

## بررسی تاثیر افزودن اکسید وانادیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینیوم-اکسید وانادیم تهیه شده به روش پلاسمای جرقه‌ای

فاطمه زرغامی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر فراشینی<sup>۱</sup> و منصور رضوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه مواد و متالورژی، کرج، ایران.

<sup>۲</sup>پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۱۰/۲۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۲/۲۵

**چکیده** کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل خواص مکانیکی مطلوب به خصوص استحکام ویژه بسیار بالا در صنایع هوافضا و خودروسازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در این پژوهش تاثیر افزودنی اکسید وانادیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه آلومینیوم تهیه شده به وسیله تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای بررسی شد. پودر اکسید وانادیم پنج ظرفیتی به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی توسط مخلوطکن پراثرژی اسپکس (SPEX) با پودر آلومینیوم در محیط تر مخلوط شد و سپس مخلوط حاصل در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بر روی هیتر خشک شد. فرآیند تف‌جوشی توسط روش پلاسمای جرقه ای در دماهای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط خلأ و در فشار اولیه ۱۰ و فشار پایانی ۳۰ مگاپاسکال انجام شد. نتایج الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل موضعی از فاز آلومیناید وانادیم و کاهش ظرفیت اکسید وانادیم را با افزایش دمای تف‌جوشی نشان داد. نتایج بررسی خواص مکانیکی بیان‌کننده بیشترین میزان استحکام خمشی ( $141 \pm 11$  مگا پاسکال) و سختی ( $103 \pm 12$  ویکرز) برای نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تف‌جوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده توزیع نسبی یکنواخت فاز تقویت‌کننده در ریزساختار بوده و به دلیل ذوب موضعی اکسید وانادیم در فصل مشترک ذرات آلومینیوم مخلوطی از فازهای اکسیدی مشاهده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** آلومینیوم، اکسید وانادیم، کامپوزیت، تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای.

## The Effect of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Composites Prepared by Spark Plasma Sintering

Fatemeh Zarghami<sup>1\*</sup>, Ali Akbar Farashiani<sup>1</sup> and Mansour Razavi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karaj branch of Islamic Azad University, Department of materials engineering, Karaj, Iran.

<sup>2</sup>Materials and energy research center, Department of ceramic, Karaj, Iran.

**Abstract** In this present study, 5, 10 and 15 wt% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were added to aluminum matrix and the microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered composites were investigated. The mixing process was conducted in ethanol media with high energy mixer mill and then the mixture was heated on the hot plate at 70°C. The sintering process was performed at the 400 and 450°C with vacuum condition and 10 and 30 MPa initial and final applied pressure, respectively. The XRD patterns showed interfacial product of Al<sub>3</sub>V and reduction-transition in oxygen content by increasing of sintering temperature. The mechanical properties investigation revealed highest bending strength of  $141 \pm 11$  MPa and Vickers hardness of  $103 \pm 12$  (VHN) for specimens with 15wt% of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and sintered at 450°C. The FESEM images showed almost uniform distribution of reinforcement and local melting area with different types of vanadium oxide.

**Keywords:** Aluminum, Vanadium pentoxide, Composite, Spark plasma sintering.

## ۱- مقدمه

عمده‌ترین مشکل در این مجموعه روش‌ها توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده و معایب اصلی روش ریخته‌گری شامل انقباض آلیاژها و پدیده‌هایی هم‌چون عدم یکنواختی ترکیب به دلیل سرعت سرمایش متفاوت می‌باشد [۱۷]. از سوی دیگر، روش متالورژی پودر با مزیت توزیع بهتر ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیوم با عمده‌ترین مشکل رسیدن به چگالی نسبی بالا و به نوعی حذف تخلخل‌ها روبرو است [۱۸].

در میان روش‌های مختلف تف‌جوشی، فرآیند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای، با بهره‌گیری از شرایط خلأ، اعمال فشار در حین حرارت دهی، ایجاد جرقه و پلاسما و تمیز نمودن سطح ذرات به دلیل محیط یونیزه، به‌طور عمده منجر به تهیه قطعات با چگالی نسبی بالغ بر ۹۸ درصد چگالی تئوری می‌گردد. در این روش حرارت‌دهی و تف‌جوشی، سرعت بالای تهیه قطعات و بررسی‌های پارامترهای تف‌جوشی هم‌چون انقباض لحظه‌ای نمونه‌ها، این مزیت را به‌همراه دارد که در حین فرآیند تولید امکان سنجش تقریبی از وضعیت چگالش نمونه‌ها موجود بوده و به نوعی با افزایش فشار و دمای تف‌جوشی می‌توان چگالش را تکمیل نمود [۱۹ و ۲۰].

برطبق دانش نویسندگان تاکنون تحقیقی بر روی تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-اکسید وانادیم صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش، تاثیر میزان فاز تقویت‌کننده اکسید وانادیم و دمای تف‌جوشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم-اکسید وانادیم پنج ظرفیتی بررسی شد.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش، پودر آلومینیوم ۱۰۵۶ (Merck-1056) با متوسط اندازه دانه ۴۵ میکرومتر و اکسید وانادیم (Merck-100824) با خلوص ۹۹٫۵ درصد و متوسط اندازه ذرات دو میکرومتر به عنوان مواد اولیه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

پودرهای آلومینیوم و اکسید وانادیم با نسبت وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سپس توسط دستگاه اسپکس (Spex-Mixer Mill 8000D) در محیط الکل مخلوط و به منظور خروج الکل در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شدند. پس از اختلاط، پودرهای مخلوط شده به صورت مستقیم وارد

کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل خواص مطلوب و منحصربه‌فرد خود در صنایع پیشرفته هم‌چون صنایع خودروسازی و هوافضا بسیار پرکاربرد می‌باشند. در میان کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل دارا بودن استحکام ویژه بالا، مقاومت شیمیایی و ضریب انتقال حرارت مناسب از جایگاه ویژه‌ای در صنایع کاربردی برخوردار می‌باشند [۱-۶].

از جمله ذرات تقویت‌کننده در زمینه آلومینیوم می‌توان به ذرات کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم اشاره نمود که تا کنون تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. هر چند که بسیاری دیگر از ترکیبات سرامیکی سخت نیز به آلومینیوم به عنوان فاز تقویت‌کننده، هم‌چون کاربید تیتانیوم [۷]، کاربید بور [۵]، دی بوراید زیرکونیوم [۸]، نیتريد سیلیسیم [۹]، زیرکن [۱۰]، اکسید تیتانیوم [۱۱] و ... اضافه شده‌اند اما از جمله ذرات کمتر متعارف افزوده شده به زمینه آلومینیوم می‌توان به اکسید وانادیم پنج ظرفیتی اشاره نمود. در سال ۲۰۱۷ انوری و همکاران [۱۲] مخلوطی از پودرهای اکسید وانادیم و آلومینیوم را ابتدا توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تبدیل به فاز بین‌فلزی  $Al_3V$  نموده و سپس فاز سنتز شده را به آلومینیوم برای تهیه کامپوزیت اضافه کردند.

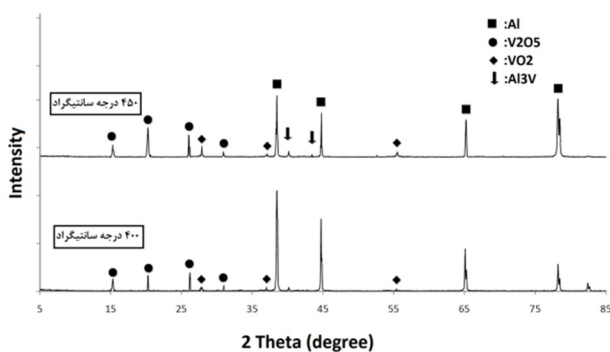
اکسید پنج ظرفیتی وانادیم یک سرامیک با قابلیت حلالیت محدود در آب، چگالی تقریبی  $4.339 \text{ gr/cm}^3$  و دمای ذوب ۶۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اکسید وانادیم پنج ظرفیتی (پنتا اکسید وانادیم) با ساختار ارتورومبیک و رنگ زرد موجود بوده که ضریب هدایت حرارتی طولی معادل  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  دارد. اکسید وانادیم به‌طور عمده به عنوان کاتالیست در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین این اکسید در صنایعی چون صنایع لیزر، صنایع نوری، تولید نانوالیاف‌ها و نانورشته‌ها و به عنوان افزودنی در آلیاژها، کامپوزیت‌ها و سرامیک‌ها کاربرد دارد [۱۳-۱۶].

از جمله روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم می‌توان به مجموعه روش‌های ریخته‌گری و متالورژی پودر اشاره نمود. مجموعه روش‌های ریخته‌گری دارای مزایایی هم‌چون تولید انبوه و تولید در ابعاد بزرگ را دارا هستند ولی

بالا برای سیستم مذکور پیشنهاد دادند [۲۱]:



با توجه به واکنش شماره (۵)، اکسید وانادیم به طور عمده با حرارت‌دهی به ترکیبات با اکسیژن کمتر تبدیل شده که این اکسیژن تولیدی در کنار آلومینیوم قابلیت تشکیل اکسید آلومینیوم را دارا است [۷۴].



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تف‌جوشی شده در دماهای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل ۲ رفتار تف‌جوشی نمونه‌های تهیه شده توسط روش پلاسمای جرقه‌ای را شامل نمودارهای جابجایی/نرخ جابجایی - دما - زمان نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، تف‌جوشی برای تمامی نمونه‌ها شامل سه منطقه اصلی (به‌طور تقریبی) می‌باشد که این مناطق با تبدیل جابجایی به نرخ جابجایی در زمان معین مشخص می‌شود. مرحله اول جابجایی (انقباض به میزان کم) مرتبط با خروج گازها و جرقه‌های اولیه در بین ذرات می‌باشد. مرحله بعدی تف‌جوشی را می‌توان مرتبط با ذوب موضعی و فعل‌وانفعالات شیمیایی موجود در کامپوزیت دانست و مرحله پایانی چگالش مرتبط با افزایش فشار از ۱۰ مگاپاسکال به ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. هم‌چنین مقایسه رفتار تف‌جوشی نمونه‌ها در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر افزایش انقباض کل با افزایش میزان فاز اکسید وانادیم می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل ذوب موضعی بیشتر فاز

قالب گرافیتی به قطر ۳۰ میلی‌متر و با فشار اولیه ۱۰ مگاپاسکال شدند. فرآیند تف‌جوشی در شرایط خلأ (۱۶ پاسکال) و فشار نهایی ۳۰ مگاپاسکال در دماهای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره پلاسمای جرقه‌ای (SPS-20T-10, China صورت گرفت. پس از فرآیند تف‌جوشی، نمونه‌ها جهت برداشتن لایه گرافیتی سطحی در محیط الکل پولیش شدند و جهت انجام آزمون استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها با ابعاد ۵×۵×۲۵ میلی‌متر از قرص اولیه تف‌جوشی شده برش داده شدند. در پایان چگالی نمونه‌ها از طریق روش ارشمیدس اندازه‌گیری و استحکام خمشی نمونه‌ها توسط دستگاه Santam-STm 20 محاسبه شد. جهت بررسی سختی نمونه‌های تهیه شده از دستگاه آزمون میکروسختی (MKV-h21) با بار اعمالی 1Kgf و زمان نگهداری ۱۵ ثانیه و روش ASTM-C1327-08 استفاده شد. از نمونه‌ها آنالیز پراش پرتو ایکس (Philips-pw3710) گرفته شد و هم‌چنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (MIRA 3 TESCAN, Czech Republic) تهیه گردید.

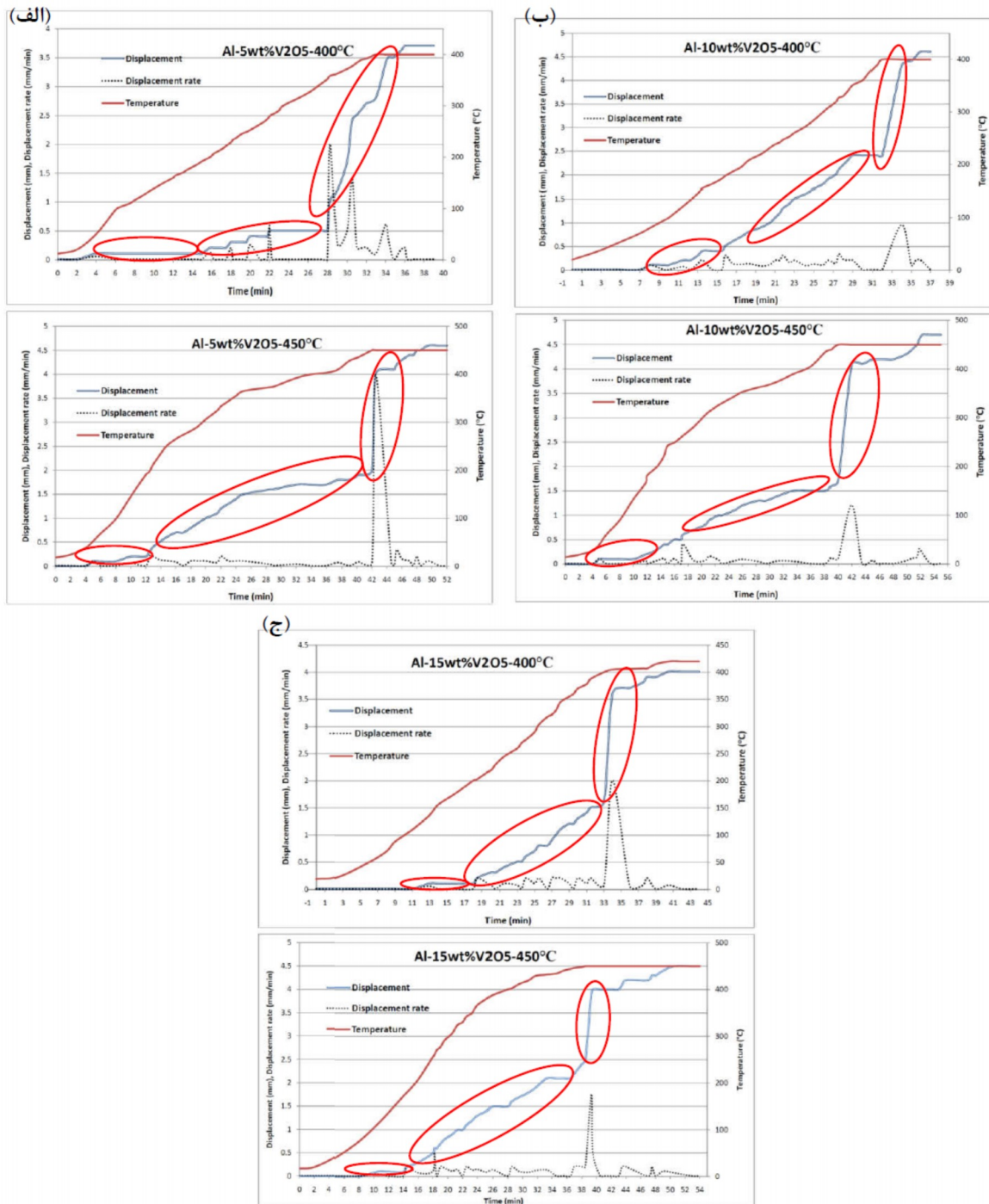
### ۳- نتایج و بحث

شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تف‌جوشی شده در دماهای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱، در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پیک‌های غالب شامل فازهای بلوری آلومینیوم و اکسید پنج ظرفیتی وانادیم به‌همراه مقدار جزئی از اکسید چهار ظرفیتی وانادیم می‌باشد. با توجه به دمای ذوب پایین اکسید وانادیم و هم‌چنین تغییر ظرفیت اکسید وانادیم با افزایش دما، حضور اکسیدها با ظرفیت کمتر وانادیم قابل پیش‌بینی می‌باشد. در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز پیک‌های اصلی شناسایی شده مرتبط با فازهای آلومینیوم، اکسید پنج و چهار ظرفیتی وانادیم و به مقدار جزئی فاز بین فلزی آلومیناید وانادیم می‌باشد.

V. G. Shevchenko و همکاران رفتار اکسیداسیون مخلوط پودر آلومینیوم به همراه ژل آبدار اکسید وانادیم ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) را تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی نمودند. آن‌ها واکنش‌های (۱) تا (۷) را در حرارت‌دهی مخلوط تا دماهای

باشد. بررسی تاثیر افزایش دمای تفجوشی از ۴۰۰ به ۴۵۰ درجه سانتیگراد نیز حاکی از افزایش انقباض کلی نمونهها برای درصدهای مشابه می باشد.

اکسید وانادیم با افزایش میزان آن و تخلیه بار الکتریکی بیشتر به عنوان جرقه باشد. همچنین این روند برای نمونههای تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد نیز مشخص می



شکل ۲. نمودار جابجایی/نرخ جابجایی- دما- زمان برای نمونههای الف) Al-5wt%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ب) Al-10wt%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ج) Al-15wt%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> تهیه شده توسط تفجوشی پلاسما جرقه‌ای.

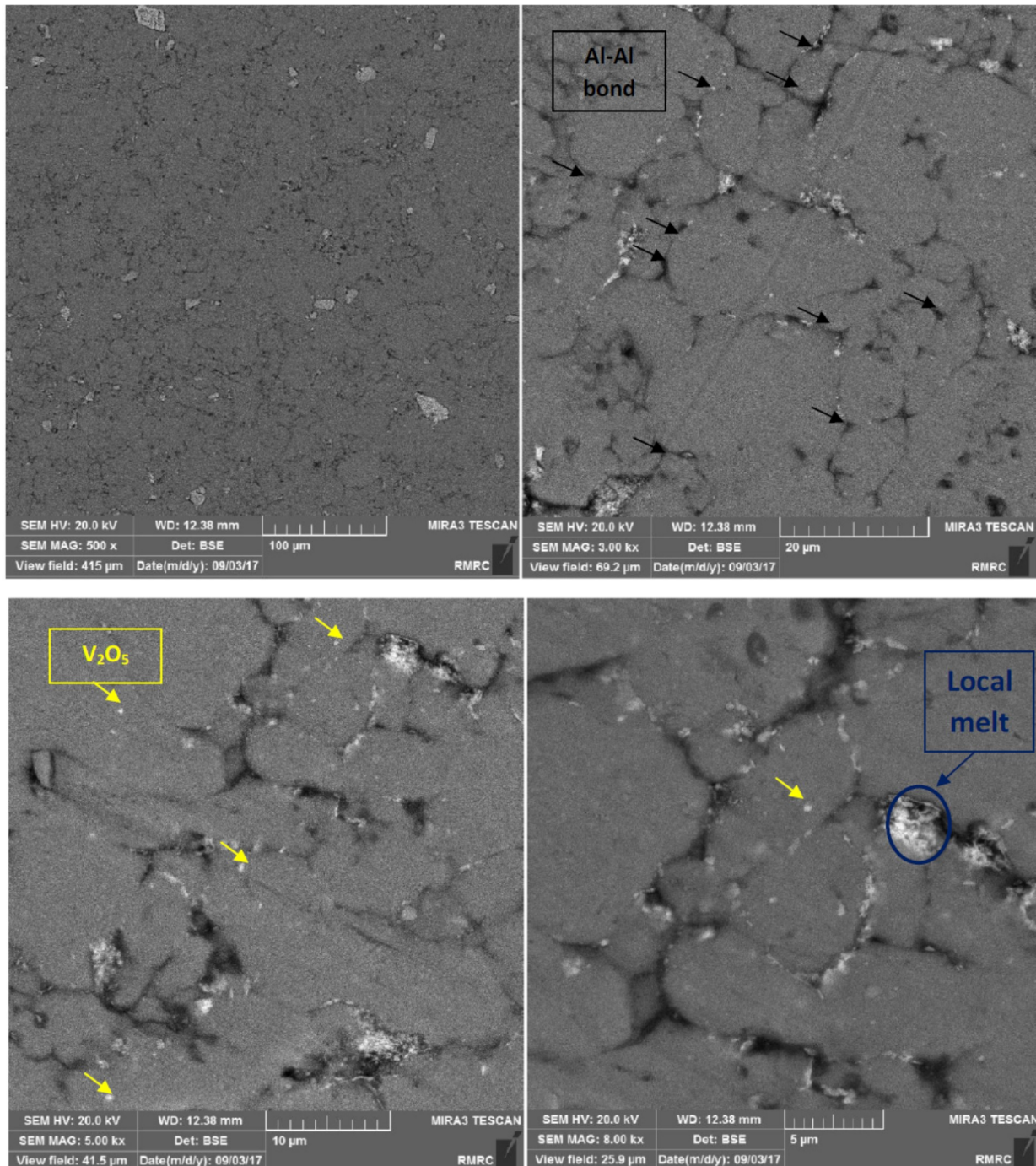
اکسید وانادیم نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، اتصال آلومینیوم- آلومینیوم در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به‌طور کامل انجام نشده و به نوعی مرزخانه‌ها به‌همراه تخلخل در بین

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان در حالت الکترون برگشتی را برای نمونه تفجوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد و حاوی پنج درصد وزنی



۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شرایط لازم برای نفوذ مناسب ذرات را فراهم نکرده و ریزساختار دارای تخلخل‌های فراوانی می‌باشد.

ذرات آلومینیوم مشاهده می‌شود. هم‌چنین ذرات اکسید وانادیم در برخی از نواحی دچار ذوب موضعی شده که در تصویر مشخص می‌باشد. به‌نظر می‌رسد سرعت بالای فرآیند و دمای



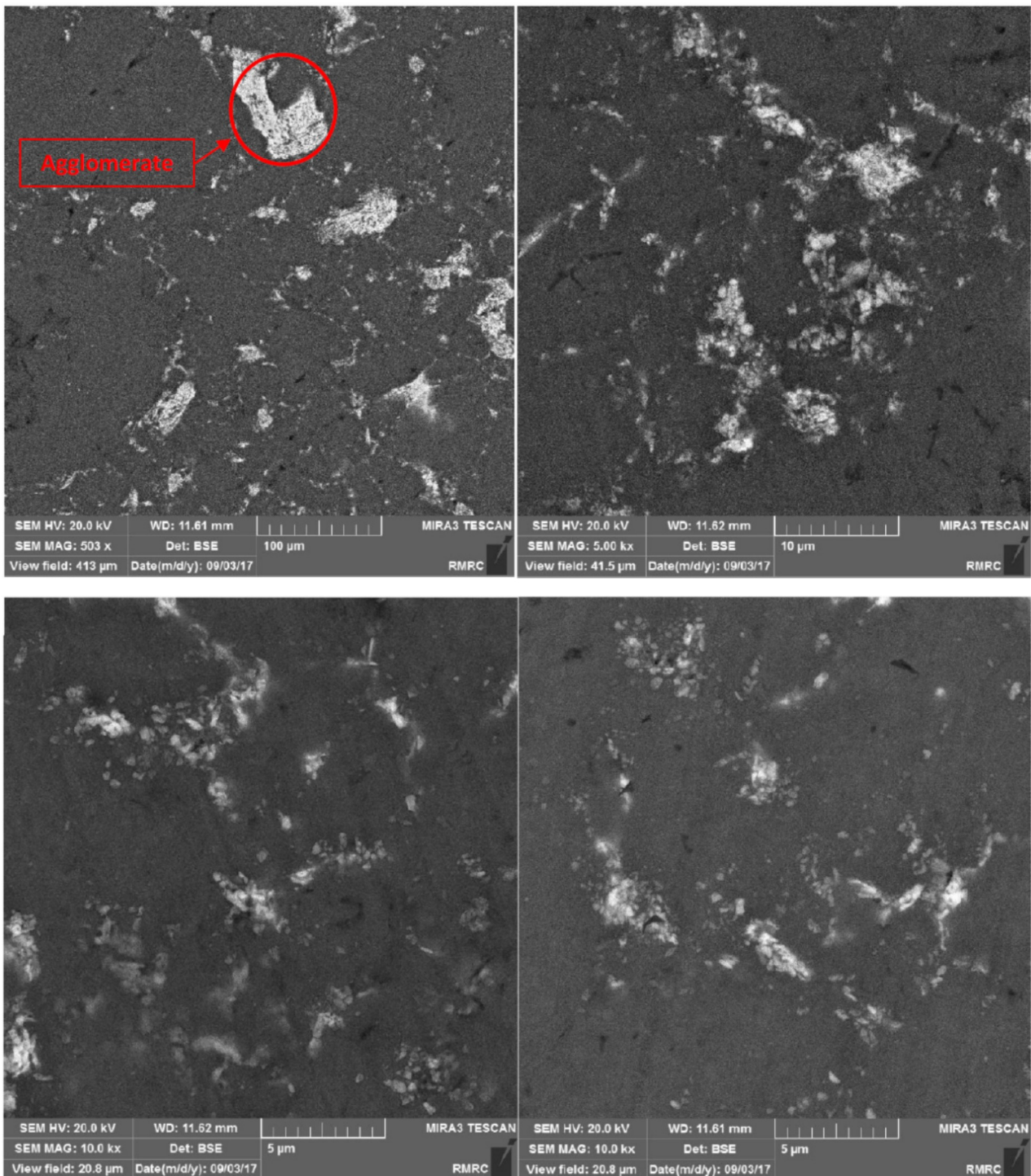
شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه  $\text{Al-5wt}\%\text{V}_2\text{O}_5$  و تفجوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.

دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بهبود یافته که به نظر می‌رسد ذوب موضعی بیشتر اکسید وانادیم سبب سیلان و پر نمودن مرزهای کامل نشده آلومینیوم شده باشد. هم‌چنین می‌توان اختلاف قدرت و اندازه جرقه‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی ۱۰ و

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تصاویر ریزساختار نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تفجوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵، به نوعی اتصال آلومینیوم به آلومینیوم در

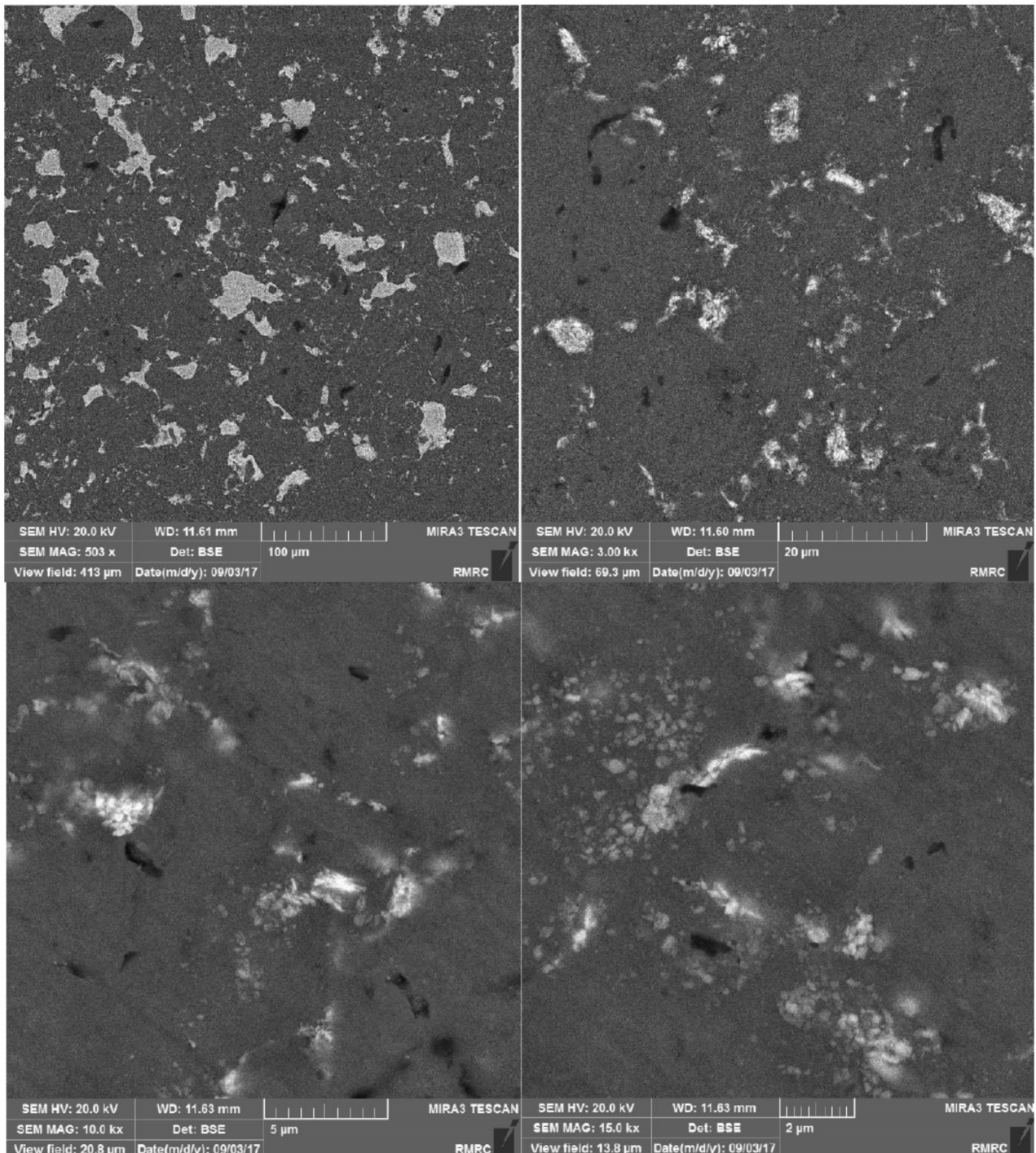
می‌شود. در نهایت، مقایسه اشکال ۳ تا ۵ نشان‌دهنده ایجاد آگلومره با افزایش میزان فاز تقویت‌کننده از پنج به ۱۵ درصد وزنی می‌باشد. ولی با توجه به قابلیت ذوب این اکسید می‌توان گفت که مقدار تخلخل در میان این فاز تقویت‌کننده به دلیل ذوب موضعی بسیار کمتر از ذرات تقویت‌کننده دیگر با دمای ذوب بالا هم‌چون کاربید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم می‌باشد.

۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم را نسبت به نمونه حاوی پنج درصد وزنی اکسید وانادیم دلیل دیگری برای بهبود ریزساختار در دمای یکسان ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد دانست. چراکه با ایجاد جرقه‌های قوی‌تر به دلیل اختلاف رسانایی ترکیبات موجود در کامپوزیت، دما به صورت موضعی در مناطق حضور اکسید وانادیم افزایش یافته و سبب بهبود اتصال آلومینیوم-آلومینیوم



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه  $\text{Al-10wt\%V}_2\text{O}_5$  و تف‌جوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.





شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه  $\text{Al-15wt\%V}_2\text{O}_5$  و تفجوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.

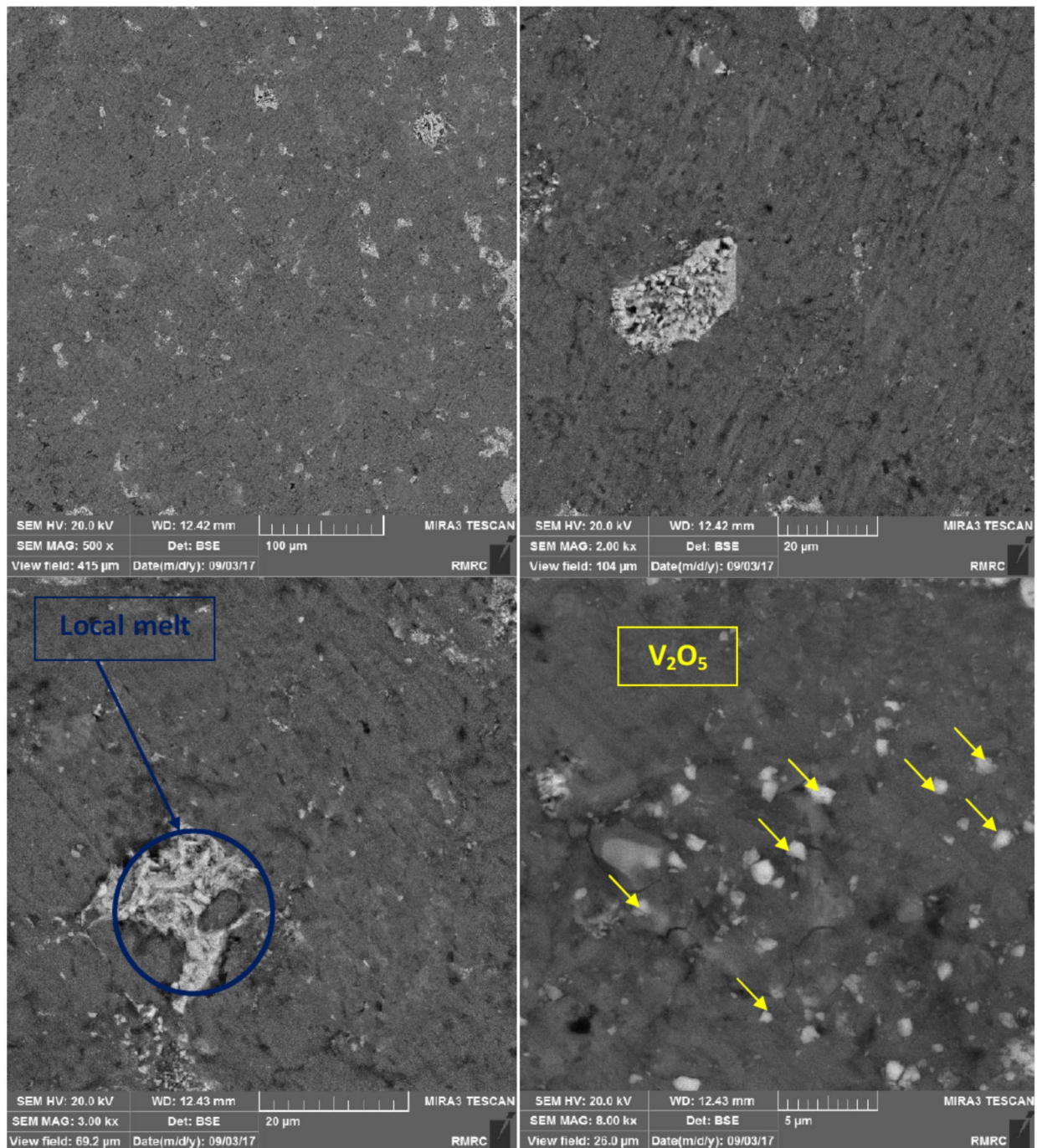
(شکل ۳) بهبود رفتار تفجوشی مشاهده می‌شود. از طرف دیگر در شکل ۷، با افزایش دمای تفجوشی از ۴۰۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی اکسید وانادیم، ساختار کاهش چشم‌گیر تخلخل‌ها را به همراه دارد. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد افزایش فاز تقویت‌کننده از پنج به ۱۰ نیز سبب ایجاد جرقه‌های قوی‌تر شده که نتیجه این تغییرات بهبود ریزساختار کامپوزیت تهیه شده می‌باشد.

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب ریزساختار نمونه‌های حاوی پنج و ۱۰ درصد وزنی اکسید وانادیم و تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص می‌باشد افزایش دمای تفجوشی بهبود چگالش را به همراه دارد به نحوی که اتصال آلومینیوم به آلومینیوم کامل‌تر شده است؛ هرچند که در ساختار تخلخل مشاهده می‌گردد اما نسبت به دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد



انقباض بیشتر (جابجایی کل) سبب بهبود ریزساختار شده است.

چراکه ذوب موضعی بیشتر نیز سبب پر نمودن تخلخلها در ریزساختار می‌شود. همچنین با توجه به رفتار تفجوشی نمونه‌ها (شکل ۲) و ریزساختار آنها (شکل‌های ۳ تا ۷)



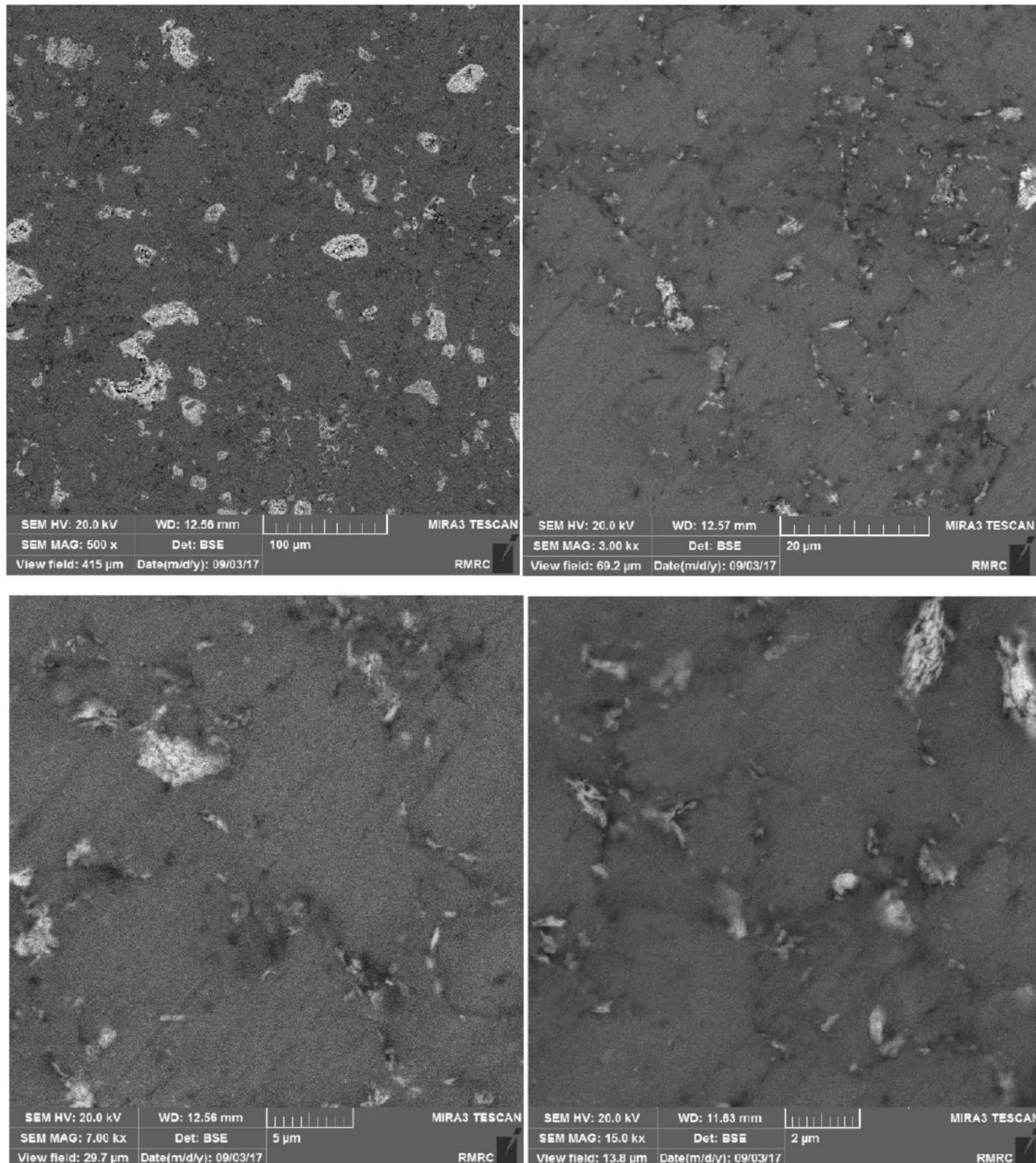
شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه  $\text{Al-5wt}\%\text{V}_2\text{O}_5$  و تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد.

ذرات اکسید وانادیم، فاز تقویت‌کننده از مخلوط اکسید وانادیم با ظرفیت مختلف وانادیم را با ابعاد بزرگ‌تر به وجود آورده است. همچنین آنالیز عنصری بیانگر حضور اکسید وانادیم در ابعاد ریز در زمینه آلومینیوم و مخلوط اکسیدهای وانادیم با ابعاد بزرگتر می‌باشد که به نظر می‌رسد در فصل مشترک فاز

شکل ۸ تصویر ریزساختار و نقشه آنالیز عنصری نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص می‌باشد، ریزساختار نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی دارای ذوب موضعی بالایی بوده و به نوعی آگلومره



اکسیدی و آلومینیوم به صورت موضعی فاز آلومیناید وانادیم تشکیل شده است.



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی گسیل میدان از نمونه  $\text{Al-10wt}\% \text{V}_2\text{O}_5$  و تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد.

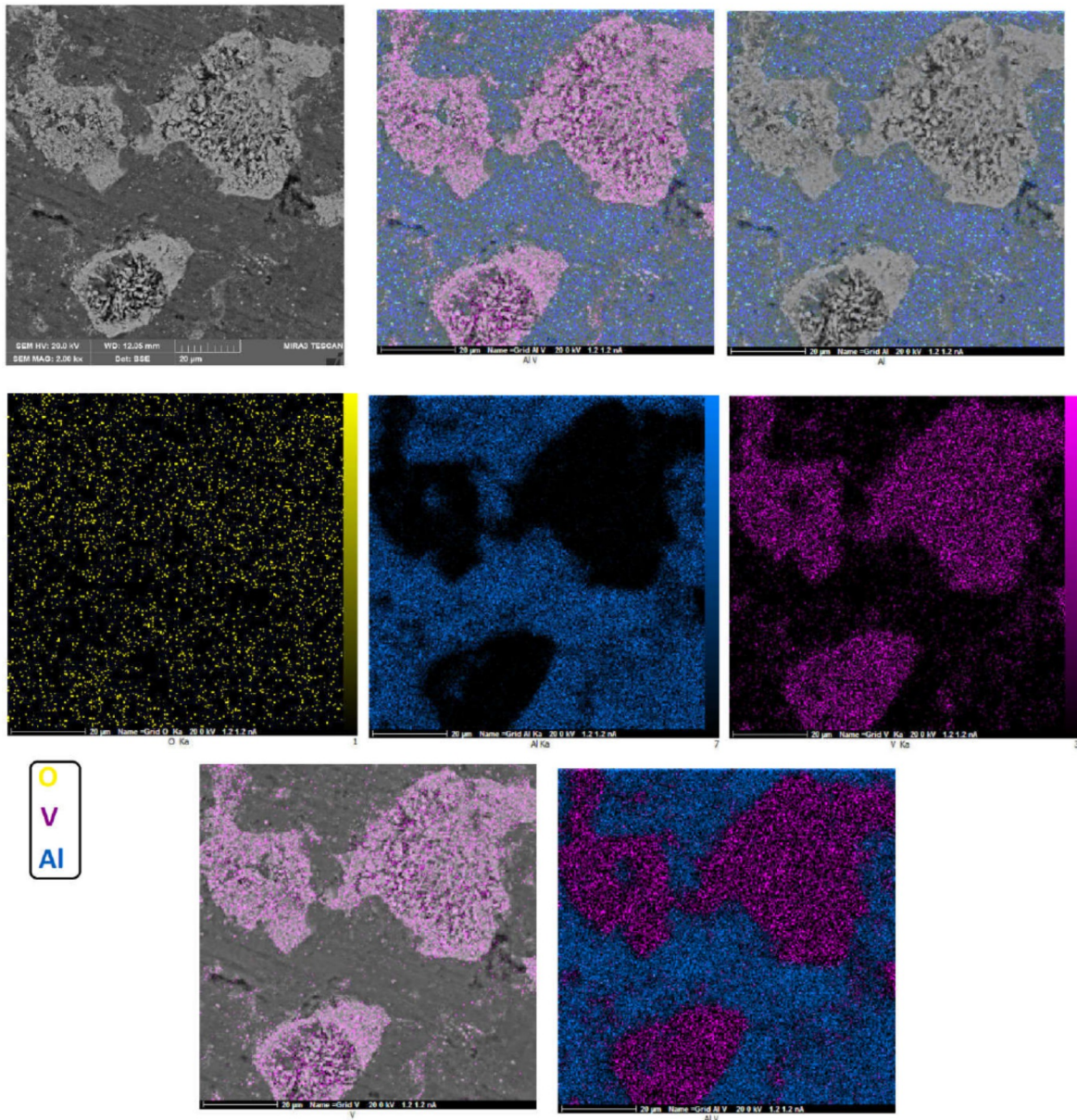
در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به نظر می‌رسد افزایش فاز تقویت‌کننده و دمای تفجوشی بهبود میزان سختی و استحکام را برای تمامی نمونه‌ها به همراه دارد که همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد؛ ذوب موضعی و کیفیت جرقه‌های ایجاد شده منجر به این چنین پدیده‌ای شده است. با توجه به اینکه محاسبه چگالی نسبی نمونه‌ها منوط به محاسبه چگالی تئوری نمونه‌ها می‌باشد و در این مقاله ایجاد

جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تهیه شده توسط فرآیند تفجوشی پلاسما جرقه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، کمترین میزان استحکام خمشی و سختی مرتبط با نمونه حاوی پنج درصد وزنی اکسید وانادیم و تفجوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از طرف دیگر بیشترین میزان استحکام خمشی و سختی مرتبط با نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی اکسید وانادیم و تفجوشی شده



چگالی نسبی روند تغییرات چگالی نسبی نیز مطابق با روند تغییرات استحکام و سختی می‌باشد که با افزایش دما و میزان فاز تقویت‌کننده چگالی نسبی افزایش یافته است.

فازهای فصل مشترک و مقادیر نامشخص فازهای جدید تشکیل شده محاسبه دقیق چگالی تئوری نمونه‌ها را غیرممکن می‌سازد لذا در محاسبه چگالی نسبی فازهای ایجاد شده جدید و میزان آن‌ها مدنظر قرار نگرفت. با توجه به ایجاد خطای جزئی در



شکل ۸. تصویر ریزساختار نمونه Al-15wt%V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-450 به همراه آنالیز نقشه عنصری.

حضور تخلخل‌ها و توزیع آنها، چسبندگی فاز زمینه و تقویت کننده، محصولات فصل مشترک به عنوان انتقال‌دهنده تنش از فاز زمینه به تقویت‌کننده و بالعکس می‌باشد. با توجه به رابطه ۱، میزان انرژی جذب شده برای تمامی نمونه‌ها در حین استحکام خمشی در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

شکل ۹ رفتار شکست نمونه‌های حاوی پنج و ۱۰ درصد وزنی اکسید وانادیم را برای دماهای تف‌جوشی ۴۰۰ و ۴۵۰

انرژی جذب شده در حین فرآیند شکست می‌تواند معیاری از چقرمگی شکست در مواد مختلف باشد که این میزان انرژی جذب شده از مساحت زیر نمودار تنش- کرنش و یا نیرو برحسب جابجایی طبق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد:

$$\text{معادله (۱)} \quad \text{جابجایی} \times \text{نیرو} = \int_0^{Ef} (mJ) \text{ انرژی جذب شده}$$

این میزان انرژی جذب شده متاثر از فرآیند ساخت،

همچنین بیشترین میزان جابجایی (معیاری از کرنش) برای نمونه  $Al-15wt\%V_2O_5-400$  به میزان حدود ۰٫۶ محاسبه شد. به نظر می‌رسد حضور تخلخل‌های بسیار زیاد و اتصال ضعیف بین ذرات فاز تقویت‌کننده منجر به ایجاد و رشد ترک و شکست ترد در این نمونه‌ها شده است. نمونه‌های تف جوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد رفتار تف جوشی نسبتاً نرم‌تری را نسبت به نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند که به نظر می‌رسد حضور تخلخل‌های بسیار زیاد در نمونه‌های تف جوشی شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رشد ترک را به همراه داشته است در صورتی که نمونه‌های تف جوشی شده در ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تخلخل کمتری نسبت به نمونه‌های ۴۰۰ درجه دارند. در مجموع مقایسه انرژی جذب شده برای نمونه‌ها، افزایش میزان انرژی جذب شده در حین شکست را با افزایش فاز تقویت کننده و افزایش دمای تف جوشی نشان می‌دهد. همچنین بیشترین نیروی شکست در کنار بیشترین جابجایی متعلق به نمونه  $Al-15wt\%V_2O_5-450$  می‌باشد که به نوعی کمترین میزان تخلخل در ساختار را دارا است [۲۱].

#### ۴- نتیجه گیری

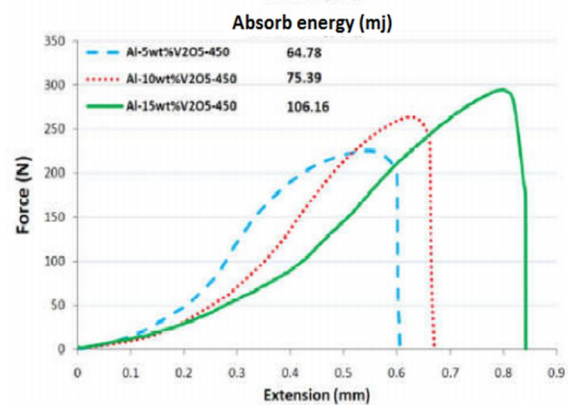
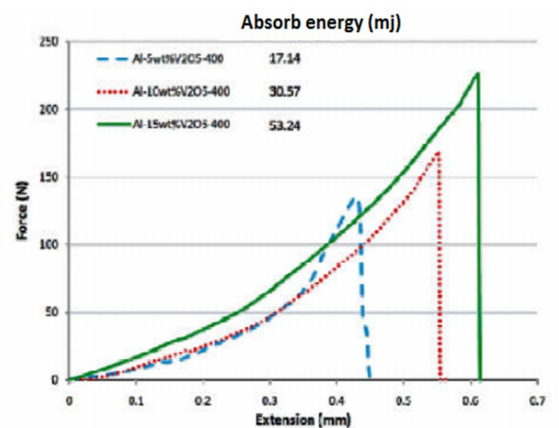
کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-اکسید وانادیم با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی فاز تقویت‌کننده توسط روش تف جوشی پلاسما جرقه‌ای تهیه شد. بررسی الگوی پراش پرتو ایکس تغییرات جزئی ظرفیت وانادیم در ترکیبات اکسیدی را برای هر دو دمای تف جوشی ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد. ریزساختار نمونه‌های تف جوشی شده نشان‌دهنده عدم اتصال مناسب آلومینیوم-آلومینیوم در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. در صورتی که افزایش دمای تف جوشی از ۴۰۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد سبب بهبود اتصال ذرات آلومینیوم به همراه افزایش ذوب موضعی بود. نتایج بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، بیانگر افزایش سختی، استحکام خمشی و چگالی نسبی با افزایش دمای تف جوشی و فاز تقویت‌کننده است. همچنین بیشترین میزان انرژی جذب شده در کنار بیشترین تغییر طول برای نمونه  $Al-15wt\%V_2O_5-450$  می‌باشد. مقایسه رفتار شکست نمونه‌های تف جوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه‌های

درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، رفتار شکست تقریبی ترد (با توجه به شکست لحظه‌ای در بیشینه نیرو) برای تمامی نمونه‌های تف جوشی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود.

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تهیه شده شامل استحکام خمشی، سختی و چگالی نسبی.

نمونه/دمای تف جوشی	چگالی نسبی (%)*	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	سختی (ویکرز)
$Al-5wt\%V_2O_5-400$	$0.3 \pm 91.3$	$16 \pm 52$	$67 \pm 12$
$Al-10wt\%V_2O_5-400$	$3.92 \pm 2.0$	$12 \pm 61$	$71 \pm 10$
$Al-15wt\%V_2O_5-400$	$8.92 \pm 2.0$	$8 \pm 69$	$73 \pm 14$
$Al-5wt\%V_2O_5-450$	$8.95 \pm 1.0$	$11 \pm 121$	$92 \pm 15$
$Al-10wt\%V_2O_5-450$	$9.95 \pm 3.0$	$10 \pm 130$	$99 \pm 12$
$Al-15wt\%V_2O_5-450$	$3.0 \pm 96.3$	$11 \pm 141$	$103 \pm 12$

\*چگالی نسبی بدون احتساب فازهای جدید در چگالی تئوری محاسبه شده است.



شکل ۹. نمودار تغییرات نیرو برحسب جابجایی در حین استحکام خمشی برای نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد.



- Organization, Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds, (2001).
14. Greenwood, N.N., Earnshaw, A., Chemistry of the Elements, (1984). Chemistry of the Elements
  15. Bachmann, H.G., Ahmed, F.R., Barnes, W.H., The crystal structure of vanadium pentoxide, *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 115 (1961) 110-131.
  16. Haynes, W.M., CRC handbook of chemistry and physics, CRC press, (2013).
  17. Kaushik, Y., Jawalkar, C.S., Verma, A.S., Suri, N.M., Fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites with Particulate Reinforcement: A Review, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2017) 2927-2936.
  18. Hildeman, G.J., Koczak, M.J., Aluminum powder metallurgy, *JOM*, 38 (1986) 30-32.
  19. Suarez, M., Fernandez, A., Menendez, J.L., Torrecillas, R., Kessel, H.U., Hennicke, J., Kirchner, R., Kessel, T., Challenges and opportunities for spark plasma sintering: a key technology for a new generation of materials, *Sintering Applications*, 13 (2013) 319-342.
  20. Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierning, G., R  athel, J., Herrmann, M., Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments, *Advanced Engineering Materials*, 16(7) (2014) 830-849.
  21. Shevchenko, V.G., Krasil'nikov, V.N., Eselevich, D.A., Konyukova, A.V., Ancharov, A.I., Tolochko, B.P., Effect of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on the oxidation mechanism of ASD-4 powder, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 51 (2015) 572-577.

تفجوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بیانگر رفتار شکست تقریبی ترد نمونه‌های تفجوشی شده در دمای پایین تر از نقطه‌نظر شکست لحظه‌ای در بیشینه نیروی اعمالی می‌باشد.

#### مراجع

1. Chawla, K.K., Composite Materials: Science and Engineering, Springer-Verlag, New York, (1998).
2. Ghasali, E., Pakseresht, A., Rahbari, A., Eslami-shahed, H., Alizadeh, M., Ebadzadeh, T., Mechanical properties and microstructure characterization of spark plasma and conventional sintering of Al-SiC-TiC composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 666 (2016) 366-371.
3. Shirvanimoghaddam, K., Khayyam, H., Abdizadeh, H., KarbalaeiAkbari, M., Pakseresht, A.H., Ghasali, E., Naebe, M., Boron carbide reinforced aluminium matrix composite: physical, mechanical characterization and mathematical modelling, *Materials Science and Engineering: A*, 658 (2016) 135-149.
4. Ghasali, E., Alizadeh, M., Ebadzadeh, T., Pakseresht, A.H., Rahbari, A., Investigation on microstructural and mechanical properties of B<sub>4</sub>C-aluminum matrix composites prepared by microwave sintering, *Journal of Materials Research and Technology*, 4 (4) (2015) 411-415.
5. Ghasali, E., Alizadeh, M., Ebadzadeh, T., Mechanical and microstructure comparison between microwave and spark plasma sintering of Al-B<sub>4</sub>C composite, *Journal of Alloys and Compounds*, 655 (2016) 93-98.
6. Ghasali, E., Pakseresht, A.H., Agheli, M., Marzbanpour, A.H., Ebadzadeh, T., WC-Co particles reinforced aluminum matrix by conventional and microwave sintering, *Materials Research*, 18 (6) (2015) 1197-1202.
7. Nukami, T., and Flemings, M.C., In situ synthesis of TiC particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26 (1995) 1877-1884.
8. Ghasali, E., Pakseresht, A., Safari-kooshali, F., Agheli, M., Ebadzadeh, T., Investigation on microstructure and mechanical behavior of Al-ZrB<sub>2</sub> composite prepared by microwave and spark plasma sintering, *Materials Science and Engineering: A*, 627 (2015) 27-30.
9. Wang, M., Wang, D., Kups, T., Schaaf, P., Size effect on mechanical behavior of Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> multilayers by nanoindentation, *Materials Science and Engineering: A*, 644 (2015) 275-283.
10. Abdizadeh, H., Ashuri, M., Tavakoli Moghadam, P., Nouribahadory, A., Baharvandi, H.R., Improvement in physical and mechanical properties of aluminum/zircon composites fabricated by powder metallurgy method, *Materials & Design*, 32 (2011) 4417-4423.
11. Murthy, K.V.S., Girish, D.P., Keshavamurthy, R., Varol, T., Koppad, P.G., Mechanical and thermal properties of AA7075/TiO<sub>2</sub>/Fly ash hybrid composites obtained by hot forging, *Progress in Natural Science: Materials International*, 27 (2017) 474-481.
12. Anvari, S.Z., Karimzadeh, F., Enayati, M.H., Synthesis and characterisation of nanostructured Al-Al<sub>3</sub>V and Al-(Al<sub>3</sub>V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composites by powder metallurgy, *Materials Science and Technology*, 34 (2017) 179-190.
13. Costigan, M., Cary, R., Dobson, S., [www.sid.ir](http://www.sid.ir)