J. Microstructure and mechanical properties of Ni/Ti/Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) at room temperature. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020 May 1;9(3):5524-32.
36. Gholami MD, Salamat M, Hashemi R. Study of mechanical properties and wear resistance of Al 1050/Brass (70/30)/Al 1050 composite sheets fabricated by the accumulative roll bonding process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021 Nov 1;71:407-16.
37. Roghani H, Borhani E, Jafarian HR. Effect of a trace amount addition of CuO on aluminum sheet processed by accumulative roll bonding with the common roots and rapid annealing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Nov 1;15:4257-71.
38. Roghani H, Borhani E, Shams SA, Lee CS, Jafarian HR. Effect of concurrent accumulative roll bonding (ARB) process and various heat treatment on the microstructure, texture and mechanical properties of AA1050 sheets. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022 May 1;18:1295-306.
39. Ghafari-Gousheh S, Nedjad SH, Khalil-Allafi J. Tensile properties and interfacial bonding of multi-layered, high-purity titanium strips fabricated by ARB process. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015 Nov 1;51:147-53.
40. Kitahara H, Matsushita S, Tsushida M, Ando S, Tsuji N. Fatigue properties of ARB-processed Ti sheets with crystallographic texture. *International Journal of Fatigue*. 2016 Nov 1;92:18-24.
۴۱. فلاحتی عقدا، صفا، and حاجی صفری. "بررسی فرآیند PEO بر رفتار خستگی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V". فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین ۸، 141-152 (2018): no. 31.
42. Milner JL, Abu-Farha F, Bunget C, Kurfess T, Hammond VH. Grain refinement and mechanical properties of CP-Ti processed by warm accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 20;561:109-17.
43. Maghsoudloo, H., Gerdooei, M., Ghaderi, S.H., 2017. Investigation of Mechanical Properties of a Titanium Implant Processed by

Equal Channel Angular Pressing. Shahrood University of Technology.

44. Lin, H.K.; Li, G.Y.; Mortier, S.; Bazarnik, P.; Huang, Y.; Lewandowska, M.; Langdon, T.G. Processing of CP-Ti by high-pressure torsion and the effect of surface modification using a post-HPT laser treatment. *J. Alloys Compd.* 2019, 784, 653–659. [CrossRef]

45. Edalati, K.; Horita, Z. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Mater. Sci. Eng. A* 2016, 652, 325–352. [CrossRef]

46. Bagherpour, E.; Pardis, N.; Reihanian, M.; Ebrahimi, R. An overview on severe plastic deformation: Research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 100, 1647–1694. [CrossRef]

47. Gurau, G.; Bujoreanu, L.; Potecasu, O.; Cananau, N.; Alexandru, P.; Gurau, C.; Tanase, D. Process and Machine for Deforming Taper-Shaped Active Elements Made of Shape-Memory Materials by Twisting upon High Pressure. Patent RO129900, 30 December 2016.