

سنتز درجای کامپوزیت زمینه فلزی Ti-TiC به کمک امواج مایکروویو

محمد حسین شریعت نژاد^۱، محمد اردستانی^{۲*}، محمد معظمی گودرزی^۳، تورج عبادزاده^۴

۱- گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران m.shariatnezhad@iau.ac.ir

۲- گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ardestani1@iau.ac.ir

۳- گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران moazami@iau.ac.ir

۴- پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران t.ebadzadeh@merc.ac.ir

خلاصه

در تحقیق پیش رو سنتز درجای کامپوزیت زمینه فلزی Ti-TiC به کمک امواج مایکروویو مورد بررسی قرار گرفته است. از پودر تیتانیم و گرافن جهت سنتز این کامپوزیت استفاده گردید. پس از آسیا و فشردن سازی مخلوط تیتانیم و گرافن، پودرهای آسیا شده فشردن سازی سرد شده و در دماهای ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰ °C تحت امواج مایکروویو تف جوشی شدند. نتایج بررسیهای ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بیانگر ساختار فشردن کامپوزیتهای سنتز شده و نیز تشکیل درجای TiC در اثر واکنش تیتانیم و کربن در زمینه تیتانیمی بود. نتایج سختی نشان داد که سختی نمونههای تف جوشی شده در دمای ۱۳۰۰ °C از سایر نمونهها بالاتر بوده و این دما به عنوان دمای بهینه تف جوشی تعیین گردید.

کلمات کلیدی: کامپوزیت تیتانیم-کاربیدتیتانیم؛ تف جوشی؛ مایکروویو؛ سختی؛ ریزساختار

۱. مقدمه

تیتانیم و آلیاژهای آن به دلیل خواص منحصر به فردشان مانند چگالی پایین، استحکام ویژه بالا و مقاومت به خوردگی عالی در کاربردهای مختلفی نظیر تولید برق، صنایع خودرو و ساخت قطعات مورد استفاده در بدن انسان بکار می روند [1-3]. علیرغم این خواص مطلوب، سختی و مقاومت به سایش این دسته از مواد مطلوب نبوده و کمتر از حد موردنظر در کاربردهای اشاره شده است. به منظور ارتقا سختی و مقاومت به سایش تیتانیم و آلیاژهای آن روش کامپوزیت سازی یا اضافه نمودن ذرات مقاوم فلزی یا سرامیکی به زمینه تیتانیمی بکارگرفته می شود. با افزودن این ذرات مقاوم به زمینه، سختی و مقاومت به سایش آلیاژ افزایش یافته و عمر کاری قطعات افزایش می یابد. از مقاوم سازهای مختلفی نظیر ترکیبات سرامیکی کاربیدی، اکسیدی، بورایدی و سیلیسایدی نظیر کاربید تیتانیم (TiC)، تیتانیم بوراید (TiB)، تیتانیم سیلیساید (Ti₅Si₃)، کاربید بور (B₄C) و اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) به عنوان تقویت کننده در زمینه تیتانیمی استفاده شده است. روشهای مختلفی جهت ساخت کامپوزیتهای زمینه تیتانیمی استفاده شده است. یکی از مهمترین این روشها، روش متالورژی پودر می باشد. در این روش پودر تیتانیم و یا آلیاژی از آن با پودر مقاوم ساز مخلوط شده و پس از فشردن سازی سرد تف جوشی می گردند. تف جوشی را می توان بدون انجام فشردن سازی سرد انجام داد. در این روش، تف جوشی همزمان با اعمال فشار انجام می گردد. روش پلاسمای سرد جرقه ای، یکی از این نوع روشها می باشد. در این روش، با عبور جریان الکتریکی پالسی از پودر تحت فشارهای پایین، چگالش پودر انجام می شود. این روش را می توان در اتمسفر خنثی و یا در خلا انجام داد. مدت

زمان انجام این روش بسته به نوع پودر حدود ۵ الی ۱۰ دقیقه می باشد [4-8].

در بعضی از تحقیقات انجام شده، به جای استفاده از پودرهای اولیه تیتانیوم و مقاوم ساز، از روش درجا برای تولید مقاوم ساز استفاده می شود. در این روش، تشکیل ترکیب مقاوم ساز در حین فرایند تولید کامپوزیت انجام می گردد. کامپوزیتهای تیتانیوم- کاربید تیتانیوم (Ti/TiC) یکی از انواع مقاوم سازهایی که از طریق روش درجا می توان آنها را تولید نمود. تحقیقات زیادی در زمینه ساخت کامپوزیتهای Ti-TiC از طرق مختلف انجام شده است. در این تحقیقات تاثیر عوامل مختلف سنتز بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیتهای Ti-TiC مورد بررسی قرار گرفته است. از روشها و مواد اولیه متفاوتی برای تولید این کامپوزیتهای استفاده شده است. لی و همکارانش سنتز کامپوزیت Ti-TiC را از طریق درجا و به کمک فرایند تف جوشی پلاسمای جرقه ای مورد بررسی قرار دادند [9]. نتایج آنها نشان داد که با اضافه نمودن TiC به زمینه تیتانیومی استحکام تسلیم در شرایط بهینه سنتز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. در تحقیقات دیگری ما و همکارانش اثر TiC بر استحکام دهی زمینه تیتانیومی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که ذرات TiC از طریق جلوگیری از حرکت نابجاییها باعث استحکام زمینه می شوند [10]. در پژوهش دیگری لی و همکاران سنتز کامپوزیت Ti-TiC را از طریق روشهای تف جوشی پلاسمای جرقه ای و تف جوشی از طریق تخلیه الکتریکی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که سختی نمونه های سنتز شده از طریق روش تخلیه الکتریکی از روش دیگر بیشتر بوده است [11].

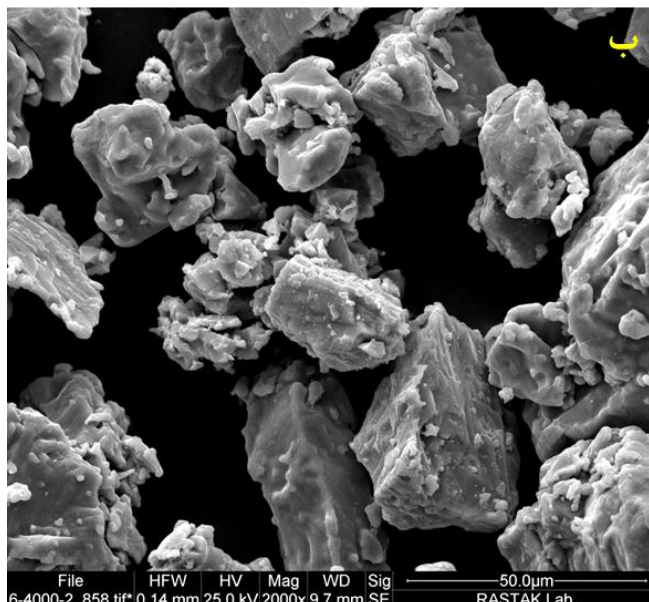
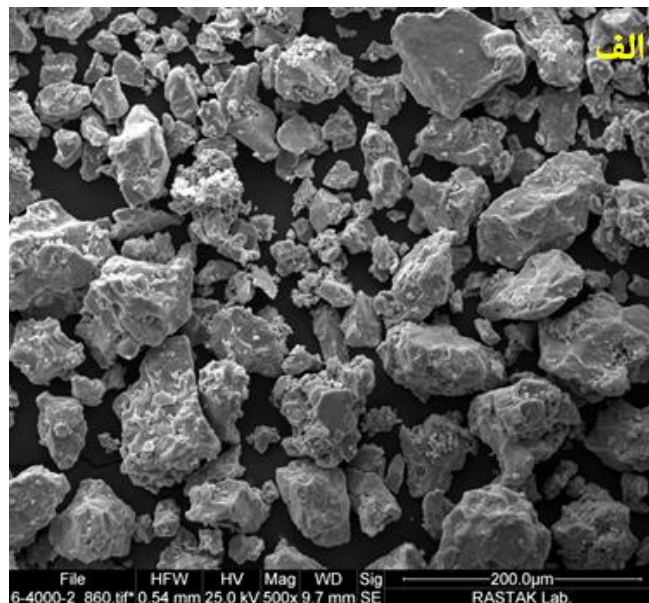
علی رغم تحقیقات انجام شده بر روی سنتز و متراکم سازی کامپوزیت Ti-TiC، تا کنون پژوهشی در مورد سنتز این کامپوزیت به کمک روش تف جوشی به کمک میکروویو انجام نشده است. در این تحقیق بررسی سنتز کامپوزیت Ti-TiC از روش مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که در فرایند انجام شده، روش سنتز درجای TiC به کمک گرافن بکار گرفته شده است.

۲. روش تحقیق

از پودر تیتانیوم (خلوص ۹۹ درصد و نانو ورق گرافن (GNP) به عنوان مواد اولیه استفاده شد. به منظور سنتز پودرهای کامپوزیتی، مخلوط پودری $Ti/0.5 \text{ wt\%GNP}$ بصورت تر در محیط اتانول به مدت ۵ ساعت در یک آسیاب ماهواره ای آسیاب شدند. نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۵ و سرعت دورانی آسیاب ۲۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. گلوله ها و محفظه آسیا نیز از فولاد زنگ نزن ساخته شده بودند. پس از آسیاب، ذرات پودری به مدت ۱۰ ساعت در دمای 80°C آسیاب شدند. خشک شدند. پودرهای آسیاب شده در یک قالب فولادی با قطر ۲۵mm تحت فشار 600 MPa فشرده سازی سرد شدند. تف جوشی نمونه های فشرده شده در دماهای ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و 1400°C توسط میکروویو به مدت ۱ ساعت تف جوشی شدند. چگالی نمونه های سنتز شده توسط روش ارشمیدوس تعیین گردید. سختی ویکرز نمونه های تف جوشی شده بر طبق استاندارد E92 به کمک سختی سنج یونیورسال ولپرت UH930 تحت اعمال نیروی ۹۸ N در مدت زمان ۱۰ ثانیه تعیین گردید. سختی گزارش شده میانگین پنج سختی اندازه گیری شده بود. ریزساختار پودرهای اولیه و آسیا شده و نیز ریزساختار نمونه های تف جوشی شده توسط میکروسکوپ روبشی الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.

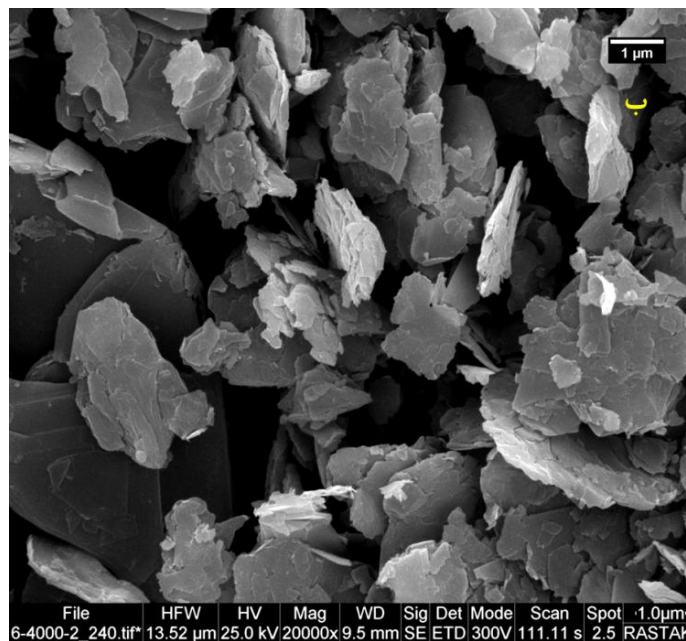
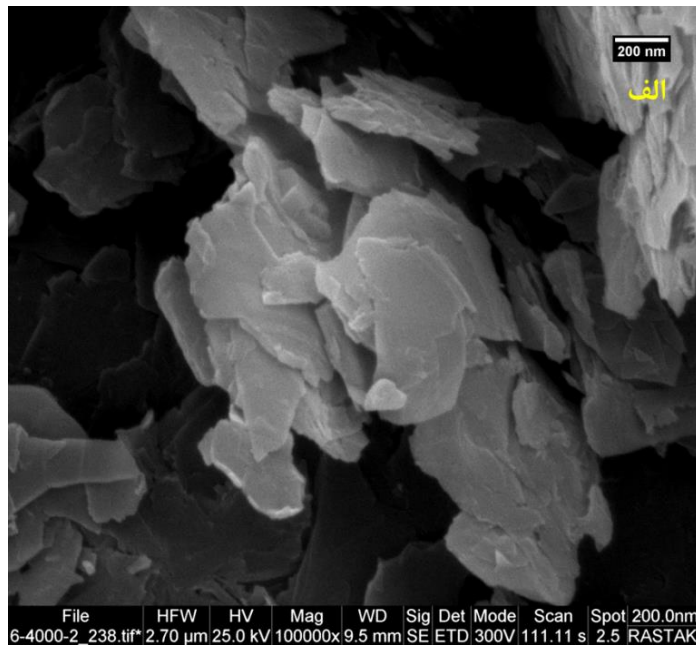
۳. نتایج و بحث

شکل ۱ نشان دهنده ذرات پودری تیتانیم اولیه در بزرگنماییهای مختلف می باشد. همانطور که مشاهده می شود، اندازه ذرات پودری عمدتاً کمتر از $200\ \mu\text{m}$ و مورفولوژی آنها نامنظم بوده تا حدودی بلوکی شکل می باشد.



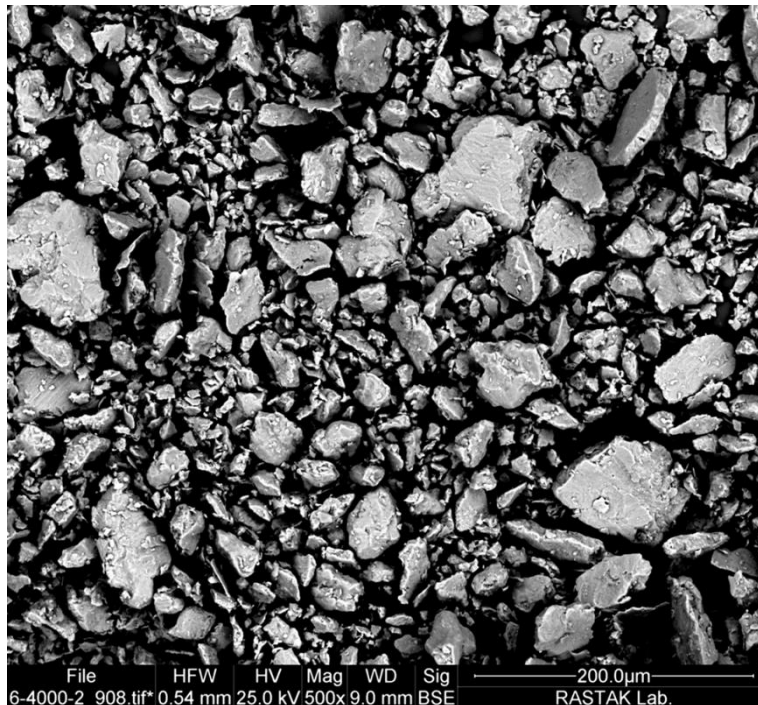
شکل ۱. (الف) و (ب) تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از ذرات پودری تیتانیم اولیه در بزرگنماییهای مختلف.

شکل ۲ نشان دهنده ریزساختار ذرات گرافن را نشان می دهد. مورفولوژی ورقه ای شکل گرافن و ضخامت بسیار پایین آنها در این اشکال قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲. (الف) و (ب) تصویر میکروسکپ الکترون روبشی از ذرات گرافن در بزرگنماییهای مختلف.

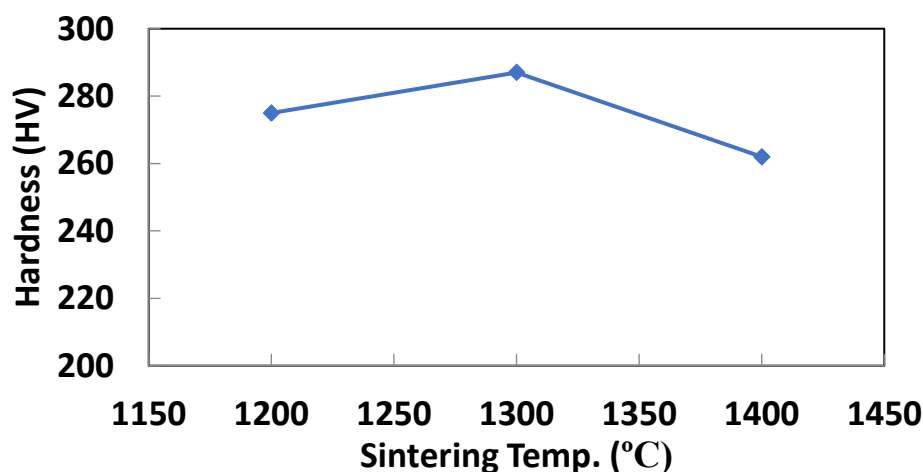
شکل ۳ مورفولوژی ذرات پودری مخلوط شده تیتانیم و گرافن آسیا شده را نشان می‌دهد که بیانگر اختلاط مطلوب ذرات تیتانیم و گرافن با یکدیگر است.



شکل ۳. تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی آسیاب شده تیتانیوم و گرافن.

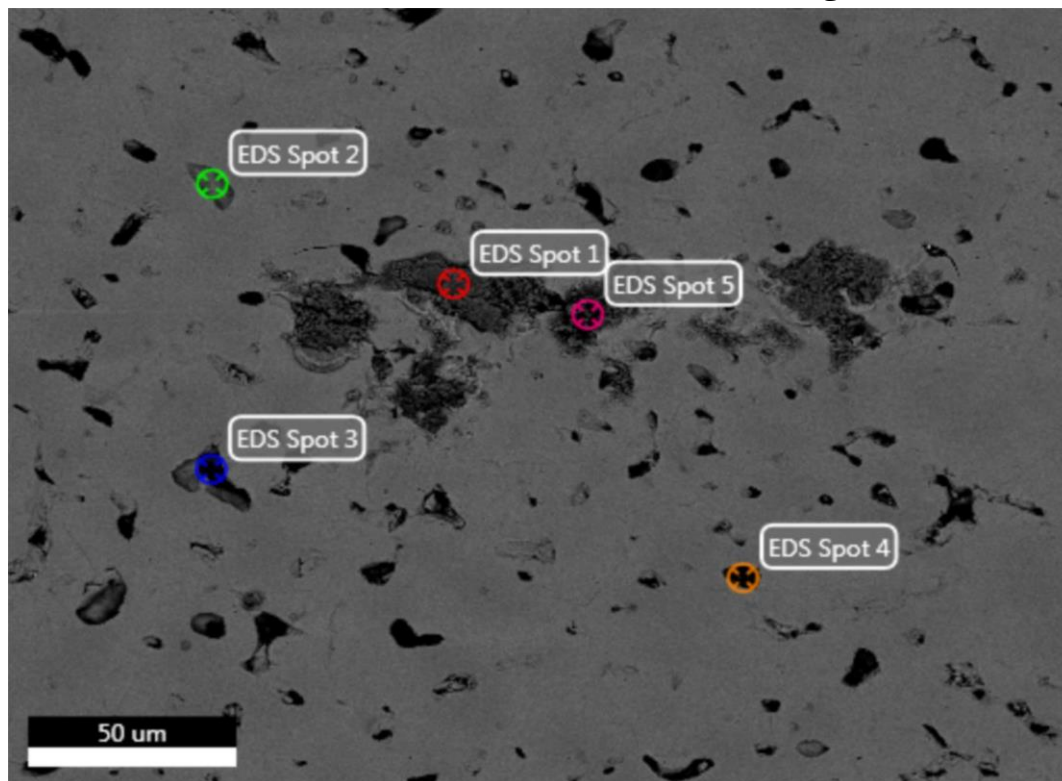
شکل ۴ نشان دهنده تاثیر دمای تف جوشی بر سختی نمونه‌های تف جوشی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سختی نمونه‌های تف جوشی شده در دمای 1300°C از سختی سایر نمونه‌های تف جوشی شده بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که تخلخل نمونه‌های تف جوشی شده در این دما از سایر نمونه‌ها کمتر بوده و این دما، دمای بهینه تف جوشی می‌باشد.

Hardness Data



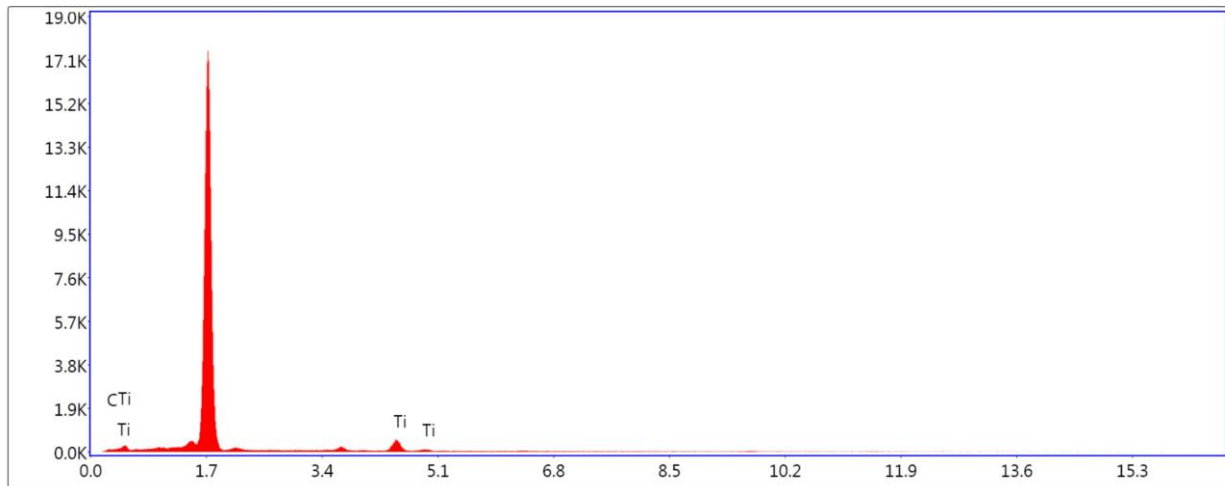
شکل ۴. نمودار سختی بر حسب دمای تف جوشی برای نمونه‌های تف جوشی شده.

شکل ۵ نشان دهنده ریزساختار نمونه‌های تف جوشی شده تیتانیوم- گرافن به همراه نتایج آنالیز نقطه‌ای آن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود ریزساختار نمونه سنتز شده از تراکم مطلوبی برخوردار می‌باشد که بیانگر تف جوشی مناسب آن از روش میکروویو است. نتایج آنالیز نقطه‌ای از مناطق مختلف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، در نقاط ۱ و ۲ و ۳ نتایج آنالیز عمدتاً شامل تیتانیوم و نقاط ۴ و ۵ نشان‌دهنده وجود تیتانیوم و کربن است. وجود تیتانیوم و کربن بیانگر واکنش بین کربن و تیتانیوم و تشکیل TiC در این نقاط است. این نتیجه بیانگر آن است که روش میکروویو روشی مناسب جهت تشکیل درجای TiC در زمینه تیتانیومی است.



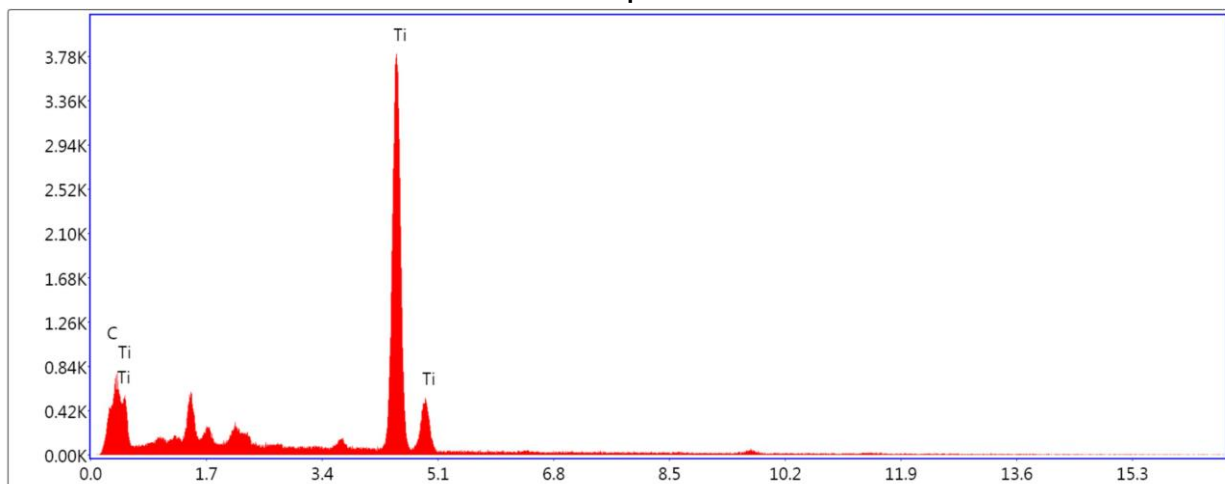
Point	Element	Weight %	Atomic %
1	C	0	0.01
	Ti	100	99.99
2	C	0.01	0.04
	Ti	99.99	99.96
3	C	0	0
	Ti	100	100
4	C	4.31	15.23
	Ti	95.69	84.77
5	C	15.13	41.55
	Ti	84.87	58.45

EDS Spot 4



Lsec: 15.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Element-C2B Det

EDS Spot 5



Lsec: 15.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Element-C2B Det

شکل ۵. ریزساختار نمونه‌های تف جوشی شده در 1300°C ، جدول آنالیز ترکیب شیمیایی نقاط مختلف نشان داده شده روی شکل و گراف نتایج مربوط به نقاط ۴ و ۵ که تشکیل TiC در آن به وقوع پیوسته.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سنتز کامپوزیت Ti-TiC از طریق روش متالورژی پودر انجام گردید. از گرافن و تیتانیوم به عنوان مواد اولیه استفاده گردید. تف جوشی نمونه‌ها در دماهای 1200°C ، 1300°C و 1400°C توسط میکروویو به مدت ۱ ساعت انجام گردید. مشاهدات ریزساختاری حاکی از ایجاد ساختاری فشرده پس از تف جوشی بود. همچنین تشکیل در جای کاربرد تیتانیوم در زمینه فلزی توسط بررسی‌های آنالیز ترکیب شیمیایی اثبات گردید. نتایج سختی سنجی نشان داد که سختی نمونه‌های تف جوشی شده در دمای 1300°C از سایر نمونه‌ها بیشتر بوده و این دما به عنوان دمای بهینه تف جوشی تعیین گردید.

۵. مراجع

1. Ha, H.J., Kim M., Han S.J., Moon I.Y., Ham M.J., Lee T.W., Choi S.J., Han H., Kang H., Kim H.G., (2025), "Effect of powder size on Ti-6Al-4V alloy sintered by hot isostatic pressing below beta transus temperature," *Materials Letters*, **388**, 138286.
2. Digole S., Bohara S., Kothapalli C.R., Bjaj B., Borkar T., (2025), "Effect of hexagonal boron nitride (hBN) addition on microstructure, mechanical, and biocompatible properties of spark plasma sintered titanium (Ti) matrix composites," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **168**, 107030
3. Singh H., Hayat M., Huang S., Sui Y., Cao P. (2022), "An In situ neutron diffraction study of phase formation during Ti-Si₃N₄ powder sintering," *Advanced powder Materials*, **1**, 100001.
4. Yongxia Wang Y. , Fan W., Zhou F., Prashanth K.G., Feng Z. , Zhang S. , Tan H., Lin X., (2025), "The influence of process parameters on the microstructure and properties of the TiC/Ti-alloy composites fabricated by the directed energy deposition process", *Journal of Materials Research and Technology*, **34**, pp.164–174.
5. Chen Y., Ghaffarigharehbagh A., Xiao S. (2025), "Studies of TiB and Ti-TiB composites at multiple scales," *Journal of Alloys and Compounds*, 1026, 180441.
6. Zhang X., Peng C., Yin C., Liu Y., Liang J., Chen G., Chen R., Wang S. (2025), "Microstructural evolution and mechanical properties in rapid sintered Ti₅Si₃/Ti matrix composites with varying Si additions", *Vacuum*, **238**, 114240
7. Meir S., Kalabukhov S., Frage N., Hayun S. (2015), "Mechanical properties of Al₂O₃/Ti composites fabricated by spark plasma sintering", *Ceramics International*, **41B(3)**, pp. 4637-4643
8. Jiang D., Cui H., Zhao X., Chen H., Ma G., Song X. (2022), "Reaction mechanism and friction behavior of an in-situ Ti/B₄C composite synthesized by spark plasma sintering", *Ceramics International*, **48A(23)**, pp. 34341-34349
9. Lei C., Du Y., Zhu M., Huo W., Wu H., Zhang Y., (2021), "Microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites with a laminated structure synthesized by spark plasma sintering", *Materials Science & Engineering A*, **812**, 141136
10. Ma F., Zhou J., Liua, P., Li W., Liu X., Pana P., Lu W., Zhang D., Wu L., Wei X., (2017), Strengthening effects of TiC particles and microstructure refinement in in situ TiC-reinforced Ti matrix composites", *Materials Characterization*, **127**, pp 27-34.
11. Lee W.H., Seong J.G., Yoon Y.H., Jeong C.H., C.J. Tyne V., Lee H.G., Chang S.Y., (2019), "Synthesis of TiC reinforced Ti matrix composites by spark plasma sintering and electric discharge sintering: A comparative assessment of microstructural and mechanical properties", *Ceramics International*, **45**, pp. 8108-8114.