

مطالعه رفتار خوردگی کامپوزیت هیبریدی Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) تولید شده به روش SPS با مقادیر مختلف تقویت‌کننده در دمای تفجوشی ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد

طاهره قلی‌زاده^{۱*}، مازیار آزادبه^۲، عباس صباحی‌نمینی^۳، شیوا شعاع‌برق^۴

^{۱*} دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۳ دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی

^۴ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

* نویسنده مسئول: t_golizadeh@sut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

چکیده

در این پژوهش کامپوزیت هیبریدی Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) ساخته شده به روش تفجوشی قوس پلاسما^۱ (SPS) در دمای تفجوشی ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با تغییر درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده سرامیکی (۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور ریزساختار، ساختار فازی و رفتار خوردگی به ترتیب با میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، ثبت الگوهای XRD و آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌های سرامیکی از ۰/۵ تا ۴ درصد مولیبدن باقی‌مانده کم‌تر شده و فاز بتا بیشتر شده است. با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده تخلخل اطراف مولیبدن کمتر شده و کامپوزیت Ti-10Mo حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده دارای کمترین تخلخل است. افزایش فاز بتا و کاهش تخلخل سبب بهبود رفتار خوردگی شده است. کمترین و بیشترین مقاومت به خوردگی به ترتیب برای نمونه‌های ۰/۵-۱۱۵۰ با بیشترین چگالی جریان خوردگی برابر ۱/۲۵ μA/cm² و ۴-۱۱۵۰ با کمترین چگالی جریان خوردگی برابر ۰/۲۲ μA/cm² است. سطح خوردگی نمونه ۴-۱۱۵۰ خوردگی یکنواخت‌تری را نسبت به بقیه نمونه‌ها نشان می‌دهد.

کلیدواژه: کامپوزیت هیبریدی، Ti-10Mo، TiC، TiB₂، تفجوشی قوس پلاسما.

¹Spark Plasma Sintering

Study of the Corrosion Behavior of Hybrid Composite Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) Produced by SPS Method with Various Reinforcement Amounts at a Sintering Temperature of 1150°C

T.Gholizadeh ^{1*}, M. Azadbeh ², A. Sabahi Namini ³, Sh. Shoaebargh ⁴

^{1*}PhD student, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology.

²Professor, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology.

³Associate Professor, Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili

⁴MSc, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology

* Corresponding Author: t_gholizadeh@sut.ac.ir

Submission: 2024, 09, 11 Acceptance: 2024, 12, 20

Abstract

In this study, a hybrid composite (Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂)) fabricated using the Spark Plasma Sintering (SPS) method at a sintering temperature of 1150° with a varied range of the ceramic reinforcement amounts (0.5, 1, 2, and 4 weight percent). For this purpose, the microstructure, phase structure, and corrosion behavior were evaluated using optical microscopy, scanning electron microscopy, XRD patterns, and potentiodynamic polarization tests. The results indicate that increasing the amount of ceramic reinforcements from 0.5 to 4 percent decreases the residual molybdenum, whereas the beta phase increases. Moreover, the porosity around the molybdenum decreases by increasing the reinforcement particles, and the Ti-10Mo composite containing 4 weight percent of the reinforcement exhibits the lowest porosity. The increase in the beta phase and the reduction in porosity cause an improvement in corrosion behavior. The lowest and highest corrosion resistance is observed for the samples 1150-0.5 with the highest corrosion current density of 1.25 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and 1150-4 with the lowest corrosion current density of 0.22 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively. The corroded surface of 1150-4 is uniform compared to the others.

Keywords: Hybrid composite, Ti-10Mo, TiC, TiB₂, Spark Plasma Sintering.

۱- مقدمه

امروزه آلیاژهای بر پایه تیتانیوم به دلیل خواص منحصر به فردی که از خود نشان می دهند مورد توجه قرار گرفته اند. چگالی پایین، مقاومت به خوردگی بالا، استحکام مخصوص بالا و زیست سازگاری عالی این آلیاژها سبب توجه به کاربرد آن در بیوپزشکی شده است [۶-۱]. عدم زیست سازگاری کامل و طول عمر مناسب محدودیت هایی است که محققان در کاربرد این آلیاژها به عنوان ایمپلنت استخوانی مواجه شده اند [۷].

آلیاژهای تجاری تیتانیوم محدودیت هایی از جمله مقاومت به سایش پایین، مشکلات فرآیند ساخت (از جمله ریخته گری، جوشکاری، ماشین کاری و ...) دارند [۸]. روش ساخت متالورژی پودر نیز در ساخت این آلیاژها مستلزم بکارگیری از پرس دما بالا است. در این میان، روش ساخت تف جوشی قوس پلاسما به دلیل سرعت روش و دمای فرآیند پایین می تواند مورد توجه قرار گیرد. هم چنین با استفاده از این روش، کامپوزیت های ایجاد شده توزیع یکنواختی را از اجزای تشکیل دهنده خود نشان می دهند [۹-۱۱]. محققان متعددی آلیاژهای تیتانیوم را با استفاده از روش تف جوشی قوس پلاسما تولید نموده اند [۳ و ۱۵-۱۲]. زادرا و همکارانش [۱۳] پودر تیتانیوم خالص را در دماهای تف جوشی در بازه ۷۰۰-۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه تحت فشار ۶۰ MPa قرار دادند و گزارش نمودند که ریزساختار و خواص شیمیایی و مکانیکی عالی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد به دست آمده است. شاهدی و همکارانش [۱۶] تاثیر دماهای مختلف تف جوشی ۷۵۰-۱۳۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه و تحت فشار ۵۰ MPa را بر روی تیتانیوم خالص با روش تف جوشی قوس پلاسما مطالعه نموده اند و نشان داده اند که در دمای زینتر ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد می توان به یک نمونه متراکم با خواص مکانیکی عالی دست یافت. افزایش دمای زینتر سبب کاهش تخلخل در ساختار می شود [۱۷].

افزودن مولیبدن به تیتانیوم سبب افزایش استحکام و سختی آن می شود [۶ و ۸]. در بررسی خواص مکانیکی آلیاژ Ti-10Mo با روش ساخت تف جوشی قوس پلاسما با استفاده از درصدهای وزنی مختلف مولیبدن گزارش شده است که در دمای ۱۲۰۰

درجه سانتی گراد می توان به چگالی و سختی بالایی در ترکیب وزنی Ti-16Mo دست پیدا نمود [۱۸].

خواص مکانیکی و رفتار خوردگی آلیاژهای تیتانیوم با استفاده از ذرات تقویت کننده سرامیکی می تواند ارتقا یابد. ذرات سرامیکی متعددی از جمله TiB₂، B₄C و TiC استفاده شده اند [۲۸-۱۹]. ذرات تقویت کننده با ایجاد مانع در برابر رشد نابجایی ها سبب افزایش استحکام و سختی می شوند [۲۹]. در میان این تقویت کننده ها، TiB₂ و TiC به دلیل مدول الاستیک بالا و ضرایب انبساط حرارتی تقریباً مشابه با زمینه تیتانیومی به عنوان بهترین تقویت کننده ها شناخته می شوند [۳۲-۳۰]. دلبری و همکارانش کامپوزیت تیتانیوم با ذرات تقویت کننده TiB₂ و TiC را با روش تف جوشی قوس پلاسما در دمای تف جوشی ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ زمان دقیقه و تحت فشار ۵۰ MPa تولید کردند و خواص مکانیکی آن را مورد مطالعه قرار دادند [۲۱].

نسبت تقویت کننده ها نیز در خواص مکانیکی کامپوزیت های تیتانیوم تاثیر گذار است. در پژوهشی نسبت های متفاوتی از TiB₂ در زمینه تیتانیومی با روش SPS در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد ایجاد شده است. چگالی نسبی در حدود ۹۷/۵ درصد برای مقدار ۷/۵ درصد وزنی TiB₂ به دست آمده است که سختی و استحکام کششی را تحت تاثیر قرار داده است [۲۸]. افزایش مقدار تقویت کننده هایی مانند TiB₂ می تواند سبب کاهش داکتیلیته و چقرمگی نیز شود. در پژوهشی که توسط سینگ و همکارانش [۳۳] انجام گرفته است، مقدار بهینه تقویت کننده TiB₂ در کامپوزیت تیتانیوم حدود ۵ تا ۱۰ درصد وزنی برای دستیابی به استحکام، سختی و داکتیلیته بهینه در کاربردهای صنعتی مناسب گزارش شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته به نظر می رسد رفتار خوردگی آلیاژ Ti-10Mo با افزودن جز تقویت کننده هایی مانند TiB₂ و TiC می تواند بهبود یابد و مقدار تقویت کننده مقاومت به خوردگی را تحت تاثیر قرار دهد. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر مقدار جز تقویت کننده های TiB₂ و TiC بر روی ریزساختار، ساختار فازی، چگالی و رفتار خوردگی نمونه های Ti-10Mo با استفاده از روش تف جوشی

قوس پلاسما در دمای تفجوشی ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. برای این منظور نمونه های کامپوزیتی Ti-10Mo افزودن مقادیر مختلف فاز تقویت کننده TiC و TiB₂ با روش تفجوشی قوس پلاسما در دمای تفجوشی ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد تولید شده و مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر رفتار خوردگی نمونه های کامپوزیت هیبریدی Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) ساخته شده با درصد های وزنی متفاوتی از TiC و TiB₂ با استفاده از روش تفجوشی به کمک قوس پلاسما در دمای تفجوشی ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان ۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات ترکیب شیمیایی نمونه های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

عملیات متالوگرافی برای بررسی های ریزساختاری و تعیین خواص سطح نمونه ها انجام گرفت. سطح نمونه های کامپوزیتی ابتدا توسط سنباده های ۶۰ الی ۵۰۰۰ سنباده زده شدند. سپس سطح نمونه ها برای از بین بردن خطوط ریز باقی مانده به همراه خمیر الماسه پولیش زنی شدند و در نهایت سطح نمونه های پولیش شده توسط محلول ۵۰ ml H₂O، ۵۰ ml HNO₃، ۵۰ ml HF به مدت ۵ ثانیه تحت فرآیند اچ قرار گرفتند.

مشخصات ریزساختاری نمونه ها شامل فاز های تشکیل شده در زمینه تیتانیوم، نحوه توزیع ذرات افزودنی و تحولات فازی رخ داده بین تیتانیوم و ذرات سرامیکی با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل PMG3 Olympus, Japan و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Cam Scan MV2300, Czech Republic مجهز به سیستم EDS بررسی شد. آنالیز ساختار فازی نمونه ها با ثبت الگوهای XRD با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس با نرخ روبش ۰/۰۲ S⁻¹ در محدوده ۲۰ الی ۹۰ درجه با طیف Cu-Kα (λ=۱/۵۴۰ Å) روی سطح پولیش شده انجام گرفت و با کمک نرم افزار XPERT فاز های موجود در نمونه ها بررسی شد. به منظور بررسی خواص فیزیکی نمونه ها ابتدا چگالی تفجوشی و سپس چگالی نسبی محاسبه شد. چگالی نمونه های تفجوشی شده بر اساس استاندارد ASTM C373 به

روش ارشمیدس اندازه گیری شد. برای این منظور، ابتدا وزن خشک اندازه گیری شد، به منظور جلوگیری از نفوذ آب به داخل نمونه سطح نمونه به اندازه یک لایه نازک با اسپری ضد آب پوشش داده شده و در نهایت وزن نمونه به صورت غوطه ور شده در آب اندازه گیری می شود. طبق رابطه (۱) چگالی تفجوشی، چگالی تئوری و چگالی نسبی محاسبه می شود. از نسبت چگالی تفجوشی به چگالی تئوری چگالی نسبی محاسبه می شود.

$$\rho = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \times \rho_{\text{water}} \quad (1)$$

در این رابطه M₁ وزن نمونه در هوا، M₂ وزن نمونه تر و نهایتاً M₃ وزن نمونه غوطه وری می باشد. برای محاسبه چگالی تئوری از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\frac{1}{\rho_t} = \sum \frac{\% \text{Wt}}{\rho_i} \quad (2)$$

که در آن چگالی هر یک از اجزا و %Wt درصد وزنی هر یک از اجزا و چگالی تئوری کل است. برای افزایش دقت محاسبات وزن خشک و تر ۳ مرتبه اندازه گیری شد.

رفتار خوردگی نمونه ها با استفاده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول شبیه ساز بدن رینگر (۰/۸۶ گرم سدیم کلرید، ۰/۰۳ گرم پتاسیم کلرید و ۰/۰۳۳ گرم کلسیم کلرید) در دمای اتاق بررسی شد. آزمون با استفاده از دستگاه پتانسیواستات - گالوانواستات Zive SP2 WonATech ساخت کره جنوبی در یک سیستم سه الکترودی شامل الکترود Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع، الکترود پلاتین به عنوان الکترود مخالف و نمونه ها به عنوان الکترود کار انجام گرفت. برای ایجاد پایداری قبل از اندازه گیری پتانسیل مدار باز (OCP)، نمونه به مدت ۱ ساعت در محلول رینگر قرار داده شدند. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده پتانسیل ۲۵۰- الی ۲۰۰۰ mV + نسبت به OCP با نرخ روبش ۱ mV/s انجام گرفت. برای اندازه گیری پارامتر های خوردگی از جمله جریان خوردگی از روش برون یابی تافلی استفاده شد. برای این منظور پتانسیلی که در آن جهت جریان تغییر می کند، به عنوان پتانسیل خوردگی مشخص شد. برای تعیین شیب های تافلی، در بازه های ۳۰ تا ۵۰ mV بالاتر و پایین تر از این پتانسیل خوردگی، شیب خط مماس بر نمودار اندازه گیری شد. محل تلاقی خط های مماس بر نمودار یا شیب های تافلی تعیین شد و چگالی جریان

برحسب g/cm^3 و i_{corr} برحسب A/cm^2 در نظر گرفته شد. در محاسبات چگالی تفجوشی برای هر نمونه مدنظر قرار داده شد. سرعت خوردگی بر حسب cm/s به دست می آید که می توان آن را به برحسب mpy محاسبه نمود.

$$r_{corr} = \frac{M}{nF} \times \frac{i_{corr}}{d} \quad (3)$$

متناظر با آن به عنوان چگالی جریان خوردگی گزارش شد. پس از آزمون خوردگی، سطح نمونه ها با SEM مشاهده و ارزیابی شد. سرعت خوردگی برحسب mpy تعیین شد. برای این منظور با توجه به رابطه ۳ استفاده شد. در این رابطه M جرم اتمی تیتانیم برحسب g ، n تعداد الکترون های مبادله شده که برابر ۴ در نظر گرفته شد، F ثابت فارادی برابر 96500 coulombs، d چگالی

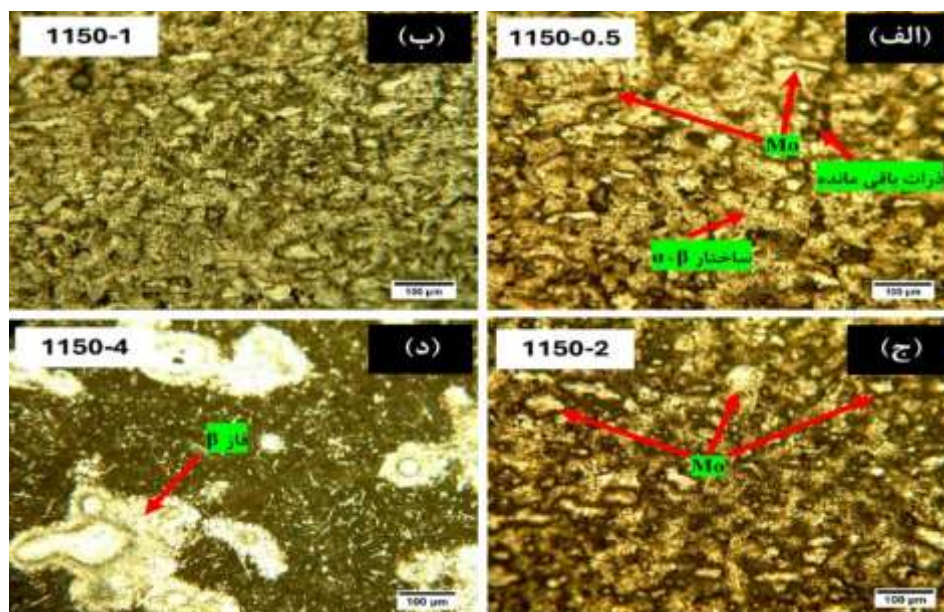
جدول ۱. ترکیب شیمیایی و دمای تفجوشی نمونه های کامپوزیت هیبریدی (Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂)

کد نمونه	ترکیب شیمیایی	مقدار فاز تقویت کننده TiB ₂ (wt%)	مقدار فاز تقویت کننده TiC (wt%)
۱۱۵۰-۰/۵	Ti-10Mo-0.5TiB ₂ -0.5TiC	۰/۵	۰/۵
۱۱۵۰-۱	Ti-10Mo-1TiB ₂ -1TiC	۱	۱
۱۱۵۰-۲	Ti-10Mo-2TiB ₂ -2TiC	۲	۲
۱۱۵۰-۴	Ti-10Mo-4TiB ₂ -4TiC	۴	۴

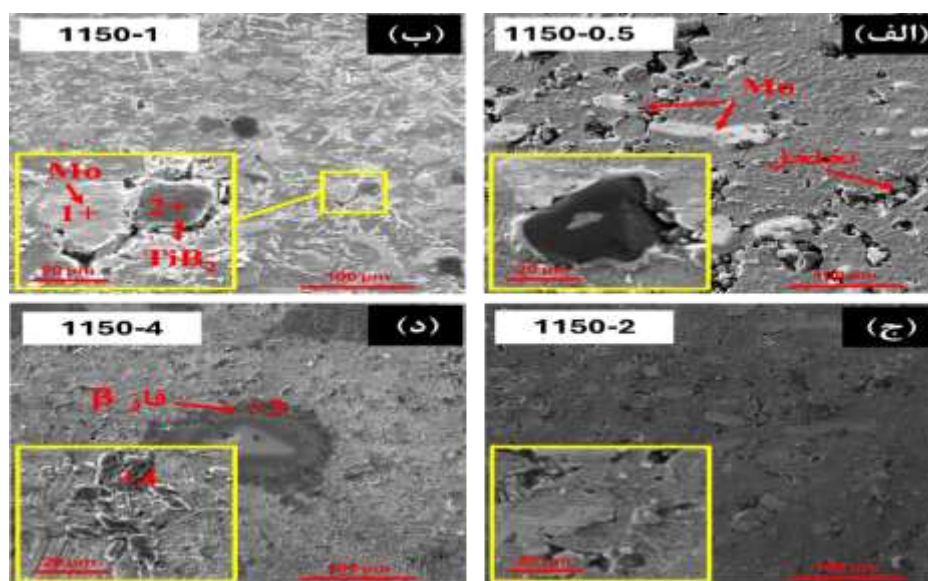
۳- نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح پولیش شده نمونه های تفجوشی شده با مقادیر مختلف تقویت کننده را نشان می دهد. در شکل ذرات تقویت کننده درجا و برون جا، مولیبدن باقی مانده و فاز آلفا + بتا در زمینه مشاهده می شود. با توجه به تصاویر بنظر می رسد که در نمونه های حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی ذرات تقویت کننده، پایداری سازی فاز بتا به صورت کامل اتفاق نیفتاده است و فازهای بتای غنی از مولیبدن به صورت آشکار در نمونه ها دیده نمی شوند. همچنین ذرات مولیبدن در سطح باقی مانده اند و لذا تخلخل های زیادی در اطراف مولیبدن ایجاد شده است. در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت کننده فاز بتا به صورت پایدار مشاهده می شود. به نظر می رسد این جدایش مولیبدن به دلیل پایین بودن و کافی نبودن دمای تفجوشی و عدم نفوذ کامل مولیبدن در تیتانیوم زمینه می باشد. همچنین مشاهده می شود که نمونه های تفجوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد نمونه های چگال نمی باشند و زمینه نمونه شامل حفرات و تخلخل های متعدد می باشد که با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده

از میزان تخلخل ها کاسته شده است. در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت کننده، فاز بتای پایدار غنی شده توسط مولیبدن در تصویر دیده می شود. برای مطالعه بیشتر نمونه ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های تفجوشی شده با مقادیر مختلف تقویت کننده در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، یک نمونه از آنالیز شیمیایی EDS نقاط مشخص شده در شکل در جدول ۲ نشان داده شده است. در این تصاویر مولیبدن های جدایش یافته در سطح به خوبی دیده می شوند. همچنین ذرات تقویت کننده باقی مانده در زمینه نیز مشاهده می شود که به نظر می رسد که ذرات تقویت کننده گاهی به دلیل اندازه بزرگتر و زمان ناکافی تفجوشی نتوانسته اند به صورت کامل وارد واکنش شوند و در زمینه باقی مانده اند. در شکل ۲- د زمینه متراکم تر و ظریف تر این نمونه نسبت به نمونه های قبلی مشاهده می شود که در نتیجه پایداری سازی فاز بتا و بسته شدن تخلخل های اطراف مولیبدن می باشد. همچنین به دلیل بالا رفتن دما در حین تفجوشی که ناشی از واکنش گرمای بین ذرات تقویت کننده و تیتانیوم زمینه می باشد مولیبدن به خوبی توانسته نفوذ کند.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های کامپوزیتی Ti-10Mo با مقادیر مختلف تقویت‌کننده تفجوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد.



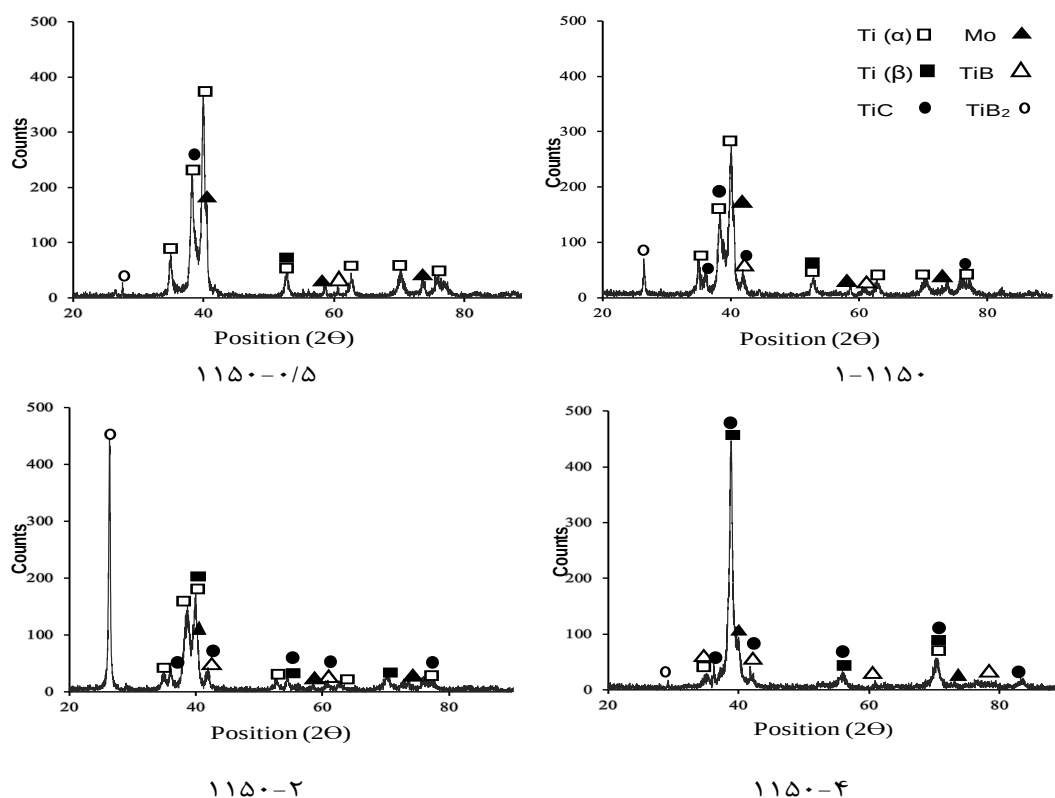
شکل ۲. تصاویر SEM نمونه‌های کامپوزیتی Ti-10Mo با مقادیر مختلف تقویت‌کننده تفجوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۲. یک نمونه از نتایج آنالیز شیمیایی EDS نقاط مشخص شده در شکل ۲ برحسب درصد وزنی

عناصر	۱	۲	۳	۴
Ti	۵/۱۸	۶۹/۱۹	۴۱/۸۲	۸۳/۱۸
Mo	۹۴/۸۲	۲/۳۶	۵/۴۸	-
B	-	۲۸/۴۵	۵۰/۷۲	۱/۷۶
C	-	-	-	۱۵/۰۶

شدت و تعداد پیک‌های فاز بتا بیشتر شده و از شدت پیک‌های آلفا کاسته می‌شود. در هر چهار نمونه تف‌جوشی شده در دمای مذکور پیک‌های TiB مشاهده می‌شود. وجود پیک‌های TiB نشان‌دهنده واکنش میان ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و تیتانیوم زمینه می‌باشد که با افزایش ذرات سرامیکی به شدت و تعداد پیک‌ها افزوده شده است. هم‌چنین در الگوهای XRD نمونه‌ها پیک‌های TiB₂ نیز ظاهر شده است که می‌تواند به دلیل واکنش ناقص بین ذرات TiB₂ و تیتانیوم زمینه باشد. به نظر می‌رسد زمان ۵ دقیقه تف‌جوشی برای تکمیل واکنش بین ذرات سرامیکی و تیتانیوم زمینه کافی نبوده است و گاهی ذرات سرامیکی با اندازه‌های بزرگتر در نمونه باقی مانده‌اند.

شکل ۳ الگوی XRD نمونه‌های تف‌جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در الگوهای نمونه‌ها، پیک‌های مربوط به تیتانیوم آلفا، بتا و مولیدن ظاهر شده است که نشان می‌دهد وجود مولیدن در نمونه‌ها سبب پایداری فاز بتا شده است. با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌های سرامیکی برون‌جا از ۰/۵ تا ۴ درصد و لذا آزادسازی گرمای بیشتر، مولیدن در زمینه تیتانیومی بیشتر نفوذ کرده است. با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده شدت پیک‌های مولیدن باقیمانده کم‌تر شده که نشان می‌دهد فاز بتا پایدار شده است. هم‌چنین وجود پیک‌های مولیدن عدم انحلال کامل ذرات مولیدن در تیتانیوم را تایید می‌کند. در الگوهای XRD با افزایش فاز تقویت‌کننده،



شکل ۳. نتایج آنالیز فازی نمونه‌های کامپوزیتی Ti-10Mo با مقادیر مختلف تقویت‌کننده تف‌جوشی در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد.

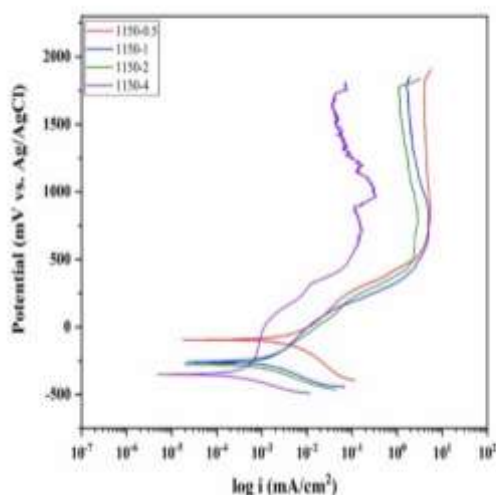
نتایج اندازه گیری چگالی نسبی و چگالی تف جوشی نمونه ها در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می شود که چگالی نسبی نمونه های تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد با افزایش درصد وزنی ذرات سرامیکی از ۰/۵ تا ۴ درصد وزنی از ۸۹/۸۳ درصد به ۹۴/۴۹ درصد افزایش یافته است. پایین بودن چگالی نمونه ۰/۵-۱۱۵۰ به دلیل وجود تخلخل های متعدد در زمینه و اطراف مولیدن باقی مانده در سطح می باشد. بالا رفتن دما در حین تفجوشی به دلیل واکنش های گرمای ذرات سرامیکی تقویت کننده با تیتانیوم زمینه و در نتیجه حذف تخلخل ها و نفوذ بیشتر مولیدن در تیتانیوم سبب افزایش چگالی شده است.

جدول ۳. نتایج اندازه گیری چگالی نمونه های کامپوزیتی Ti-10Mo با مقادیر مختلف تقویت کننده تفجوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد

کد نمونه	چگالی تئوری	چگالی تف جوشی	چگالی نسبی
	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)
۱۱۵۰-۰/۵	۴/۷۲	۴/۲۴	۸۹/۸۳
۱۱۵۰-۱	۴/۷۲	۴/۳۷	۹۲/۱۹
۱۱۵۰-۲	۴/۷۳	۴/۴۵	۹۴/۰۸
۱۱۵۰-۴	۴/۷۴	۴/۴۶	۹۴/۴۹

شکل ۴ منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه های Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) تفجوشی شده به کمک قوس پلاسما با مقادیر مختلف تقویت کننده را نشان می دهد. داده های استخراج شده به روش برون یابی تافلی در جدول ۴ آورده شده است. با روبش پتانسیل در محدوده پتانسیل ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ mV در نمودارها، کاهش چگالی جریان مشاهده می شود که می تواند به دلیل ایجاد یک لایه شبه پسیو بر روی سطح باشد. چگالی جریان خوردگی با افزایش درصد فاز تقویت کننده کمتر شده و از ۱/۲۵ μA/cm² برای نمونه ۰/۵-۱۱۵۰ به ۰/۲۲ μA/cm² برای نمونه ۱۱۵۰-۴ کاهش یافته است. کمترین چگالی جریان خوردگی برای نمونه ۱۱۵۰-۴ نشان دهنده بالاترین مقاومت خوردگی نمونه با بیشترین درصد فاز تقویت کننده درصد وزنی

ذرات سرامیکی TiC و TiB₂ برابر ۴ درصد وزنی است. این موضوع نشان می دهد که با افزایش درصد وزنی ذرات سرامیکی تا ۴ در کامپوزیت (TiC & TiB₂) Ti-10Mo-X مقاومت به خوردگی بهبود یافته است. هم چنین با افزایش درصد وزنی تقویت کننده های سرامیکی از ۰/۵ تا ۴ درصد فاز بتا در ساختار افزایش یافته است. افزایش فاز بتا در ریزساختار به دلیل تشکیل لایه اکسید پایدارتر در مقایسه با فاز آلفا سبب مقاومت بالاتر نمونه با ۴ درصد وزنی شده است. هم چنین با افزایش درصد فاز تقویت کننده تخلخل و حفرات کامپوزیت کمتر می شود. مقاومت به خوردگی کمینه نمونه با ۰/۵ درصد فاز تقویت کننده می تواند به تخلخل بالاتر این نمونه نسبت داده شود (شکل ۲-الف). هم چنین بالا بودن مقاومت به خوردگی نمونه با ۴ درصد وزنی فاز تقویت کننده می تواند به دلیل ساختار زمینه متراکم تر و ظریف تر این نمونه در نتیجه ی پایدارسازی بیشتر فاز بتا و تخلخل های کمتر اطراف مولیدن در این نمونه باشد (شکل ۲-د). مقادیر سرعت خوردگی برای نمونه های ۰/۵-۱۱۵۰، ۱-۱۱۵۰، ۲-۱۱۵۰ و ۴-۱۱۵۰ به ترتیب برابر ۰/۴۶۰، ۰/۳۲۱، ۰/۲۳۸ و ۰/۰۷۷ mpy به دست آمد که نشان می دهد با افزایش ذره تقویت کننده در کامپوزیت از مقدار ۰/۵ به ۴ درصد وزنی سرعت خوردگی به میزان ۰/۳۸۳ mpy کاهش یافته است.



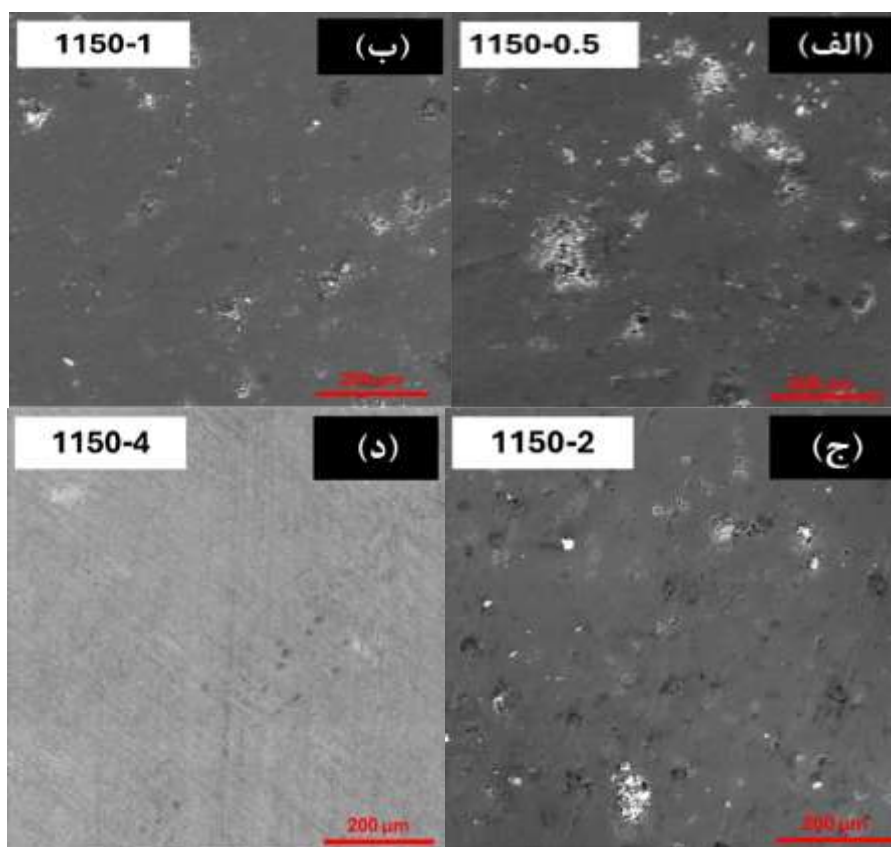
شکل ۴. منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه های Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) تفجوشی شده به کمک قوس پلاسما با مقادیر مختلف تقویت کننده در محلول رینگر.

جدول ۴. پارامترهای خوردگی استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک شکل ۱

نمونه	E_{corr} (mV)	β_c (mV.dec ⁻¹)	β_a (mV.dec ⁻¹)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)
۱۱۵۰-۰/۵	-۹۴	۸۵	۸۵	۱/۲۵
۱۱۵۰-۱	-۲۶۷	۱۱۰	۱۶۸	۰/۹۰
۱۱۵۰-۲	-۲۷۸	۱۱۲	۱۹۸	۰/۶۸
۱۱۵۰-۴	-۳۵۲	۹۳	۱۹۵	۰/۲۲

در تخلخل‌ها به‌عنوان مکان‌های ترجیحی خوردگی بیشتر ایجاد شده است. تخلخل‌ها شیارهایی برای به دام افتادن محلول خوردنده ایجاد نموده و باعث ایجاد و پیشروی خوردگی از این مواضع می‌شوند. نمونه ۱۱۵۰-۴ خوردگی یکنواخت‌تری داشته و بالاترین مقاومت به خوردگی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارا است.

سطح نمونه‌ها بعد از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مورد مطالعه قرار گرفت و تصاویر SEM در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار فاز تقویت‌کننده در زمینه و نیز کاهش مقدار مولییدن باقیمانده، تخلخل در نمونه‌ها کاهش یافته است. در سطح نمونه‌ها آثار محصولات خوردگی مشاهده می‌شود که



شکل ۴. تصاویر SEM از سطح نمونه‌های خورده شده بعد از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.

۴- نتیجه گیری

• در این پژوهش ریزساختار و رفتار خوردگی کامپوزیت هیبریدی Ti-10Mo-X (TiC & TiB₂) تف جوشی شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد به کمک قوس پلاسما بررسی شده است. با افزایش درصد وزنی تقویت کننده‌های سرامیکی از ۰/۵ تا ۴ درصد مولیبدن باقی مانده کم تر شده و شدت پیک‌های آلفا کم می‌شود. در هر چهار نمونه تف جوشی شده در دمای مذکور پیک‌های TiB₂ در اثر واکنش میان ذرات دی‌بوراید تیتانیوم و تیتانیوم زمینه دیده می‌شود که با افزایش ذرات سرامیکی به شدت و تعداد پیک‌ها افزوده شده است. در نمونه‌های شامل ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی ذرات تقویت کننده، پایداری سازی فاز بتا به صورت کامل اتفاق نیفتاده و فازهای بتای غنی از مولیبدن به صورت آشکار در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود و به دلیل پایین بودن و کافی نبودن دمای تف جوشی و عدم نفوذ کامل مولیبدن در تیتانیوم زمینه مولیبدن‌های باقیمانده در سطح سبب ایجاد تخلخل در اطراف مولیبدن شده است. در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد نمونه‌ها چگال نمی‌باشند. زمینه نمونه شامل حفرات و تخلخل‌های متعدد است که با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده از میزان تخلخل‌ها کاسته شده است و چگالی تف جوشی نمونه‌ها افزایش یافته است. در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت کننده، فاز بتای پایدار غنی شده توسط مولیبدن وجود دارد. در میان نمونه‌ها کمترین چگالی جریان خوردگی برای نمونه ۴-۱۱۵۰ است که نشان دهنده بالاترین مقاومت خوردگی با بیشترین درصد فاز تقویت کننده درصد وزنی ذرات سرامیکی TiC و TiB₂ برابر ۴ درصد وزنی است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه صنعتی تبریز (سهند) بابت فراهم آوردن مواد و تجهیزات آزمایشگاهی جهت استفاده در این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] F.F. Cardoso, P.L. Ferrandini, E.S. Lopes, A. Cremasco, and R. Caram, Ti-Mo alloys employed as biomaterials: Effects of composition and aging heat treatment on microstructure and mechanical behavior, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, Vol. 32, 2014, pp. 31-38.
- [2] C. Leyens and M. Peters, Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications, Wiley Online Library, 2006.
- [3] A.S. Namini, M. Azadbeh, and M.S. Asl, Effect of TiB₂ content on the characteristics of spark plasma sintered Ti-TiB_w composites, Advanced Powder Technology, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 1564-1572.
- [4] M.J. Donachie, Titanium: a technical guide, ASM international, 2000.
- [5] G. Lütjering and J. Williams, Titanium, Engineering materials and processes, Springer Berlin/Heidelberg, Germany, 2007.
- [6] G. Senopati, R.A. Rahman Rashid, I. Kartika, and S. Palanisamy, Recent Development of Low-Cost β -Ti Alloys for Biomedical Applications: A Review, Metals, Vol. 13, No. 2, 2023, pp. 194.
- [7] A.S. Namini, A. Motallebzadeh, B. Nayeibi, M.S. Asl, and M. Azadbeh, Microstructure-mechanical properties correlation in spark plasma sintered Ti-4.8 wt.% TiB₂ composites. Materials Chemistry and Physics, Vol. 223, 2019, pp. 789-796.
- [8] E.-B. Lee, M.-K. Han, B.-J. Kim, H.-J. Song, and Y.-J. Park, Effect of molybdenum on Ti alloys' microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior. International journal of materials research, Vol. 105, No. 9, 2014, pp. 847-853.
- [9] R. Kumar, M. Antonov, L. Liu, and I. Hussainova, Sliding wear performance of in-situ spark plasma sintered Ti-TiB_w composite at temperatures up to 900 °C, Wear, Vol. 476, 2021, pp. 203663.
- [10] م. بزرگ، م. امیرجان، اثر اندازه ذرات بر خواص و رفتار خوردگی کامپوزیت Cu-Al₂O₃ تهیه شده به روش تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS). مجله علوم و مهندسی خوردگی، جلد ۹، شماره ۲، ۲۰۲۰، صفحات ۴۴ - ۳۳.
- [11] G.K. Chandan, R. Soundararajan, and R. Balaji, Case study of spark plasma sintering process, Int J Innov Res Sci Eng Technol, Vol. 5, 2016, pp. 94-99.
- [12] M. Eriksson, Z. Shen, and M. Nygren, Fast densification and deformation of titanium powder, Powder metallurgy, Vol. 48, No. 3, 2005, pp. 231-236.

- [13] M. Zadra, F. Casari, L. Girardini, and A. Molinari, Microstructure and mechanical properties of cp-titanium produced by spark plasma sintering, *Powder Metallurgy*, Vol. 51, No. 1, 2008, pp. 59-65.
- [14] J. Bustillos, C. Zhang, A. Loganathan, B. Boesl, and A. Agarwal, Ultralow temperature densification of a titanium alloy by spark plasma sintering, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 22, No. 6, 2020, pp. 2000076.
- [15] م. محمدطاهری، آ. یزدانی، م. بزرگ، اثر دمای تف جوشی روی خواص کامپوزیت تیتانیوم آلومینا هیدروکسی آپاتیت ساخته شده به روش تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای. *مجله علوم و مهندسی خوردگی*، جلد ۱۰، شماره ۱، ۲۰۲۱، صفحات ۳۳-۴۶.
- [16] M.S. Asl, A.S. Namini, A. Motallebzadeh, and M. Azadbeh, Effects of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered titanium, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 203, 2018, pp. 266-273.
- [17] I. Solodkyi, V. Petrusha, M.A. Grigoroscutea, J. Schmelzer, G. Hasemann, U. Betke, P. Badica, and M. Krüger, Efficient Sintering of Mo Matrix Composites- A Study of Temperature Dependences and the Use of the Sinter Additive Ni, *Metals*, Vol. 13, No. 10, 2023, pp. 1715.
- [18] M.S. Asl, S.A. Delbari, M. Azadbeh, A.S. Namini, M. Mehrabian, V.-H. Nguyen, Q. Van Le, M. Shokouhimehr, and M. Mohammadi, Nanoindentational and conventional mechanical properties of spark plasma sintered Ti-Mo alloys, *Journal of materials research and technology*, Vol. 9, No. 5, 2020, pp. 10647-10658.
- [19] A. Sabahi Namini and M. Azadbeh, Microstructural characterization and mechanical properties of spark plasmasintered TiB_2 -reinforced titanium matrix composite, *Powder Metallurgy*, Vol. 60, No. 1, 2017, pp. 22-32.
- [20] A. Mohammadzadeh, A.S. Namini, M. Azadbeh, and A. Motallebzadeh, On the physical and mechanical properties of spark plasma sintered pure Ti and Ti-TiB composite, *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 12, 2018, pp. 126512.
- [21] S.A. Delbari, A.S. Namini, and M.S. Asl, Hybrid Ti matrix composites with TiB_2 and TiC compounds. *Materials Today Communications*, Vol. 20, 2019, pp. 100576.
- [22] S.A. Delbari, A.S. Namini, M. Azadbeh, Z. Ahmadi, V.-H. Nguyen, Q. Van Le, M. Shokouhimehr, M.S. Asl, and M. Mohammadi, Post hot rolling of spark plasma sintered Ti-Mo- B_4C composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 799, 2021, pp. 140214.
- [23] A. Sabahi Namini, M. Azadbeh, and M. Shahedi Asl, Effects of in-situ formed TiB whiskers on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti- B_4C and Ti- TiB_2 composites, *Scientia Iranica*, Vol. 25, No. 2, 2018, pp. 762-771.
- [24] A. Sabahi Namini, A. Motallebzadeh, B. Nayeibi, M. Shahedi Asl, and M. Azadbeh, Microstructure-mechanical properties correlation in spark plasma sintered Ti-4.8 wt.% TiB_2 composites, *MATERIALS CHEMISTRY AND PHYSICS*, Vol. 223, No. 1, 2019, pp. 789-796.
- [25] K.S. Munir, Y. Li, J. Lin, and C. Wen, Interdependencies between graphitization of carbon nanotubes and strengthening mechanisms in titanium matrix composites, *Materialia*, Vol. 3, 2018, pp. 122-138.
- [26] M. Eriksson, D. Salamon, M. Nygren, and Z. Shen, Spark plasma sintering and deformation of Ti- TiB_2 composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 475, No. 1-2, 2008, pp. 101-104.
- [27] L. Dong, B. Xiao, Y. Liu, Y. Li, Y.Q. Fu, Y. Zhao, and Y. Zhang Sintering effect on microstructural evolution and mechanical properties of spark plasma sintered Ti matrix composites reinforced by reduced graphene oxides, *Ceramics International*, Vol. 44, No. 15, 2018, pp. 17835-17844.
- [28] S.D. Oguntuyi, M.B. Shongwe, L. Tshabalala, O.T. Johnson, and N. Malatji, Effects of SiC on the microstructure, densification, hardness, and wear performance of TiB_2 ceramic matrix composite consolidated via spark plasma sintering, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 48, No. 3, 2023, pp. 2889-2903.
- [29] Y. Wang, H. Zhang, X. Cheng, X. Mu, N. Xiong, K. Feng, and H. Duan, Enhancing the strength and ductility of network titanium matrix composites by utilizing nano-sized TiB and La_2O_3 distributed at grain boundaries and within grains, *Materials Science and Engineering: A*, 2025, pp. 147948.
- [30] H. Tang, J. Wang, and M. Qian, Porous titanium structures and applications, in *Titanium powder metallurgy*, Elsevier, 2015, pp. 533-554.
- [31] A.S. Namini, S.A.A. Dilawary, A. Motallebzadeh, and M.S. Asl, Effect of TiB_2 addition on the elevated temperature tribological behavior of spark plasma sintered Ti matrix composite, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 172, 2019, pp. 271-280.
- [32] M.D. Hayat, H. Singh, Z. He, and P. Cao, Titanium metal matrix composites: An overview, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 121, 2019, pp. 418-438.
- [33] H. Singh, M. Hayat, H. Zhang, R. Das, and P. Cao, Effect of TiB_2 content on microstructure and properties of in situ Ti-TiB composites, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 26, 2019, pp. 915-924.

