



Effect of Grain Size Reduction through Multi Directional Forging Process on Corrosion and Wear Properties of Commercially Pure Titanium

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ansarian I.¹ MSc,
Shaeri M.H.*¹ PhD

How to cite this article

Ansarian I, Shaeri M.H. Effect of Grain Size Reduction through Multi Directional Forging Process on Corrosion and Wear Properties of Commercially Pure Titanium. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):623-636.

ABSTRACT

Commercial pure (CP) titanium has many applications in biomaterials especially in implants due to its excellent biocompatibility. Despite the importance of surface properties in bio-applications, limited research has been conducted to improve surface properties of CP titanium by improving the structure. Therefore, the purpose of this research is to improve the corrosion and wear properties of CP titanium by reducing grain size by multi-directional forging (MDF) process. For this purpose, annealed CP titanium samples were forged by MDF up to six passes at ambient temperature and 220°C. To investigate the corrosion properties of specimens, the tafel polarization test was performed in a simulated body fluid (SBF) solution. The tribological properties were also investigated by pins-on-disk test at sliding speed and applied stress of 0.2 (m/s) and 1MPa, respectively. The results of microstructure analysis of the samples using a scanning electron microscope (SEM) equipped with EBSD showed that the ultrafine grain structure was formed in titanium CP, after 6 passes of the MDF. The results of the investigation of the tafel polarization test showed that the corrosion resistance of the samples increased with applying MDF and increasing the pass number, regardless of the processing temperature. Also, the corrosion resistance of MDFed samples at 220°C temperature was higher than the MDFed samples at ambient temperature. Wear resistance of CP titanium was also increased, by decreasing the grain size. The results of the investigation of surface morphology of samples using a field-emission scanning electron microscope showed mainly the abrasive and delamination wear mechanisms.

Keywords Commercial Pure Titanium; MDF Process; Grain Size; Corrosion; Wear

CITATION LINKS

[1] Utilization of multi directional forging for ... [2] Effect of work-piece cross section ... [3] Experimental investigation of the effect ... [4] The investigation of springback of UFG commercially ... [5] Effect of equal channel angular extrusion on ... [6] Tribology testing of ultrafine-grained Ti processed ... [7] Microstructure evolution of commercial ... [8] Strengthening mechanisms of nano-grained ... [9] Titanium [10] Microstructure evolution and mechanical behaviour ... [11] Static mechanical properties and ductility ... [12] Corrosion of ultrafine grained materials ... [13] Ultrafine grained titanium sheets with ... [14] Corrosion of nanostructured and ultrafine ... [15] Corrosion resistance of nanostructured ... [16] Comparative effect of grain size and texture ... [17] Annealing effects on the corrosion ... [18] Enhanced in vitro biocompatibility of ... [19] Corrosion and in vitro biocompatibility ... [20] Mechanical and wear properties of ... [21] Effect of grain size on the micro-tribological ... [22] Dry-sliding tribological properties of ultrafine ... [23] Microstructures and tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr ... [24] Severe plastic deformation of copper using multiple compression ... [25] The influences of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) processes on microstructure, shear strength and microhardness of AM60 ... [26] Effect of grain size on corrosion: A ... [27] Corrosion behavior of ultra-fine grained ... [28] Corrosion behaviour of ultra fine grained titanium in ... [29] Corrosion resistance of ultra fine-grained ... [30] Thermal oxidation of CP Ti-An electrochemical ... [31] Tribological, mechanical and electrochemical ... [32] The relation between severe plastic deformation ... [33] Influence of cold working on the pitting corrosion ... [34] Wear properties of brass samples subjected ... [35] Tribology: Friction and wear of engineering ... [36] Color stability and hardness in dental composites after accelerated ... [37] Effect of acidic food and drinks on surface hardness of enamel, dentine, and tooth-coloured ... [38] Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation ... [39] Relative fracture toughness and hardness of new dental ... [40] Fundamental of probability and engineering ...

¹Materials Science Engineering Department, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

*Correspondence

Address: Materials Science Engineering Department, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran
Phone: -
Fax: -
shaeri@eng.ikiu.ac.ir

Article History

Received: November 11, 2018
Accepted: June 9, 2019
ePublished: March 01, 2020

اثر کاهش اندازه دانه به وسیله فرآیند فورج چندگانه بر خواص خوردگی و سایش تیتانیوم خالص تجاری

ایمان انصاریان MSc

گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

محمدحسین شاعری* PhD

گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

تیتانیوم خالص تجاری (CP) به دلیل زیست سازگاری عالی کاربردهای زیادی در بایومواد و ایمپلنت ها دارد. علی رغم اهمیت بالای خواص سطحی در کاربردهای زیستی، تحقیقات بسیار کمی درباره بهبود خواص سطحی تیتانیوم CP از طریق بهبود ساختار انجام شده است. لذا هدف پژوهش حاضر بهبود خواص خوردگی و سایشی تیتانیوم CP از طریق کاهش اندازه دانه به وسیله فرآیند فورج چندگانه (MDF) است. بدین منظور نمونه های تیتانیوم CP آنیل شده تا ۶ پاس تحت فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰°C قرار گرفتند. برای بررسی خواص خوردگی نمونه ها، آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول شبیه سازی شده بدن انسان (SBF) انجام گرفت. خواص تریبولوژی نیز توسط آزمون پین روی دیسک در سرعت لغزشی و تنش اعمالی به ترتیب ۲/۰ (m/s) و ۱۰۰۰ (MPa) بررسی شد. نتایج حاصل از بررسی ریزساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EBSD نشان داد که پس از ۶ پاس فرآیند MDF ساختار فوق ریزدانه در تیتانیوم CP تشکیل شد. نتایج بررسی آزمون پلاریزاسیون تافل نشان داد که در اثر اعمال فرآیند MDF و افزایش پاس های آن صرف نظر از دمای فرآیند، مقاومت به خوردگی نمونه ها افزایش یافت. همچنین نمونه های MDF شده در دمای ۲۲۰°C، مقاومت به خوردگی بیشتری در مقایسه با نمونه های MDF شده در دمای محیط نشان دادند. مقاومت به سایش تیتانیوم CP نیز در اثر کاهش اندازه دانه افزایش یافت. همچنین نتایج حاصل از بررسی مورفولوژی سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی، به طور عمده مکانیزم های سایش خراشان و ورقه ای شدن را نشان داد.

کلیدواژه ها: تیتانیوم خالص تجاری، فرآیند MDF، اندازه دانه، خوردگی، سایش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۹

* نویسنده مسئول: shaeri@eng.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

تیتانیوم و آلیاژهای آن کاربردهای فراوانی در بایوپزشکی به ویژه در ایمپلنت ها دارند [۱-۵]. انتخاب آلیاژهای تیتانیوم در کاربردهای بایوپزشکی، به دلیل ترکیب مناسبی از خواص به ویژه زیست سازگاری، مقاومت به خوردگی، مدول الاستیسیته پایین و استحکام بالا در مقایسه با آلیاژهای معمول مانند فولاد ضد زنگ و آلیاژهای کبالت و کروم است [۵]. از ملاحظات مهم برای یک ماده بایوپزشکی که در بدن انسان استفاده می شود، خوردگی و سایش است. زیرا آزاد شدن فلز به شکل یونی یا پخش شدن به صورت براده، دلیل عمده شکست ها است [۵]. به علاوه در صورت ضعیف بودن مقاومت به سایش فلز زیستی، براده های ساپنده منجر به از بین رفتن ابعاد زیست فلز شده و واکنش های مضر با بافت های انسانی را ایجاد می کند؛ در نتیجه بررسی مقاومت سایشی از اهمیت بالایی برخوردار

است [۶]. پس نتیجه می گیریم که مطالعات سطحی بهره مندی بیشتری در توسعه خواص آلیاژهای تیتانیوم، برای استفاده در ایمپلنت های استخوانی دارد [۵].

از میان آلیاژهای تیتانیوم، تیتانیوم خالص تجاری (CP) با ساختار هگزاگونال فشرده (hcp) و در فاز آلفا، به دلیل زیست سازگاری بالاتر نسبت به بسیاری از آلیاژهای تیتانیوم، گزینه مناسب تری برای استفاده کاربردهای بایوپزشکی است. زیرا آلیاژسازی تیتانیوم نظیر آلیاژ Ti-6Al-4V و بسیاری از آلیاژهای دوفازه یا تک فاز بتا که شامل مقدار قابل توجهی از عناصری سمی مانند Al و V هستند، به دلیل وجود این عناصر از زیست سازگاری کمتری در مقایسه با تیتانیوم CP برخوردار هستند و حضور عناصر آلیاژی مذکور می تواند منجر به بروز عوارض پزشکی نظیر سرطان و آلزایمر شود [۲، ۴، ۷، ۸]. همچنین آلیاژهای آلفا نوع ۷ (Ti-0.2 Pd) و نوع ۱۲ (Ti-0.3 Mo-0.8 Ni) مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به تیتانیوم CP ارائه می دهند؛ اما آلیاژهای کمیاب و پرهزینه ای (به خصوص نوع ۷) هستند [۹]. در نتیجه تیتانیوم CP از نظر اقتصادی و زیست سازگاری گزینه مناسبی برای کاربردهای بایوپزشکی است، اما نقاط ضعف آن پایین تر بودن خواص سطحی نظیر سختی و سایش و پایین تر بودن مقاومت به خوردگی نسبت به آلیاژهای گران قیمت نوع ۷ و نوع ۱۲ است.

هدف این پژوهش افزایش خواص سطحی نظیر سختی، سایش و خوردگی تیتانیوم CP از طریق ایجاد ساختار فوق ریزدانه (UFG) به روش تغییر شکل پلاستیک شدید SPD به وسیله فرآیند فورج چند جهته (MDF) است که علاوه بر افزایش خواص سطحی به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه و فعالیت سطحی بالاتر، منجر به چسبندگی بهتر به نسوج بدن می شود. به علاوه ساختار فوق ریزدانه، خواص مکانیکی تیتانیوم CP را نیز طبق بسیاری از پژوهش های پیشین افزایش می دهد (بهبود خواص مکانیکی در منبع [۱] آورده شده است) و تقریباً با آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V برابری می کند که این نیز برای کاربرد در ایمپلنت ها و مفاصل مصنوعی مفید است [۱، ۲، ۴، ۱۰، ۱۱].

طبق تحقیقات پیشین، SPD، مقاومت به خوردگی را با کاهش اندازه دانه و همگن سازی ترکیبات ناهمگن با استفاده از امتزاج کرنش پلاستیک شدید، بهبود می دهد و خوردگی از حالت موضعی به یکنواخت تبدیل می شود، به عنوان مثال، خوردگی مرز دانه ای به خوردگی عمومی، حفره های بزرگ به کوچک تر یا کم عمق تر تبدیل می شوند [۱۲]. در تحقیقات دیگر توسط کیم و همکاران [۱۳] مشخص شد که ریزدانه سازی با تغییر سینتیک رشد فیلم اکسید پسیو (Passive Oxide Film)، مقاومت به خوردگی را بهبود می دهد. در واقع تیتانیوم فوق ریزدانه شده، مقاومت به خوردگی بالاتری نشان داد.

در تحقیق دیگری که توسط چادھاری [۱۴] انجام شده است نیز کاهش نرخ خوردگی (بهبود مقاومت به خوردگی) به دلیل بهبود سینتیک شکل گیری فیلم اکسید پسیو روی نواحی از ساختار با فعالیت زیاد و همچنین کاهش اختلاف پتانسیل گالوانیک بین

با اثر اندازه دانه بر خواص سایشی تیتانیم CP نیز همانند خوردگی نتایج پراکنده‌ای گزارش شده است.

همان طور که پیش‌تر نیز ذکر شد یکی از روش‌های ساده، کاربردی، تکرارپذیر در هر پاس و قابل کنترل در میزان کرنش برای ایجاد ساختار فوق ریزدانه در فلزات و آلیاژها، تغییر شکل پلاستیک شدید به وسیله فرآیند MDF است [1, 23-25]. علی‌رغم ویژگی‌ها و مزایای تغییر شکل پلاستیک شدید به وسیله فرآیند MDF، تاکنون اثر ریزدانه‌سازی به وسیله اعمال این فرآیند بر خواص سایشی و خوردگی تیتانیم CP تاکنون انجام نشده و تاثیر پارامترهای فرآیند مانند افزایش تعداد پاس‌های آن (کاهش بیشتر اندازه دانه) و همچنین دمای فرآیند MDF، بر خواص سطحی تیتانیم خالص بررسی نشده است. لذا هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر فرآیند MDF و تعداد پاس‌های آن و همچنین دمای فرآیند MDF بر خواص سایشی و خوردگی تیتانیم خالص است. بدین منظور تیتانیم CP در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۶ پاس تحت فرآیند MDF قرار گرفت و اندازه دانه در پاس‌های مختلف اندازه‌گیری شد. سپس خواص خوردگی و سایشی نمونه‌ها در پاس‌ها و دماهای مختلف فرآیند MDF بررسی شد. همچنین به علت اینکه معمولاً سختی و ضریب اصطکاک، پارامترهای تاثیرگذار بر خواص سایشی هستند، این پارامترها نیز برای نمونه‌های مذکور اندازه‌گیری شدند.

۲- آزمون‌های تجربی

تسمه تیتانیم BT1 (گرید ۲) با ترکیب شیمیایی 99.27 Ti-0.372 Al-0.0201 Fe-0.079 Mn-0.043 C-0.029 V (درصد وزنی) که به وسیله اسپکترومتر [GMR 7580] اندازه‌گیری شده، مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۱ تصویر قالب فورج چندگانه مورد استفاده در پژوهش حاضر به همراه سنبه‌ها و نمونه، نشان داده شده است. جنس قالب از فولاد ابزار AISI/SAE H13 انتخاب شده است. همچنین برای اعمال نیروی لازم برای فرآیند MDF از دستگاه پرس هیدرولیک با سرعت حرکت پیستون در حالت بارگذاری برابر با ۱/۶ میلی‌متر بر ثانیه و ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده شد. به منظور کاهش اصطکاک بین نمونه و قالب از روانکار مولی‌کت با ترکیب گریس، گرافیت و مس استفاده شد.



شکل ۱) تصویر قالب MDF و سنبه‌های تهیه‌شده برای پژوهش حاضر (۱- قالب، ۲- سنبه بزرگ، ۳- سنبه کوچک و ۴- نمونه)

مرزدانه‌های فعال انرژی بالا و داخلی دانه‌های نجیب، ذکر شده است؛ زیرا با ایجاد نانوساختار، جدایی فیزیکی بین نانوذرات موضعی آندیک و کاتدی کاهش می‌یابد. بنابراین، اکسیداسیون یکنواخت‌تر شده و نرخ خوردگی کاهش می‌یابد.

در تحقیق انجام‌شده به وسیله گریکر و همکاران [15] با کاهش اندازه دانه تیتانیم خالص به کمتر از ۹۰ نانومتر به وسیله فرآیند اکسترون هیدرواستاتیک، مشاهده کردند که مقاومت به خوردگی تیتانیم خالص نانوساختار نسبت به تیتانیم خالص درشت‌دانه مقداری اُفت کرده است.

حسینی و همکاران [16] با اعمال ۸ پاس فرآیند پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) بر تیتانیم CP نشان دادند که از ویژگی‌های ریزساختاری، بافت فاکتور غالب‌تری در مقایسه با اندازه دانه در کنترل خواص خوردگی تیتانیم CP است؛ یعنی بدون توجه به تغییر اندازه دانه، نمونه ۲ پاس ECAP شده مقاومت به خوردگی بیشتری در مقایسه با نمونه ۸ پاس ECAP شده که اندازه دانه ریزتری داشته، نشان داده است؛ زیرا در نمونه ۲ پاس، پیک تصویر قطبی معکوس (IPF) به سمت صفحات پایه ساختار hcp که مقاومت به خوردگی بالایی دارند، جهت‌گیری کرده است.

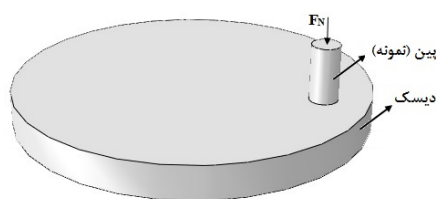
در مجموع نتایج پراکنده‌ای در مورد خواص خوردگی تیتانیم CP فوق ریزدانه‌شده گزارش شده است، اما همان طور که پیش‌تر ذکر شد نتایج زیادی نیز افزایش مقاومت به خوردگی را با ایجاد ساختار فوق ریزدانه در تیتانیم CP ذکر کرده‌اند که دلیل مهم اکثر تحقیقات، شکل‌گیری لایه اکسید غیرفعال ضخیم‌تر در تیتانیم UFG نسبت به تیتانیم درشت‌دانه ذکر شده است [14, 17-19].

همچنین همان طور که پیش‌تر ذکر شد، علی‌رغم اهمیت بالای مقاومت به سایش تیتانیم CP در کاربردهای زیستی، تحقیقات خیلی کمتری بر خواص سایشی تیتانیم CP فوق ریزدانه انجام شده است. طبق تحقیقات پورسک و همکاران [20] با کاهش اندازه دانه تیتانیم CP تا ۳۰۰ نانومتر از طریق فرآیند ECAP در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، علی‌رغم بهبود خواص مکانیکی، بهبود قابل توجهی در مقاومت سایش لغزشی آلیاژ مذکور مشاهده نشد.

وانگ و همکاران [21] با انجام فرآیند تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد (HPT) بر تیتانیم خالص و کاهش میانگین اندازه دانه به ۱۳۰ نانومتر، مشاهده کردند که سطح سایش نمونه تیتانیم فوق ریزدانه‌شده نسبت به درشت‌دانه، شیارهای همگن‌تری داشته، همچنین براده‌های سایشی نمونه فوق ریزدانه‌شده، ریزتر است. به علاوه نرخ سایش نمونه فوق ریزدانه‌شده مقدار کمتری نشان داده است (مقاومت به سایش آن بالاتر است).

لا و همکاران [22] با انجام ۸ پاس فرآیند ECAP در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش اندازه دانه به ۳۰۰ نانومتر، نرخ سایش کمتری برای تیتانیم خالص UFG در مقایسه با تیتانیم خالص آنیل‌شده درشت‌دانه به دست آوردند. یعنی مقاومت به سایش خشک افزایش یافت و همچنین سطوح تیتانیم UFG و درشت‌دانه به وسیله دی‌اکسید تیتانیم (TiO₂) پوشیده شد. در مجموع در رابطه

تحت نیروی ۲۰ نیوتن (فشار امگا پاسکال) مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام شدند. به علاوه، دستگاه قبل از انجام هر تست کالیبره شد. همچنین پین‌های مورد نیاز با قطر ۵ و ارتفاع حدود ۷/۵ میلی‌متر، از نمونه‌های آنیل و MDF شده تهیه شدند. همچنین به منظور رسیدن به صافی سطح مورد نظر برای تست سایش و همچنین زبری سطح یکسان برای تمام نمونه‌ها، ابتدا قبل از انجام هر تست مسافت حدود ۱۵۰ متر توسط دستگاه با سنباده شماره ۱۰۰۰ کاربیدسیلیسیم روی سطح تمام پین‌ها اعمال شد. همچنین به منظور تهیه دیسک‌های ساینده، فولاد ۱/۲۵۱۰ تهیه شده ابتدا توسط فرزکاری به شکل پولک‌هایی به ارتفاع ۷ میلی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر تهیه شدند. سپس برای دستیابی به سختی استاندارد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. به علاوه دیسک‌های سایشی به وسیله سنگ مغناطیس سنگ زده شدند تا به صافی سطح مطلوب و همچنین سطوح با زبری سطح یکسان برای تست سایش برسند. در نهایت سختی تمام دیسک‌ها مطابق استاندارد (حداقل پنج نقطه) اندازه‌گیری شد که تمامی دیسک‌ها مطابق استاندارد در محدوده سختی بین ۶۱ تا ۶۴ راکول سی قرار گرفتند. شماتیک تست پین روی دیسک در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲) شماتیک آزمون پین روی دیسک در پژوهش حاضر

پس از آزمون، پین‌های سایشی در الکل با استفاده از حمام آلتراسونیک به مدت حدود ۱۰ دقیقه تمیز شدند. همچنین برای تعیین نرخ سایش نمونه‌های آنیل و MDF شده، اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۱ میلی‌گرم محاسبه شد. به منظور محاسبه ضریب اصطکاک دینامیکی بین تیتانیوم و فولاد، پارامترهای سایش (بار اعمالی، سرعت خطی، فرکانس) روی دستگاه اعمال شده و اعداد آزمایش (نیروی عمودی و سرعت خطی) در نرم‌افزار CDT25 به منظور ثبت روند تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت وارد شدند.

به منظور بررسی دقیق‌تر مکانیزم‌های سایشی، سطوح نمونه‌های آنیل و فوق ریزدانه شده پس از آزمون سایش، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی میراتی‌اسکن با گسیل میدانی (FE-SEM) به وسیله حسگر الکترون‌های ثانویه و ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوولت مطالعه شدند. همچنین به منظور درک بهتر مکانیزم‌ها، نواحی زیرسطحی پین‌های ساییده شده نمونه‌های آنیل و فوق ریزدانه شده، بررسی شدند. بدین منظور این پین‌ها در جهت سایش به وسیله وایبرکات مقطع خورده و پس از عملیات آماده‌سازی، لایه تریبولوژیکی نیز به وسیله حسگر الکترون‌های برگشتی مورد مطالعه قرار گرفت.

قبل از انجام فرآیند MDF، نمونه‌های تیتانیومی با استفاده از فرزکاری به سایز مناسب رسیده و به مدت ۱ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند آنیل قرار گرفته و در کوره سرد شدند. سپس نمونه‌ها در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۶ پاس تحت فرآیند MDF قرار گرفتند.

به منظور بررسی اثر اندازه دانه بر خواص خوردگی و سایشی، اندازه دانه نمونه‌های آنیل و MDF شده، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی زایس ارویگا مجهز به پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌ها از آزمون پلاریزاسیون تافل استفاده شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌های مکعب‌مستطیلی MDF شده و آنیل شده، به وسیله فرزکاری به استوانه‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر تبدیل شده، سپس به وسیله دستگاه وایبرکات از وسط برش داده شدند. پس از آن نمونه‌ها برای انجام آزمون عمود بر سطح مقطع ۵ میلی‌متر (پس از پرداخت کاری و شستن با استون)، در محلول شبیه‌سازی شده بدن (SBF) در دمای محیط قرار گرفتند و سطوح دیگر نمونه‌ها عایق شدند. انتخاب این محلول که تقریباً از جنس پلاسمای خون انسان است، به دلیل کاربردهای بایوپزشکی تیتانیوم خالص فوق ریزدانه است. همچنین ترکیب شیمیایی محلول ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است (HCl به منظور تنظیم PH اضافه شده است).

جدول ۱) ترکیب شیمیایی محلول SBF

ماده شیمیایی	مقدار در یک لیتر (گرم)	ماده شیمیایی	مقدار در یک لیتر
NaCl	۸/۰۳۵	HCl (1 M)	۳۹ ml
NaHCO ₃	۰/۳۵۵	CaCl ₂	۰/۲۹۲ g
KCl	۰/۲۲۵	Na ₂ SO ₄	۰/۰۷۲ g
K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	۰/۲۳۱	(CH ₂ OH) ₃ CNH ₂	۶/۱۱۸ g
MgCl ₂ .6H ₂ O	۰/۳۱۱	-	-

آزمون خوردگی الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه اتولب در یک سل سه الکترودی شامل الکترود کاری (نمونه تیتانیومی)، الکترود شماره‌دهنده (پلاتین) و الکترود مرجع (کالومل) انجام شد. سرعت اسکن نمونه‌ها در نرم‌افزار نوا (Nova)، ۲ میلی‌ولت بر ثانیه انتخاب شد. همچنین آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی نمونه‌ها زمانی آغاز می‌شد که نمونه‌ها به شرایط پتانسیل مدار باز تعادلی خود برسند. بنابراین قبل از شروع آزمایش برای هر نمونه، نمونه مذکور در الکترولیت نگهداری شده تا این شرایط حاصل شود. جریان و پتانسیل خوردگی تمام نمونه‌ها محاسبه شد. در نهایت پتانسیل و جریان‌های خوردگی، با اندازه‌گیری شیب‌های تافل به دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی، به دست آمد.

خواص سایشی نمونه‌ها بر اساس روش پین روی دیسک دستگاه TR-20DUCOM مجهز به ترانس‌دیوسر غیرتماسی برای تعیین و ثبت ضریب اصطکاک در شرایط خشک، با مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر، سرعت لغزش ۲/۰ متر بر ثانیه در دمای اتاق، رطوبت بین ۱۷ تا ۲۳٪

نتایج نشان می‌دهد که ریزدانه‌سازی در اثر فرآیند MDF منجر به بهبود مقاومت به خوردگی شده است و با افزایش پاس‌های فرآیند MDF به علت کاهش بیشتر اندازه دانه، مقاومت به خوردگی بیشتر بهبود یافته است، زیرا جریان خوردگی مطابق جدول ۳، برای نمونه‌های ریزدانه‌شده عدد کمتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، فیلم‌های اکسیدی به سهولت در سطوح تغییر شکل یافته در مقایسه با آنیل شده شکل می‌گیرند که علت آن شکل‌گیری بیشتر اکسیدها در شرایط UFG است که از واکنش بالاتر سطح به علت نقایص سطحی بالاتر مانند مرزدانه‌ها و مرزهای غیرتعدالی در نمونه‌های UFG است [26-29]. در واقع با افزایش ضخامت لایه‌های اکسید، ممانعت از عبور جریان بالاتر برای واکنش ذرات در محلول افزایش یافته و در نتیجه مقاومت به خوردگی بهبود می‌یابد [30].

در بسیاری از مواد پلی‌کریستالی، مرزهای دانه به دلیل افزایش انرژی آنها نسبت به بلور کامل و ساختار اتمی نسبتاً ناکامل در طول خوردگی مورد حمله قرار می‌گیرند [12]. همچنین چسبندگی فیلم اکسید در مواد فوق ریزدانه (با مرزدانه‌های زیاد) نسبت به درشت‌دانه می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت الکترون‌ها در مرزدانه‌ها و احتمالاً پگینگ (اتصال) فیلم پسیو به مرزدانه‌ها، تقویت شود [12, 13].

در واقع در موادی که پسیوشدن نشان می‌دهند، جریان خوردگی با ریزدانه‌سازی کاهش می‌یابد. در این مورد، تراکم مرزدانه، سرعت هدایت فیلم اکسید روی سطوح را تعیین می‌کند. از طرف دیگر، در غیاب فیلم اکسید، زمانی که نرخ حلالیت بالاست، افزایش دانسیته مرزها، واکنش‌پذیری سطح کلی را افزایش می‌دهد، یعنی کاهش اندازه دانه منجر به افزایش جریان خوردگی می‌شود [13].

به‌منظور تاثیر دقیق‌تر اندازه دانه بر جریان خوردگی (i_{corr}) و همچنین تاثیر دمای فرآیند MDF بر i_{corr} ، رابطه بین i_{corr} بر حسب عکس مجذور اندازه دانه در نمودار ۲ نشان داده شده است. در رابطه $i = A + B d^{-0.5}$ برای تیتانیم پسیوشونده که تراکم مرزدانه، سرعت هدایت فیلم اکسید روی سطوح را تعیین می‌کند، ثابت A تابعی از محیط و B نشان‌دهنده ثابت یک ماده است که با توجه به ترکیب یا سطح ناخالصی متفاوت است، با فرض اینکه i_{corr} با فاصله مرزدانه تغییر می‌کند [13].

در هر دو رابطه مربوط به نمودار ۲، مشخص است که i_{corr} با کاهش اندازه دانه، تقریباً به‌طور خطی کاهش می‌یابد، در حالی که اثر فرآیند MDF و افزایش تعداد پاس‌های آن در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به کاهش بیشتر i_{corr} در مقایسه با اعمال فرآیند MDF در دمای محیط شده است؛ چراکه شیب خط آن نیز منفی‌تر است. در واقع با وجود اینکه در اثر MDF نمونه‌ها در دمای محیط، اندازه دانه‌ها بیشتر کاهش یافته ولی مقاومت به خوردگی بهبود کمتری داشته است. این امر بیانگر این است که مقاومت به خوردگی علاوه بر اندازه دانه، به پارامترهای دیگر ریزساختاری، نظیر دانسیته نایجایی‌ها نیز وابسته است و همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، با افزایش دما به دلیل رخداد پدیده بازیابی، دانسیته نایجایی‌ها، کاهش یافته و مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد [10, 13].

همچنین به دلیل اینکه سختی معمولاً یکی از پارامترهای تاثیرگذار در تست سایش است، سختی تمام نمونه‌ها، توسط آزمون سختی ویکرز با استفاده از دستگاه میکروسختی HVS-1000A در نیروی ۵۰۰ گرم و زمان ساکن‌شدن ۱۵ ثانیه مطابق با استاندارد ASTM E-384 اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

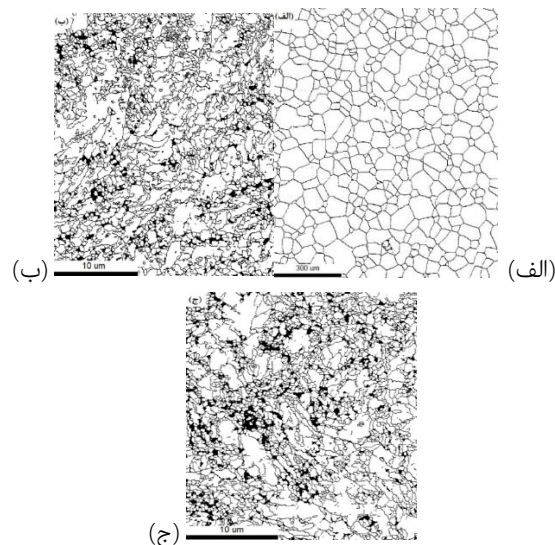
۳-۱- اندازه دانه

نقشه مرزدانه‌ها برای نمونه‌های آنیل و ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۳ نشان داده شده است. اندازه‌گیری دانه‌ها به روش کسر عددی نشان داد که اندازه دانه تیتانیم CP آنیل شده از ۴۴ میکرون به حدود ۴۰۰ نانومتر برای نمونه‌های ۶ پاس MDF شده، کاهش یافته است (شکل ۳). به‌علاوه اندازه دانه‌های نمونه‌های آنیل، ۱ پاس، ۳ پاس و ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد که به روش کسر عددی اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۲ آورده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری اندازه دانه‌های هر ریزساختار از اندازه گام‌های روبش ۵/۵ میکرون، ۱۰۰ نانومتر و ۵۰۰ نانومتر به‌ترتیب برای نمونه آنیل شده، نمونه‌های ۱ تا ۳ پاس MDF شده و نمونه‌های ۶ پاس MDF شده استفاده شد. هر یک از اندازه گام‌های روبش ذکر شده، نشان‌دهنده دقت دستگاه EBSD در گزارش اندازه دانه نمونه‌های نظیر مربوطه است. همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشخص است، اعمال فرآیند MDF در دمای محیط اثر بیشتری بر کاهش اندازه دانه داشته است. زیرا افزایش دمای تغییر شکل منجر به کاهش کرنش اعمالی به ساختار شده و باندها و میکروباندهای برشی با کرنش‌های موضعی بالا نیز، کاهش می‌یابند که در نتیجه منجر به کاهش برش خوردن دانه‌ها شده و اندازه دانه‌های بزرگ‌تری در مقایسه با نمونه‌های MDF شده در دمای محیط به‌دست می‌آیند. همچنین با افزایش دما به دلیل رخداد پدیده بازیابی، دانسیته نایجایی‌ها نیز مقداری کاهش می‌یابد [10].

۳-۲- خوردگی

به‌منظور بررسی اثر ریزدانه‌سازی به‌وسیله فرآیند MDF بر مقاومت به خوردگی تیتانیم CP، آزمون پلاریزاسیون تافل برای نمونه اولیه آنیل شده و نمونه‌های MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت که نمودارهای حاصل از این آزمون در نمودار ۱ (لگاریتم جریان بر حسب پتانسیل) نشان داده شده است. به‌علاوه جریان و پتانسیل خوردگی، با اندازه‌گیری شیب‌های تافل حاصل از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی برای تمام نمونه‌های نمودار ۱، در جدول ۳ آورده شده است. همچنین هر آزمون چند مرتبه تکرار شده است و بازه‌های مربوط به جریان و پتانسیل خوردگی با سطح اطمینان (CL) ۹۵٪، به‌همراه میانگین و انحراف استاندارد با استفاده از آنالیز واریانس در حضور یک عامل (One-Way Analysis of Variance) در نرم‌افزار مینی‌تیب (Minitab) محاسبه شده و در جدول ۳ ارایه شده است.

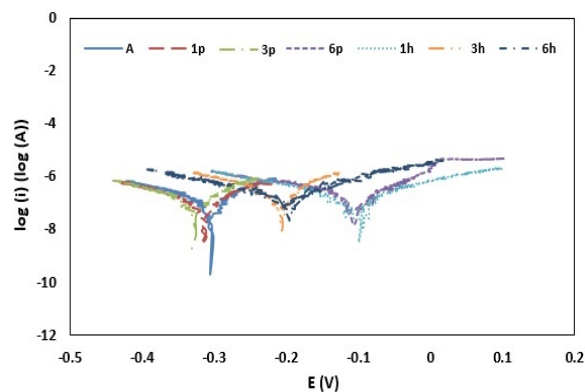
همچنین اثر دانسیته نابیجایی‌ها در تحقیقات پیشین بر خواص خوردگی آلیاژهای منیزیم AZ31 و فولاد ضدزنگ نیز بررسی شده است.



شکل ۳) آنالیز EBSD نمونه‌های الف- آنیل‌شده، ب- ۶ پاس MDF شده در دمای محیط، ج- ۶ پاس MDF شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۲) میانگین اندازه دانه نمونه‌های محاسبه‌شده به روش کسر عددی

نمونه‌های آنیل‌شده	دمای فرآیند MDF	
	دمای محیط	۲۲۰°C
اولیه	۴۴ μm	
۱ پاس	۱ μm	۱۴ μm
۳ پاس	۵۴۰ nm	۶۴۰ nm
۶ پاس	۳۹۰ nm	۴۴۰ nm



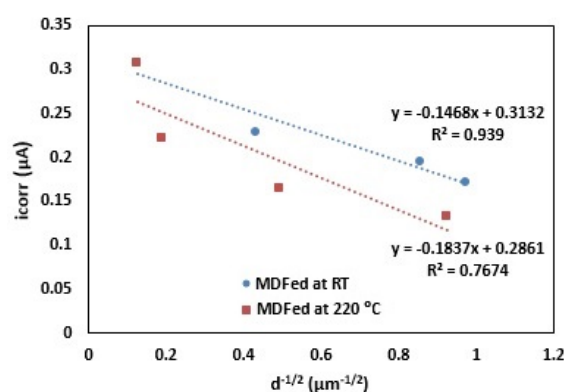
نمودار ۱) منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه اولیه و نمونه‌های MDF شده تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۳) مقادیر جریان و پتانسیل خوردگی (بازه، میانگین و انحراف استاندارد) مربوط به منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه آنیل‌شده و نمونه‌های MDF شده تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد

نمونه	بازه جریان خوردگی (CL 95%)	i_{corr} (μA)	بازه پتانسیل خوردگی (CL 95%)	$-E_{corr}$ (V)
آنیل	(۰/۲۷۵, ۰/۳۳۸)	۰/۳۰۷±۰/۰۲	(-۰/۲۶۸, ۰/۳۴۱)	۰/۳۰۵±۰/۰۲
۱ پاس	(۰/۱۹۷, ۰/۲۶۰)	۰/۲۲۹±۰/۰۳	(-۰/۲۷۶, ۰/۳۴۹)	۰/۳۱۳±۰/۰۲
	(۰/۱۹۶, ۰/۲۴۷)	۰/۲۲۲±۰/۰۲	(-۰/۰۸۲, ۰/۱۳۳)	۰/۱۰۸±۰/۰۲
۳ پاس	(۰/۱۶۳, ۰/۲۲۶)	۰/۱۹۵±۰/۰۲	(-۰/۰۲۸۹, ۰/۳۶۲)	۰/۳۲۶±۰/۰۳
	(۰/۱۳۸, ۰/۱۸۹)	۰/۱۶۴±۰/۰۲	(-۰/۰۱۸۱, ۰/۲۳۲)	۰/۲۰۷±۰/۰۲
۶ پاس	(۰/۱۴۰, ۰/۲۰۳)	۰/۱۷۲±۰/۰۲	(-۰/۰۷۱, ۰/۱۴۴)	۰/۱۰۸±۰/۰۲
	(۰/۱۰۷, ۰/۱۵۸)	۰/۱۳۳±۰/۰۲	(-۰/۰۲۰, ۰/۲۵۱)	۰/۲۲۶±۰/۰۲

در اطراف نابیجایی‌ها، منجر به افزایش حلالیت آندی و افزایش سرعت حل‌شدن فلز آندی شده است. در تحقیقات پگوت و همکاران [33] نیز گزارش شده است که مقاومت به خوردگی فولاد ضدزنگ کارسرد شده نسبت به کارگرم شده کاهش یافته است، به‌طوری‌که مقدار نابیجایی‌ها بدون شکل‌گیری مرز دانه‌ها، افزایش یافته است که احتمالاً مربوط به انباشته‌شدن نابیجایی‌ها است. در واقع با انباشته‌شدن نابیجایی‌ها بر آخال‌ها، اعتقاد بر این است که به‌طور مرجح حل می‌شوند.

همچنین با دقت در جدول ۳، مشخص است که در نمونه ۱ پاس MDF شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه ۱ پاس MDF شده در دمای محیط، بهبود مقاومت به خوردگی حدود ۳٪ بهبود داشته است، در حالی که در نمونه‌های متناظر ۳ پاس حدود ۱۵٪ و در ۶ پاس حدود ۲۳٪ بهبود داشته است. در واقع با افزایش پاس‌ها در نمونه‌های سرد و گرم، احتمالاً اختلاف دانسیته نابیجایی‌ها بیشتر شده و بهبود مقاومت به خوردگی برای نمونه‌های



نمودار ۲) رابطه بین جریان خوردگی و اندازه دانه تیتانیوم CP

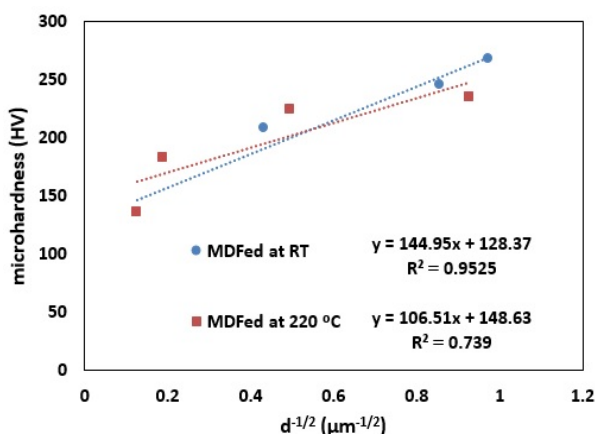
در تحقیقات بن‌حمو و همکاران [32] نشان داده شد که در ریزساختار منیزیم AZ31 به‌شدت تغییر شکل داده‌شده، با کاهش دانسیته نابیجایی‌های داخل دانه‌ها، مقاومت به خوردگی بهبود می‌یابد. زیرا افزایش دانسیته نابیجایی‌ها به علت کاهش موضعی پتانسیل تعادلی

تغییرات هر نمونه با سطح اطمینان ۹۵٪ همراه میانگین و انحراف استاندارد محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ مقادیر میکروسختی (بازه، میانگین و انحراف استاندارد) برای نمونه آئیل شده و نمونه های MDF شده تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد

نمونه	بازه میکروسختی (HV; 95%)	میانگین میکروسختی (HV)
آئیل	(۱۲۵/۸۵, ۱۴۶/۹۹)	۱۳۶±۸/۱
۱ پاس	دمای محیط	۲۰۹±۵/۲
	دمای ۲۲۰°C	۱۸۳±۱۱/۹
۳ پاس	دمای محیط	۲۴۶±۵/۴
	دمای ۲۲۰°C	۲۲۵±۱۲/۱
۶ پاس	دمای محیط	۲۶۸±۱۵/۹
	دمای ۲۲۰°C	۲۳۵±۸/۴

همان طور که در جدول مذکور مشخص است، سختی نمونه های MDF شده در دمای محیط، در تمام پاس ها بالاتر است. همچنین سختی نمونه ها با افزایش تعداد پاس ها روند صعودی داشته و در پاس ششم برای نمونه دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۹۷ و ۷۲٪ نسبت به نمونه آئیل شده افزایش یافته است. علت افزایش سختی پس از اعمال فرآیند MDF را می توان کاهش اندازه دانه و افزایش دانسیته نابیایی ها ذکر کرد [۱]. به علاوه اختلاف سختی نمونه های MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد، به دلیل تمایل بیشتر به کارسختی و بازیابی به ترتیب در دمای محیط و دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد است [۱۰]. رابطه بین سختی بر حسب عکس مجذور اندازه دانه با استفاده از رگرسیون گیری محاسبه شده و در نمودار ۳ نشان داده شده است. تمایل بیشتر به کارسختی و نرخ بالاتر افزایش سختی در نمونه های MDF شده در دمای محیط نسبت به دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد، در این شکل نیز مشخص است. زیرا شیب رابطه بین سختی و عکس مجذور اندازه دانه برای نمونه های دمای محیط بالاتر است. همچنین به طور کلی کاهنده بودن نرخ افزایش سختی، به دلیل کاهنده بودن نرخ کاهش اندازه دانه (جدول ۲) و دانسیته نابیایی ها است.



نمودار ۳ رابطه بین میکروسختی و اندازه دانه تیتانیوم CP

شکل داده شده در دمای بالا که دانسیته نابیایی کمتری دارند، بیشتر رخ داده است؛ زیرا با افزایش پاس ها در دمای بالا بدون درنظرگرفتن اندازه دانه، زمان نگهداری در دمای بالا بیشتر شده و فرآیند بازیابی بیشتر رخ داده و نابیایی های بیشتری از بین می روند. همچنین دمای بالای فرآیند علاوه بر کاهش دانسیته نابیایی ها، تنش های پسماند را نیز کاهش می دهد که این نیز منجر به بهبود مقاومت به خوردگی می شود [۱۷]. نتیجه اینکه با انجام فرآیند MDF در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد در مقایسه با دمای محیط، مقاومت به خوردگی به دلیل کاهش دانسیته نابیایی ها و تنش های پسماند، بهبود بیشتری داشته، در حالی که اندازه دانه ساختار فوق ریزدانه شده در دمای بالاتر افزایش خیلی ناچیزی داشته است.

مطابق جدول ۳ اعمال فرآیند MDF و ایجاد ساختار UFG، منجر به مثبت تر شدن پتانسیل شده است. همچنین مقایسه پتانسیل خوردگی نمونه های ۱ پاس و ۳ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد، نشان می دهد که نمونه های دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد پتانسیل مثبت تری داشته و مقاومت به خوردگی بهتری دارند که با بحث های پیشین نیز مطابقت دارد [۱۳].

نتیجه اینکه در این تحقیق اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید به روش MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد و کاهش اندازه دانه حاصل از آن، منجر به بهبود مقاومت به خوردگی (کاهش جریان خوردگی) می شود. علت افزایش مقاومت به خوردگی در اثر کاهش اندازه دانه حاصل از اعمال فرآیند MDF و همچنین تاثیر دمای فرآیند MDF را می توان در موارد زیر خلاصه کرد [10, 12-14, 17, 30, 31]:

۱- کاهش اندازه دانه و تبدیل خوردگی از حالت موضعی به یکنواخت.
۲- کاهش اندازه دانه و بهبود سینتیک شکل گیری فیلم اکسید پسیو روی نواحی از ساختار با فعالیت زیاد که در نتیجه آن لایه پسیو اکسیدی ضخیم تر شده و ممانعت از عبور جریان بالاتر برای واکنش ذرات در محلول افزایش می یابد و منجر به بهبود مقاومت به خوردگی می شود.

۳- کاهش اختلاف پتانسیل گالوانیک بین مرزدانه های فعال انرژی بالا و داخلی دانه های نجیب.

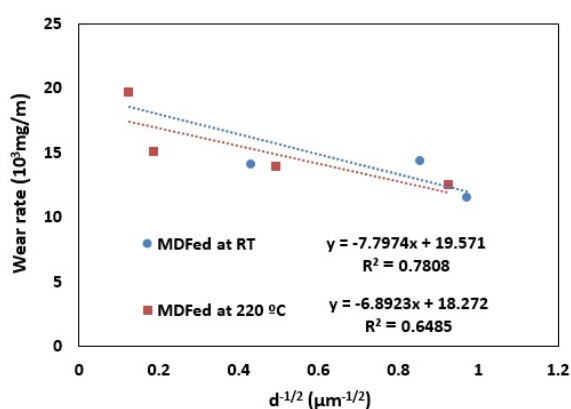
۴- تقویت چسبندگی فیلم اکسید در مواد فوق ریزدانه (با مرزدانه های زیاد) نسبت به درشت دانه که دلیل آن افزایش فعالیت الکترون ها در مرزدانه ها و احتمالاً اتصال فیلم پسیو به مرزدانه ها ذکر شده است.

۵- افزایش دمای فرآیند MDF به دلیل رخداد پدیده بازیابی، منجر به کاهش دانسیته نابیایی ها و کاهش تنش های پسماند در مقایسه با نمونه های MDF شده در دمای محیط می شود که در نتیجه مقاومت به خوردگی افزایش می یابد.

۳-۳- خواص تریبولوژی

به دلیل اینکه یکی از پارامترهای موثر در خواص سایشی، سختی ماده است، سختی تمام نمونه ها محاسبه شده و هر نمونه حداقل ۵ مرتبه تکرار شده است. مشابه خوردگی برای سختی نیز بازه

نسبت به سختی (در نمودار ۳) اندازه خیلی کمتری را نشان می‌دهد. البته یکی از دلایل اختلاف قابل توجه شیب‌های محاسبه‌شده احتمالاً به دلیل عدم رابطه خطی بین سایش و عکس مجذور اندازه دانه است که مقدار کمتر R^2 در روابط مذکور این را تایید می‌کند. اما اختلاف بین مقدار افزایش سختی و کاهش مقدار نرخ سایش به‌طور عمده به عملکرد مکانیزم‌های سایش نیز مربوط است و سختی تنها پارامتر تاثیرگذار نیست. چرا که تیتانیوم نیز یکی از واکنش‌پذیرترین مواد است و به آسانی با اکسیژن واکنش می‌دهد و به شکل روتیل (TiO_2) در می‌آید که لایه سطحی اکسید تیتانیوم نیز نقش مهمی را در تعیین مقاومت به سایش تیتانیوم درشت‌دانه و فوق ریزدانه بازی می‌کند و ممکن است اثر تقویت به‌وسیله ساختار UFG در مقاومت به سایش، به‌وسیله این لایه محو شده یا کاهش یابد [20].



نمودار ۴) رابطه بین نرخ سایش و اندازه دانه تیتانیوم CP

در جدول ۶ بازه تغییرات ضرایب اصطکاک بین پین تیتانیومی و دیسک فولادی با سطح اطمینان ۹۵٪ به‌همراه میانگین و انحراف استاندارد برای تمام نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین روند تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش در تست سایش لغزشی خشک، برای حالت آنیل و فوق ریزدانه‌شده برای نمونه در نمودار ۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که کاهش اندازه دانه در اثر فرآیند MDF، تاثیر قابل توجهی بر مقدار ضریب اصطکاک نداشته و مقدار ضرایب اصطکاک برای تمام نمونه‌ها در محدوده ۵٪ تا ۶۱٪ قرار گرفت یعنی تقریباً ثابت مانده است. همچنین در تحقیقات انجام‌شده به‌وسیله وانگ و همکاران [21] ضریب اصطکاک دینامیکی تیتانیوم به‌طور میانگین حدود ۶٪ ذکر شده که ریزدانه‌سازی تقریباً بر ضریب اصطکاک بی‌تاثیر ذکر شد، با وجود اینکه مکانیزم‌های سایشی متفاوتی برای تیتانیوم درشت‌دانه و فوق ریزدانه مشاهده شده است. همچنین در تحقیقات لا و همکاران [22] محدوده ضریب اصطکاک تیتانیوم UFG در محدوده ۴۵٪ تا ۶٪ ذکر شده که ساختار UFG نیز روی ضریب اصطکاک تاثیر قابل توجهی نداشته است. مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که ضرایب اصطکاک به‌دست‌آمده قابل قبول است. علت ثابت‌ماندن ضریب اصطکاک احتمالاً به دلیل این است که ضریب اصطکاک به

به‌منظور بررسی اثر اندازه دانه بر مقاومت به سایش تیتانیوم CP، داده‌های تغییرات نرخ سایش بر حسب تعداد پاس‌های فرآیند MDF (کاهش اندازه دانه) در دمای محیط (سرد) و دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد (گرم)، در نیروی اعمالی ۲۰ نیوتن (فشار امگاپاسکال) در جدول ۵ ارائه شده است. کاهش وزن نمونه‌ها با توجه به اختلاف وزن اولیه نمونه قبل از آزمون سایش و وزن نمونه پس از آزمون بر حسب میلی‌گرم به‌دست آمد. همچنین به‌منظور ارزیابی بردن اثر مسافت لغزش، با تقسیم‌کردن عدد کاهش وزن بر مسافت لغزش، نرخ سایش به‌دست آمد.

جدول ۵) مقادیر نرخ سایش (بازه، میانگین و انحراف استاندارد) برای نمونه آنیل‌شده و نمونه‌های MDF شده تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر حسب 10^3 mg/m

نمونه	بازه نرخ سایش (CL 95%)	میانگین نرخ سایش
آنیل	(۱۶/۳۷, ۲۳/۰۳)	۱۹/۷۲±۲/۸
پاس ۱	دمای محیط	۱۴/۱۵±۲/۶
	دمای ۲۲۰°C	۱۵/۰۵±۲/۲
پاس ۳	دمای محیط	۱۴/۳۵±۲/۸
	دمای ۲۲۰°C	۱۳/۹۰±۲/۷
پاس ۶	دمای محیط	۱۱/۵۱±۱/۳
	دمای ۲۲۰°C	۱۲/۰۵±۲/۳

همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، اعمال فرآیند MDF و افزایش تعداد پاس‌های آن (ریزدانه‌سازی بیشتر) منجر به کاهش نرخ سایش (بهبود مقاومت به سایش) نسبت به نمونه آنیل‌شده است. یکی از دلایل این افزایش مقاومت سایشی را می‌توان طبق رابطه آرچارد با افزایش سختی نمونه‌های MDF شده سرد و گرم، توجیه کرد [34]:

$$Q = \frac{V}{L} = \frac{KF}{H} \quad (1)$$

که در آن V حجم سایش (میلی‌متر مکعب)، L مجموع مسافت لغزش، F بار نرمال وارده (نیوتن)، H سختی نمونه (ویکرز)، K ثابت آرچارد (ضریب سایش) که وابسته به شرایط سطحی و تمیزی سطح بوده و همواره کوچک‌تر از یک است و Q نرخ سایش است. طبق رابطه ۱ مشخص است که مقاومت به سایش یعنی Q^{-1} ، متناسب با سختی ماده است. یعنی با افزایش سختی مقاومت به سایش ماده افزایش می‌یابد. همچنین در نمونه‌های MDF شده در دمای محیط که سختی‌شان مقدار بیشتری افزایش پیدا کرده، مقاومت به سایش نیز مطابق جدول ۵، مقدار بیشتری شد.

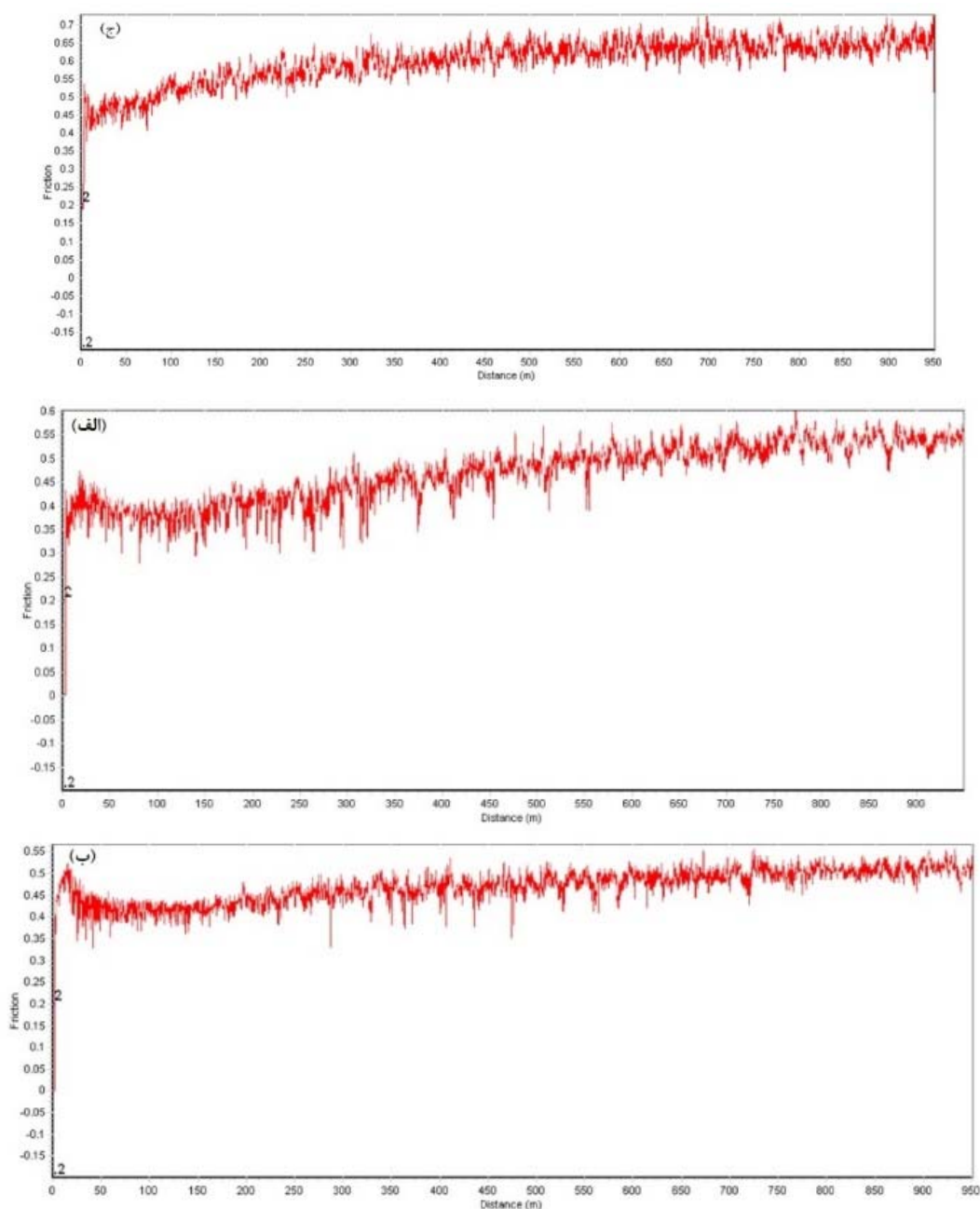
همان طور که مشاهده شد با وجود رابطه خطی بین سختی و مقاومت به سایش، سختی نمونه‌های ۶ پاس MDF شده سرد و گرم به‌ترتیب ۹۷٪ و ۷۲٪ افزایش یافت در حالی که مقاومت به سایش نمونه‌های مذکور به‌ترتیب حدود ۴۲٪ و ۳۷٪ افزایش یافتند. این مورد در نمودار ۴ که رابطه بین نرخ سایش بر حسب عکس مجذور اندازه دانه با استفاده از رگرسیون‌گیری محاسبه شده، نیز تا حدی تایید می‌شود. زیرا شیب رابطه‌های محاسبه‌شده در نرخ سایش

جدول ۶) مقادیر ضریب اصطکاک (بازه، میانگین و انحراف استاندارد) برای نمونه آنیل شده و نمونه های MDF شده تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد

نمونه	بازه ضریب اصطکاک (CL 95%)	میانگین ضریب اصطکاک
آنیل	(۰/۴۹۶,۰/۵۴۳)	۰/۵۲±۰/۰۱
پاس ۱	دمای محیط	۰/۵۹±۰/۰۱
	دمای ۲۲۰°C	۰/۶۰±۰/۰۳
پاس ۳	دمای محیط	۰/۵۹±۰/۰۲
	دمای ۲۲۰°C	۰/۶۰±۰/۰۱
پاس ۶	دمای محیط	۰/۵۲±۰/۰۲
	دمای ۲۲۰°C	۰/۶۱±۰/۰۳

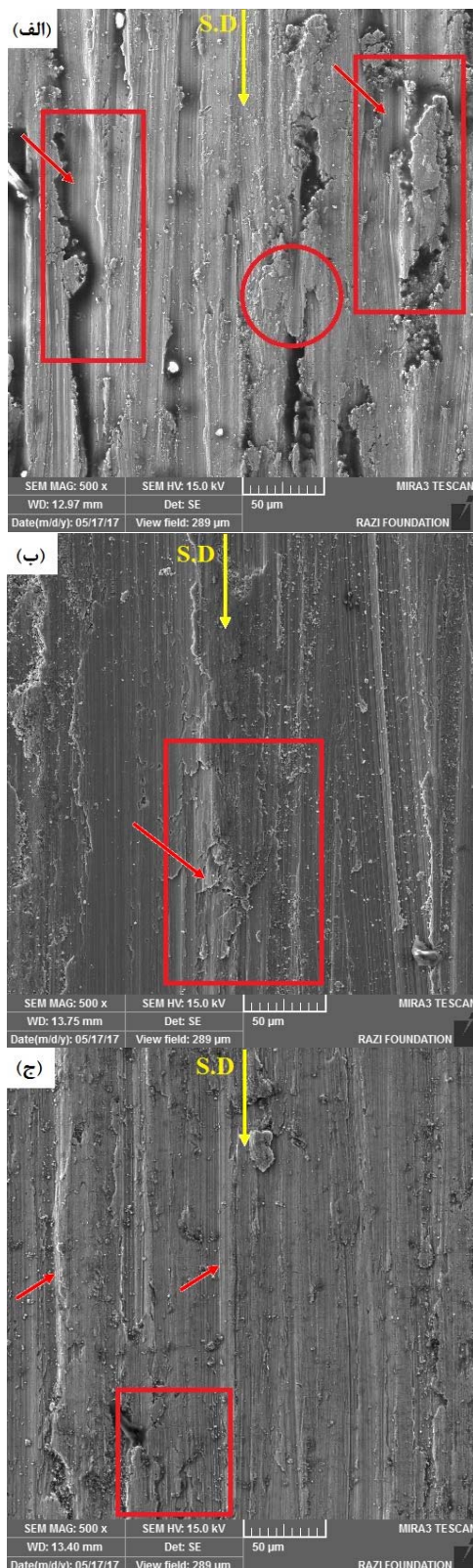
استحکام برشی فصل مشترک (که بین پین و دیسک ساینده واقع شده) وابسته است و فصل مشترک نیز معمولاً از اکسیدها که لایه تریبولوژیکی را تشکیل می دهند، تشکیل شده است [35].

به منظور بررسی تاثیر ساختار فوق ریزدانه بر مکانیزم های سایش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر از سطح سایش یافته برای نمونه های آنیل شده (درشت دانه)، ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی گراد (فوق ریزدانه شده) در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت لغزش (SD) در تست سایش لغزشی خشک نیز در بالای تمام تصاویر شکل مذکور مشخص شده است.



نمودار ۵) تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه های الف- آنیل شده، ب- ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ج- ۶ پاس MDF شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی گراد

چسبان جزیی در برخی نقاط مشهود است که برای اثبات آن تصاویر زیرسطح از نمونه‌های تیتانیوم CP درشت‌دانه و فوق ریزدانه در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴ تصاویر SEM از سطوح سایش‌یافته نمونه‌های تیتانیوم CP در شرایط الف- آبیله‌شده، ب- ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ج- ۶ پاس MDF شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد

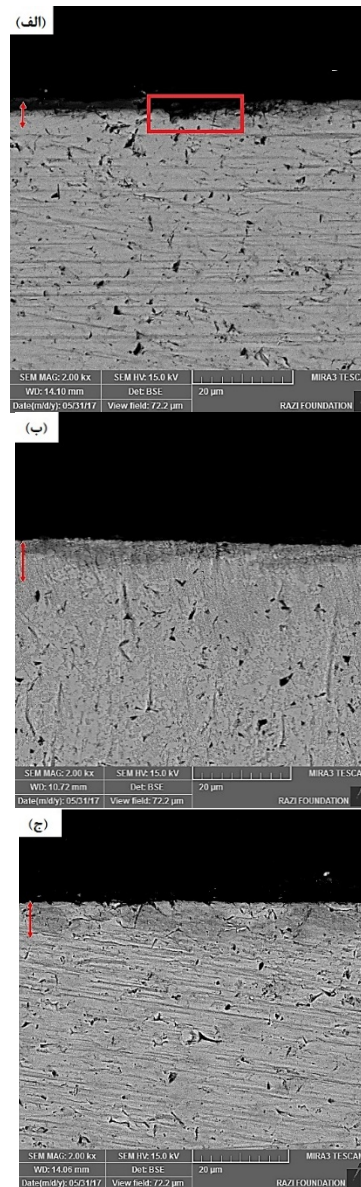
از مقایسه مورفولوژی تصاویر کاملاً مشخص است که مورفولوژی سطح تیتانیوم CP فوق ریزدانه (شکل‌های ۴- ب و ج) نسبت به تیتانیوم CP درشت‌دانه (شکل ۴- الف) بهبود یافته است. در شکل ۴- الف، کندگی‌ها و خراش‌های عمیق کاملاً مشهود است که نمونه‌هایی از کندگی‌های عمیق در کادریهای مستطیل در شکل مذکور نشان داده شده است. همچنین قسمت‌های برقی که با پیکان‌ها علامت‌گذاری شده‌اند، احتمالاً لایه تریبولوژیکی برداشته‌شده و به خود فلز رسیده است که بیانگر سایش چسبان جزیی هستند. دلیل آن می‌تواند استحکام برشی کم زیرلایه نمونه آبیله‌شده درشت‌دانه باشد که توانایی نگهداری لایه تریبولوژیکی را در برخی مناطق از دست داده است. در واقع سیلان و تغییر شکل زیرسطحی منجر به شکسته‌شدن لایه تریبولوژیکی در برخی مناطق شده است [10, 35]. همچنین کادر دایره در شکل مذکور، نشان می‌دهد که سطح نمونه در حال ورقه‌ای شدن است. ورقه‌ای شدن در شکل ۴- ب برای نمونه ۶ پاس MDF شده در دمای محیط، مشهودتر است که در کادر مستطیل با پیکان نشان داده شده است. در واقع رخداد این پدیده به این صورت که ترک‌هایی در نواحی زیرسطح جوانه زده و سپس موازی با سطح رشد کرده‌اند و در نهایت منجر به کنده شدن یک ذره ورقه‌ای از لایه تریبولوژیکی خواهند شد؛ زیرا عموم ورقه‌ای شدن نمونه‌های این پژوهش، ورقه‌ای شدن از خود لایه تریبولوژیکی بوده است. همچنین خراش‌ها در شکل ۴- ب همگن‌تر است و کندگی‌های عمیق وجود ندارد [35]. در نمونه MDF شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز مطابق شکل ۴- ج، کادر مستطیل نشان می‌دهد که لایه تریبولوژیکی در حال ورقه‌ای شدن است. همچنین وجود خراش‌های هم‌راستا در سطح سایش نمونه مذکور، نشان‌دهنده مکانیزم سایش خراشان هستند. به‌علاوه پیکان‌های تنها، شیارها را نشان می‌دهند که ممکن است به دلیل پستی و بلندی‌های سطوح تماس یا اینکه احتمالاً ذراتی که از لایه تریبولوژیکی کنده‌شده، بین دوسطح به دام افتاده (و چون این ذرات ماهیت سرامیکی دارند و سخت هستند)، خراش‌ها و شیارهایی در سطح نمونه ایجاد کرده‌اند [20]. در واقع در شکل‌های ۴- ب و ج، مکانیزم‌های سایشی تفاوت قابل توجهی نداشته و در هر دو به‌طور عمده مکانیزم سایش خراشان و ورقه‌ای شدن محدود به لایه تریبولوژیکی مشاهده می‌شود. چراکه برای این دو نمونه اندازه دانه و سختی مشابهی نیز به‌دست آمده و کاهش دانسیته نابجایی‌ها در اثر افزایش دمای فرایند MDF، تاثیر قابل توجهی بر مکانیزم‌های سایش این نمونه‌ها نداشته است.

مقایسه این سه تصویر نشان می‌دهد که در سایش تیتانیوم CP درشت‌دانه و فوق ریزدانه، مکانیزم‌های سایش خراشان و ورقه‌ای شدن مشهود است؛ در حالی که با ریزدانه‌سازی و افزایش استحکام برشی (بهبود استحکام برشی تیتانیوم فوق ریزدانه در منبع [10] آورده شده است)، خراش‌ها همگن‌تر و کندگی‌ها خفیف‌تر و محدود به لایه تریبولوژیکی شده است. اما در نمونه تیتانیوم CP درشت‌دانه کندگی‌های عمیق و همچنین مکانیزم سایش

شکل یافته (شکل‌های ۵- ب و ج) به سهولت رخ داده و در نتیجه اکسید پسیو و پایدارتر و چسبنده‌تری در مقایسه با نمونه آنیل، شکل گرفته است که منجر به افزایش مقاومت به سایش در اثر پایداری لایه تریبولوژیکی شده است [26-29]. اما علت مهم‌تر، این است که در نمونه آنیل شده درشت‌دانه که استحکام برشی کمتری در بالک آن وجود دارد، زیرلایه توانایی حمایت از لایه تریبولوژیکی را از دست داده و بخش‌هایی از لایه تریبولوژیکی همان طور که در کادر مستطیل در شکل ۵- الف نشان داده شده، شکسته شده است [10, 35]. این همچنین با کندگی‌های عمیق و مکانیزم سایش چسبان جزیی موجود در تصویر سطح سایش مربوط به آن (شکل ۴- الف) نیز مطابقت دارد. همچنین در سایش، وجود لایه تریبولوژیکی مهم‌تر است؛ مثلاً اگر نرخ تولید لایه تریبولوژیکی بر نرخ برداشت آن غلبه کند، سایش تحت کنترل است. حتی اگر ضخامت لایه کم باشد، وجود آن به دلیل ساختار متخلخل و اکسیدی می‌تواند باعث کاهش تنش برشی فصل مشترک و کاهش اصطکاک و کنترل نرخ سایش شود [35]. همچنین حذف مداوم و شکل‌گیری مجدد لایه تریبولوژیکی منجر به مصرف تدریجی مواد تیتانیم می‌شود و شکستن آن با ایجاد ذرات اکسیدی سخت، می‌تواند پتانسیل را برای ایجاد سایش خراشی به وسیله سایش سه جسمه ایجاد کند [20].

در نتیجه در نمونه‌های ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد که اندازه دانه و سختی مشابهی نیز داشتند، پایداری و تراکم لایه تریبولوژیکی در هر دو تقریباً مشابه شد، در حالی که در نمونه آنیل شده درشت‌دانه که سختی و استحکام برشی کمتری داشته است [10]، زیرلایه توانایی نگهداری لایه تریبولوژیکی را از دست داده و لایه تریبولوژیکی در برخی نواحی شکسته شده است. این منجر به افزایش نرخ برداشت لایه تریبولوژیکی و در نتیجه کاهش مقاومت به سایش نمونه آنیل شده است که با مقدار نرخ سایش نمونه‌ها در جدول ۵ نیز مطابقت دارد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که کسر مرزهای دانه بزرگ زاویه، تاثیر بیشتری در مقاومت به سایش دارند. زیرا در نمونه آنیل شده با دانه‌های درشت (۴۴ میکرون) نرخ سایش بالا است، در حالی که با ایجاد ساختار فوق ریزدانه پس از اعمال ۶ پاس فرآیند MDF، نرخ سایش در نمونه‌های فوق ریزدانه‌شده کاهش یافته است. اما دمای فرآیند MDF تاثیر قابل توجهی بر مکانیزم‌ها و نرخ سایش نمونه‌های فوق ریزدانه‌شده نداشته است. زیرا نمونه آنیل با اندازه دانه ۴۴ میکرون، پس از ۶ پاس فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، به اندازه دانه‌هایی به ترتیب برابر ۳۹/۰ و ۴۴/۰ میکرون رسیده است. یعنی اندازه دانه‌ها نسبت به نمونه آنیل در هر دو نمونه فوق ریزدانه تقریباً ۱۰۰ برابر کاهش یافته‌اند و سختی هر دو نمونه تقریباً به حالت اشباع رسیده است. در نتیجه مطابق انتظار مکانیزم‌ها و نرخ سایش این نمونه‌ها نیز مشابه به دست آمد و کاهش دانسیته نابجایی‌ها در اثر افزایش دمای فرآیند MDF، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت به سایش نمونه‌های فوق ریزدانه نداشته است.



شکل ۵) تصاویر SEM از زیرسطح سایش نمونه‌های تیتانیم CP در شرایط الف- آنیل شده، ب- ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ج- ۶ پاس MDF شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد

به منظور بررسی دقیق‌تر لایه تریبولوژیکی، تصاویر زیرسطح با استفاده از SEM از نمونه‌های تیتانیم CP آنیل شده و ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد با حسگر الکترون‌های برگشتی گرفته شده و در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در تمام تصاویر مربوط به زیرسطح سایش، لایه تریبولوژیکی در تصاویر الکترون‌های برگشتی به دلیل ماهیت اکسیدی بودن آن، تیره دیده می‌شود که در گوشه تمام شکل‌های مذکور، اندازه تقریبی برای آن با پیکان قرمز رنگ مشخص شده است. علت تیره دیده شدن این لایه، اختلاف چگالی بین تیتانیم و اکسیژن است که در حسگر الکترون‌های برگشتی، لایه تریبولوژیکی که بیشتر اکسیدی است، تیره دیده می‌شود.

مقایسه تصاویر شکل ۵ نشان می‌دهد که در اثر ایجاد ساختار فوق ریزدانه در تیتانیم CP، اکسیداسیون در سطوح ریزدانه‌شده تغییر

می‌شود. در نتیجه تفاوت معناداری بین میانگین‌های هر سری از گروه‌های داده‌ها وجود دارد. در واقع P- مقدار، به حداقل مقدار α (که با توجه به نتایج نمونه می‌توان فرض صفر را رد کرد) تعریف می‌شود. همچنین با توجه به رد فرضیه صفر برای تمام گروه‌های داده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که سطوح آزمایش بر خواص ذکرشده موثر تلقی می‌شود [36, 37, 39, 40]. یعنی به عبارت دیگر اعمال فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش تعداد پاس‌های فرآیند بر میکروسختی، جریان خوردگی و نرخ سایش تاثیرگذار بوده است.

با مقایسه مقادیر P- مقدار در جدول ۷، مشاهده می‌شود که مقدار آن برای برخی از گروه‌های داده نظیر میکروسختی و جریان خوردگی (به‌خصوص در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) مقدار بسیار پایین‌تری را نشان می‌دهد. یعنی سطح اطمینان بالاتر از ۹۵٪ نیز می‌توان برای این گروه از داده‌ها در نظر گرفت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که دقت و صحت این گروه از داده‌ها از گروه‌های دیگر داده‌ها بالاتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر کاهش اندازه دانه به‌وسیله فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر رفتار خوردگی، سایش و سختی تیتانیوم CP مورد بررسی قرار گرفت. جریان و پتانسیل خوردگی با استفاده از آزمون پلاریزاسیون تافل، آزمون سایش با استفاد از تست پین روی دیسک و همچنین سختی با استفاده از آزمون میکروسختی ویکرز مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین تحلیل آماری نتایج با نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- نتایج بررسی آزمون پلاریزاسیون تافل نشان داد که در اثر کاهش اندازه دانه به‌وسیله فرآیند MDF و افزایش پاس‌های این فرآیند، جریان خوردگی کاهش یافته یا به عبارتی مقاومت به خوردگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری که برای نمونه‌های ۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، جریان خوردگی به‌ترتیب حدود ۴۴ و ۵۷٪ کاهش یافت. دلیل آن می‌تواند افزایش سینتیک رشد فیلم اکسید پسیو، افزایش چسبندگی و ضخامت بیشتر این فیلم در نمونه‌های فوق ریزدانه باشد که از ادامه خوردگی محافظت می‌کند.

۲- برای نمونه‌های MDF شده در دمای بالا نسبت به دمای محیط، مقاومت به خوردگی افزایش بیشتری داشته است و با افزایش پاس‌های فرآیند MDF، این اختلاف افزایش یافته، به‌طوری که در نمونه‌های ۶ پاس این اختلاف به ۲۳٪ رسیده است؛ علت آن می‌تواند کاهش دانسیته نایجایی‌ها به دلیل فرآیند بازیابی در دمای بالا و همچنین کاهش تنش‌های پسماند در نمونه‌های مذکور باشد. ۳- بررسی اثر ریزدانه‌سازی با استفاده از فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر نرخ سایش تیتانیوم CP نشان داد که با اعمال فرآیند MDF و افزایش پاس‌های فرآیند، نرخ سایش نمونه‌ها

همچنین همان طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، برای تحلیل آماری نتایج از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. داده‌های حاصل از اثر اعمال فرآیند MDF تا ۶ پاس در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بر میکروسختی، جریان خوردگی و نرخ سایش به‌دست آمده‌اند. این داده‌ها شامل درجات آزادی (DF)، مجموع مربعات (SS)، میانگین مجموع مربعات (MS)، آماره F (F-Value) و P- مقدار (P-Value) هستند که از آنالیز واریانس یک طرفه (ANOVA) محاسبه شدند (جدول ۷). میانگین و مجموع مربعات نیز شامل مربعات سطوح و مربعات خطا است و مقدار آماره F از تقسیم میانگین مربعات سطوح آزمایش به میانگین مربعات خطا به‌دست آمده است [36-40].

جدول ۷ نتایج آزمون آنوا برای سنجش تاثیر اندازه دانه بر پارامترهای میکروسختی، جریان خوردگی و نرخ سایش تیتانیوم خالص تجاری در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد

پارامتر	دمای فرآیند	MS	SS	DF	P-Value	F-Value
میکروسختی خطا	RT	۱۰۷۰۱/۵	۶۴۲۰۹	۶	۰/۰۰۰	۸۰/۳۹
		۱۳۳/۱	۳۷۲۷	۲۸		
میکروسختی خطا	۲۲۰°C	۷۲۰۱/۵	۴۳۲۰۹	۶	۰/۰۰۰	۷۱/۶۶
		۱۰۰/۵	۲۸۱۴	۲۸		
جریان خوردگی خطا	RT	۰/۰۱۰۴۴۷	۰/۰۳۱۳۴۰	۳	۰/۰۰۱	۱۸/۸۵
		۰/۰۰۰۵۵۴	۰/۰۰۴۴۳۴	۸		
جریان خوردگی خطا	۲۲۰°C	۰/۰۱۷۵۴۹	۰/۰۵۲۶۴۷	۳	۰/۰۰۰	۴۷/۹۵
		۰/۰۰۰۳۶۶	۰/۰۰۲۹۲۸	۸		
نرخ سایش خطا	RT	۳۵/۴۱۷	۱۰۶/۲۵	۳	۰/۰۲۲	۵/۶۷
		۶/۲۴۹	۴۹/۹۹	۸		
نرخ سایش خطا	۲۲۰°C	۲۹/۲۱۳	۸۷/۶۴	۳	۰/۰۴۱	۴/۴۲
		۶/۶۰۴	۵۲/۸۳	۸		

همان طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقدار آماره F برای داده‌های میکروسختی (در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) و جریان خوردگی (در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) مقادیر بالاتری را نشان داده است. این نشان می‌دهد که میکروسختی بیشترین سهم را داشته است. یا به عبارتی اثر فرآیند MDF و کاهش اندازه دانه بر میکروسختی تاثیر بیشتری در مقایسه با پارامترهای دیگر نظیر نرخ سایش و جریان خوردگی داشته است. همچنین پس از میکروسختی، اعمال فرآیند MDF در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز تاثیر زیادی بر جریان خوردگی نشان داده است [38]. نتایج آماری با نتایج تجربی این پژوهش مطابقت دارد.

همان طور که پیش‌تر مشاهده شد، تمام داده‌های آزمایش‌ها با سطح اطمینان ۹۵٪ و سطح معناداری ۵٪ ($\alpha = 0.05$) گزارش شدند. به دلیل اینکه P- مقدار برای تمام گروه‌های داده‌های جدول ۷ (میکروسختی، جریان خوردگی و نرخ سایش در دماهای مختلف) از مقدار α (۰/۰۵) کمتر است، فرض صفر (فرض برابری میانگین‌ها) رد

(نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)
منابع مالی: در انجام این پژوهش از منبع مالی خاصی استفاده نشده است

منابع

- 1- Ansarian I, Shaeri MH, Ebrahimi M. Utilization of multi directional forging for fabrication of commercial pure titanium with ultrafine-grained microstructure. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(2):371-382. [Persian]
- 2- Kadkhodayan M, Shariati M, Naseri R. Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by equal channel angular pressing. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):157-166. [Persian]
- 3- 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;17(4):52-60. [Persian]
- 4- Nasaeri R, Kadkhodayan M, Shariati M. The investigation of springback of UFG commercially pure titanium in three-point bending test. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(11):266-276. [Persian]
- 5- Suresh KS, Geetha M, Richard C, Landoulsi J, Ramasawmy H, Suwas S, et al. Effect of equal channel angular extrusion on wear and corrosion behavior of the orthopedic Ti-13Nb-13Zr alloy in simulated body fluid. *Materials Science and Engineering: C*. 2012;32(4):763-771.
- 6- Wang CT, Gao N, Gee MG, Wood RJ, Langdon TG. Tribology testing of ultrafine-grained Ti processed by high-pressure torsion with subsequent coating. *Journal of Materials Science*. 2013;48(13):4742-4748.
- 7- Chen YJ, Li YJ, Walmsley JC, Dumoulin S, Skaret PC, Roven HJ. Microstructure evolution of commercial pure titanium during equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(3):789-796.
- 8- Fattah-alhosseini A, Keshavarz MK, Mazaheri Y, Ansari AR, Karimi M. Strengthening mechanisms of nano-grained commercial pure titanium processed by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;693:164-169.
- 9- Lütjering G, Williams JC. *Titanium*. 2nd Edition. Berlin: Springer; 2003.
- 10- Ansarian I, Shaeri MH, Ebrahimi M, Minárik P, Bartha K. Microstructure evolution and mechanical behaviour of severely deformed pure titanium through multi directional forging. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;776:83-95.
- 11- Naseri R, Kadkhodayan M, Shariati M. Static mechanical properties and ductility of biomedical ultrafine-grained commercially pure titanium produced by ECAP process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(9):1964-1975.
- 12- Miyamoto H. Corrosion of ultrafine grained materials by severe plastic deformation, an overview. *Materials Transactions*. 2016;57(5):559-572.
- 13- Kim HS, Yoo SJ, Ahn JW, Kim DH, Kim WJ. Ultrafine grained titanium sheets with high strength and high corrosion resistance. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(29-30):8479-8485.

کاهش یافته یا به عبارتی مقاومت به سایش نمونه‌ها افزایش یافته است، به طوری که پس از ۶ پاس اعمال فرآیند MDF در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ سایش به ترتیب حدود ۴۲ و ۳۷٪ نسبت به نمونه آنیل‌شده درشت‌دانه کاهش یافته است. افزایش مقاومت به سایش نمونه‌ها با افزایش سختی آنها در اثر اعمال فرآیند MDF نیز مطابقت دارد.

۴- بررسی مورفولوژی سطح و زیرسطح سایش نشان داد که مکانیزم سایش از ورقه‌ای شدن شدید، خراشان شدید و چسبان جزیی برای نمونه آنیل‌شده درشت‌دانه، به ورقه‌ای شدن و خراشان خفیف‌تر محدود به لایه تریبولوژیکی برای نمونه‌های فوق ریزدانه تبدیل شده است که با کاهش نرخ سایش نمونه‌های فوق ریزدانه نیز مطابقت دارد.

۵- دمای فرآیند MDF بر مورفولوژی و نرخ سایش نمونه‌های فوق ریزدانه تاثیر قابل توجهی نداشت؛ زیرا اندازه دانه و سختی نمونه‌های فوق ریزدانه‌شده (۶ پاس MDF شده در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد)، تفاوت قابل توجهی نداشتند. همچنین ضریب اصطکاک بین پین تیتانیومی و دیسک فولادی در تمام نمونه‌ها تقریباً ثابت و در محدوده ۰/۵۲ تا ۰/۶۱ قرار گرفت.

۶- تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار مینی‌ت‌ب نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵٪ و سطح معنادار بودن ۵٪، اختلاف معناداری بین میانگین‌های بین هر سری از گروه‌های داده‌ها وجود دارد و سطوح آزمایش بر خواص میکروسختی، جریان خوردگی و نرخ سایش موثر تلقی می‌شوند. به علاوه مقدار بسیار پایین $P (0/000)$ برای داده‌های میکروسختی و جریان خوردگی (در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهد که دقت و صحت این گروه از داده‌ها از گروه‌های دیگر داده‌ها بالاتر است و سطح اطمینان بالاتر از ۹۵٪ نیز می‌توان برای این گروه از داده‌ها در نظر گرفت. همچنین با توجه به مقادیر آماره F ، می‌توان نتیجه گرفت که اثر فرآیند MDF و کاهش اندازه دانه بر میکروسختی (در دمای محیط و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) و جریان خوردگی (در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) تاثیر بیشتری در مقایسه با پارامترهای دیگر نظیر نرخ سایش داشته است.

تقدیر و تشکر: نویسندگان این مقاله از مسئولین صندوق حمایت از پژوهشگران برای حمایت مالی ایشان از این پژوهش با شماره طرح ۹۴۸۰۹۶۱۰ و از دکتر پیتیر میناریک از دانشگاه چارلز کشور جمهوری چک برای آنالیز نمونه‌ها به وسیله EBSD قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در هیچ نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین محتویات علمی و ادبی این مقاله نیز مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافی با نهاد یا سازمانی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: ایمان انصاریان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدحسین شاعری

- 27- Dan Song A, Jiang JH, Lin PH, Yang DH. Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009;19(5):1065-1070.
- 28- Balakrishnan A, Lee BC, Kim TN, Panigrahi BB. Corrosion behaviour of ultra fine grained titanium in simulated body fluid for implant application. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs*. 2008;22(1):58-64.
- 29- Balyanov A, Kutnyakova J, Amirkhanova NA, Stolyarov VV, Valiev RZ, Liao XZ, et al. Corrosion resistance of ultra fine-grained Ti. *Scripta Materialia*. 2004;51(3):225-229.
- 30- Kumar S, Sankara Narayanan TS, Ganesh Sundara Raman S, Seshadri SK. Thermal oxidation of CP Ti-An electrochemical and structural characterization. *Materials Characterization*. 2010;61(6):589-597.
- 31- Tao S, Li DY. Tribological, mechanical and electrochemical properties of nanocrystalline copper deposits produced by pulse electrodeposition. *Nanotechnology*. 2005;17(1):65-78.
- 32- Ben Hamu G, Eliezer D, Wagner L. The relation between severe plastic deformation microstructure and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;468(1-2):222-229.
- 33- Peguet L, Malki B, Baroux B. Influence of cold working on the pitting corrosion resistance of stainless steels. *Corrosion Science*. 2007;49(4):1933-1948.
- 34- Ebrahimi M, Attarilar Sh, Djavanroodi F, Gode C, Kim HS. Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process. *Materials & Design*. 2014;63:531-537.
- 35- Hutchings I, Shipway P. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier Science; 2017.
- 36- Schulze KA, Marshall SJ, Gansky SA, Marshall GW. Color stability and hardness in dental composites after accelerated aging. *Dental Materials*. 2003;19(7):612-619.
- 37- Wongkhantee S, Patanapiradej V, Maneenut C, Tantbirojn D. Effect of acidic food and drinks on surface hardness of enamel, dentine, and tooth-coloured filling materials. *Journal of Dentistry*. 2006;34(3):214-220.
- 38- Thiele JD, Melkote SN. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999;94(2-3):216-226.
- 39- Seghi RR, Denry IL, Rosenstiel SF. Relative fracture toughness and hardness of new dental ceramics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1995;74(2):145-150.
- 40- Vaghefi A, Eyvazian M. *Fundamental of probability and engineering statistics*. 1st Edition. 2nd Volume. Tehran: Terme; 2009. [Persian]
- 14- Chaudhari GP. Corrosion of nanostructured and ultrafine-grained metallic implant materials. *Materials Technology*. 2016;31(13):812-817.
- 15- Garbacz H, Pisarek M, Kurzydłowski KJ. Corrosion resistance of nanostructured titanium. *Biomolecular Engineering*. 2007;24(5):559-563.
- 16- Hoseini M, Shahryari A, Omanovic S, Szpunar JA. Comparative effect of grain size and texture on the corrosion behaviour of commercially pure titanium processed by equal channel angular pressing. *Corrosion Science*. 2009;51(12):3064-3067.
- 17- Kim HS, Kim WJ. Annealing effects on the corrosion resistance of ultrafine-grained pure titanium. *Corrosion Science*. 2014;89:331-337.
- 18- Zheng CY, Nie FL, Zheng YF, Cheng Y, Wei SC, Valiev RZ. Enhanced in vitro biocompatibility of ultrafine-grained titanium with hierarchical porous surface. *Applied Surface Science*. 2011;257(13):5634-5640.
- 19- Dheda SS, Kim YK, Melnyk Ch, Liu W, Mohamed FA. Corrosion and in vitro biocompatibility properties of cryomilled-spark plasma sintered commercially pure titanium. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2013;24(5):1239-1249.
- 20- Purcek G, Saray O, Kul O, Karaman I, Yapici GG, Haouaoui M, et al. Mechanical and wear properties of ultrafine-grained pure Ti produced by multi-pass equal-channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;517(1-2):97-104.
- 21- Wang CT, Gao N, Gee MG, Wood RJ, Langdon TG. Effect of grain size on the micro-tribological behavior of pure titanium processed by high-pressure torsion. *Wear*. 2012;280:28-35.
- 22- La P, Ma J, Zhu YT, Yang J, Liu W, Xue Q, et al. Dry-sliding tribological properties of ultrafine-grained Ti prepared by severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2005;53(19):5167-5173.
- 23- Tang L, Liu Ch, Chen Z, Ji D, Xiao H. Microstructures and tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy during multidirectional forging at 773 K. *Materials & Design*. 2013;50:587-596.
- 24- Kundu A, Kapoor R, Tewari R, Chakravarty JK. Severe plastic deformation of copper using multiple compression in a channel die. *Scripta Materialia*. 2008;58(3):235-238.
- 25- Akbaripanah F, Salavati MA, Mahmudi R. The influences of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) processes on microstructure, shear strength and microhardness of AM60 Magnesium Alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(11):409-416. [Persian]
- 26- Ralston KD, Birbilis N. Effect of grain size on corrosion: A review. *Corrosion*. 2010;66(7):075005.