

## بررسی میکروساختار و خواص سایشی پوشش کامپوزیتی $Al/Al_3Ti$ ایجاد شده به کمک الکتروود توپودری\*

افسانه انصاری<sup>(۱)</sup> امیرحسین کوکبی<sup>(۲)</sup> سید حمیدرضا ملاح حسینی<sup>(۳)</sup>

### چکیده

در این پژوهش، با استفاده از فرایند جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن (تیگ) و الکتروود توپودری، پوشش کامپوزیتی مقاوم به سایش، روی آلومینیم خالص تجاری ایجاد شد. الکتروودهای توپودری، به کمک دستگاه کشش سیم و نوارهای آلومینیمی و مخلوط پودرهای آلومینیم و تیتانیم تولید شدند. ریزساختار و فازهای موجود در پوشش نیز توسط آزمون‌های  $XRD$  متالوگرافی و  $SEM$  مجهز به  $EDS$  بررسی شد. آزمون‌های ریزسختی سنجی و سایش انجام شد. بیشترین سختی حاصل (۳۰۰ ویکرز) حدود ۱۳ برابر فلز پایه بود. نتایج نشان داد که پوشش، شامل فازهای آلومینیم  $\alpha$ ، تیتانیم  $\alpha$  و همچنین بین فلزی  $Al_3Ti$  بوده و حضور  $Al_3Ti$  منجر به افزایش سختی و مقاومت به سایش می‌شود.

**واژه‌های کلیدی** پوشش کامپوزیتی؛ مقاومت به سایش؛ جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن؛ الکتروود توپودری.

### Study of Microstructure and Wear Behavior of in-situ $Al/Al_3Ti$ Composite Coating on Commercial Pure Al Produced by Aluminum Cored Wires

A. Ansari

A. H. Kokabi

H.R. Madaah Hoseini

#### Abstract

*In this study, GTAW process and cored wires were used to coat  $Al/Al_3Ti$  wear resistant composite on a commercial pure Al substrate. Wire drawing process was utilized to produce the cored wires from aluminum strips and a mixture of titanium and aluminum powders. The microstructures and the present phases were investigated by metallographic, SEM equipped with EDS and XRD analysis. Moreover, the hardness and wear resistance of the samples were evaluated. A maximum microhardness value of about 300HV was measured which is 13 times higher than the hardness of the substrate material. The results showed that the coating was composed of Al, Ti as well as  $Al_3Ti$ . The presence of  $Al_3Ti$  led to increase in the wear resistance of the coating.*

**Key Words** Composite Coating; Wear Resistance; GTAW; Cored Wire.

\* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۹/۱۸ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۱۴ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

## مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، ظاهر و ویژگی‌های ساخت خوب، در صنایع هوافضا، اتومبیل، ساختمان، بسته بندی و ماشین‌های الکتریکی اهمیت یافته‌اند. ولی کاربرد آن‌ها به دلیل مقاومت به سایش و استحکام تسلیم پائین محدود شده است. بنابراین با اصلاحاتی در ریزساختار یا ترکیب شیمیایی لایه‌های سطح قطعات، می‌توان مقاومت به سایش آن را افزایش داد. یکی از این اصلاحات ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی روی سطح است [1,2]. به منظور رسیدن به مقاومت سایشی عالی، عملیات سطحی بسیاری مانند آندایز کردن، آبکاری و رسوب دهی فیزیکی بخار به کار برده می‌شود؛ اما این لایه‌های سطحی خیلی نازک بوده و نمی‌توانند بار اعمالی شدید را تحمل کنند و به راحتی با تغییر شکل زیرلایه آلومینیمی می‌شکنند. بنابراین به دست آوردن پوشش ضخیم سخت روی سطح آلومینیم ضروری است [2]. روش‌هایی نظیر لیزر و پرتو الکترونی نیز با ذوب سطحی می‌توانند لایه‌های آلیاژی یا کامپوزیت سطحی ضخیم با خواص مطلوب ایجاد کنند، اما به دلیل هزینه زیاد و در دسترس نبودن چندان مطلوب نمی‌باشند [3].

امروزه از فرایند جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن با کمک الکتروود توپودری جهت ایجاد لایه‌های آلیاژی و کامپوزیتی سطحی استفاده می‌شود. این روش محدودیت‌های مذکور برای روش‌های دیگر را ندارد [3,4].

در طول دهه اخیر، اکثر تحقیقات روی کامپوزیت‌های زمینه Al با تقویت‌کننده‌های سرامیکی متمرکز شده است. در فرایند ساخت این کامپوزیت‌ها محدودیت‌هایی نظیر اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی بین زمینه آلومینیم و تقویت‌کننده‌های سرامیکی و همچنین تردی زیاد سرامیک‌ها وجود دارد. ترکیبات

بین فلزی آلومینیمی مانند  $Al_3Ti$ ، ضریب انبساط حرارتی نزدیک به Al دارند و در مقایسه با سرامیک‌ها تردی کمتری دارند. همچنین این ترکیبات دارای چگالی کم و نقطه ذوب بالا، مقاومت به اکسایش، سختی زیاد و مدول ینگ بالا هستند، در نتیجه می‌توانند انتخاب‌های مناسب تری نسبت به سرامیک‌ها باشند [5,7]. در پژوهشی پوشش کامپوزیتی  $Al/Al_3Ti$  به روش نفوذی ساخته شده است، به این صورت که شبکه‌ای ساخته شده از میله‌های تیتانیمی روی یک قطعه آلومینیمی قرار داده شده و سپس این مجموعه به مدت ۲۰ دقیقه داخل کوره تحت دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. پس از ۲۰ دقیقه، همه تیتانیم تبدیل به  $Al_3Ti$  شده است. با افزایش زمان ماندگاری در کوره و در نتیجه افزایش درصد  $Al_3Ti$ ، ضریب اصطکاک کاهش یافته است [8]. در تحقیقی، با استفاده از پرتو لیزر، پوشش بین فلزی مقاوم به سایش  $Al_3Ti$  را روی سطح آلومینیم رسوب دهی کردند و با کاهش میزان رقت و افزایش درصد  $Al_3Ti$  مقاومت به سایش افزایش یافت [9].

در این پژوهش از روش جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکتروود تنگستن با کمک الکتروود توپودری برای ایجاد کامپوزیت سطحی بر روی آلومینیم خالص تجاری استفاده شد. مفتول مورد استفاده از جنس آلومینیم بوده و با هدف تشکیل فاز بین فلزی آلومینید تیتانیم، مخلوط پودر آلومینیم و ۴۰٪ وزنی تیتانیم داخل مفتول اضافه شد. ریز ساختار و ترکیب لایه‌های ایجاد شده به روش‌های SEM، میکروسکوپ نوری و XRD بررسی شد. همچنین سختی و خواص سایشی لایه‌های سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق آلومینیم خالص تجاری با ضخامت ۴ میلی‌متر و سطح ۶۰ در ۸۰ میلی‌متر به عنوان زیرلایه استفاده شد. قبل از فرایند پوشش‌دهی،

انجام شد. فازهای موجود نیز با استفاده از آنالیز XRD شناسایی شدند. همچنین میکروسختی سنجی از فازهای مختلف با استفاده از روش ویکرز و اعمال وزنه ۱۰ گرمی انجام شد. مقاومت به سایش با استفاده از تست سایش پین روی دیسک طبق استاندارد ASTM-G99-04 بررسی گردید. در این تست پین از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۰ راکول سی و دیسک از جنس پوشش ایجاد شده بر زیرلایه بود. پین با قطر ۵ میلی‌متر، طول ۵۰ میلی‌متر و انحنای سر پین ۱۰ میلی‌متر و به روش متالورژی پودر ساخته شده بود. تست سایش در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه و نیروی اعمالی ۳۶ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد.

### نتایج و بحث

**بررسی ریزساختار.** شکل (۲) ریزساختار پوشش ایجاد شده را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. در بخشی از ساختار ملاحظه می‌شود که جزایر سفید رنگ در زمینه ای سیاه قرار دارند و اطراف آنها فازی خاکستری روشن دیده می‌شود. در قسمت‌های دیگر از ساختار، فاز خاکستری روشن به صورت دندردیتی ظاهر شده است. با توجه به آنالیز EDS از فازهای سفید، خاکستری روشن و خاکستری تیره که در شکل (۳) نشان داده شده است، می‌توان گفت فازهای سفید، تیتانیم واکنش نداده با آلومینیم می‌باشد که با وجود محافظت توسط گاز محافظ، مقداری نیتروژن از هوا جذب کرده است. فازهای خاکستری روشن،  $Al_3Ti$  و فازهای خاکستری تیره، آلومینیم هستند. به دلیل دقیق نبودن آنالیز EDS، آزمون پراش پرتو ایکس روی نمونه انجام شد. در شکل (۴) الگوی پراش پرتو ایکس نشان داده شده است و تنها سه فاز آلومینیم  $\alpha$ ، بین فلزی  $Al_3Ti$  و درصد کمی تیتانیم  $\alpha$  شناسایی شد. بنابراین ساختار شامل زمینه‌ای از آلومینیم است که در برخی نواحی فاز بین فلزی  $Al_3Ti$  به صورت دندردیتی ایجاد شده است. این بین فلزی ها نتیجه واکنش آلومینیم موجود در زیرلایه و همچنین الکتروود پودر

برای از بین بردن اکسیدهای سطحی، هرگونه چربی و ذرات دیگر، زیرلایه سنباده زده شده و توسط استن به طور کامل تمیز گردید. به منظور ایجاد لایه سطحی الکتروودهای توپودری به کار برده شد. به منظور ساخت این الکتروودها، ورق آلومینیم ۱۰۵۰ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و عرض ۱۰ میلی‌متر را از قالب‌های دستگاه کشش سیم با قطرهای ۵، ۴/۵ و ۴/۱ میلی‌متر عبور کرده تا سطح مقطع ورق ابتدا به حالت U و سپس به حالت O درآید. در حین این مراحل مخلوط پودر آلومینیم و تیتانیم داخل ورق ریخته شد. خلوص آلومینیم بیش از ۹۹ درصد و خلوص تیتانیم بیش از ۹۸ درصد بود و اندازه ذرات پودر کمتر از ۱۰۰ میکرون بود. در این تحقیق مخلوط ۴۰ درصد وزنی تیتانیم بررسی شد که سختی و مقاومت به سایش را به میزان قابل توجهی افزایش داد، اگرچه درصدهای کمتر از ۴۰ درصد وزنی در حال بررسی است که در مقالات دیگر منتشر می‌شود. برای مخلوط کردن پودرها از دستگاه مخلوط کن توربولو (Turbula mixer) استفاده شد. نکته قابل ذکر این است که قبل از ساخت الکتروود، ورق آلومینیم مورد استفاده به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شد تا انعطاف‌پذیری لازم را به دست آورده و ضمن عملیات شکل‌دهی پاره نشود. شکل (۱) مراحل ساخت الکتروود توپودری را نشان می‌دهد.

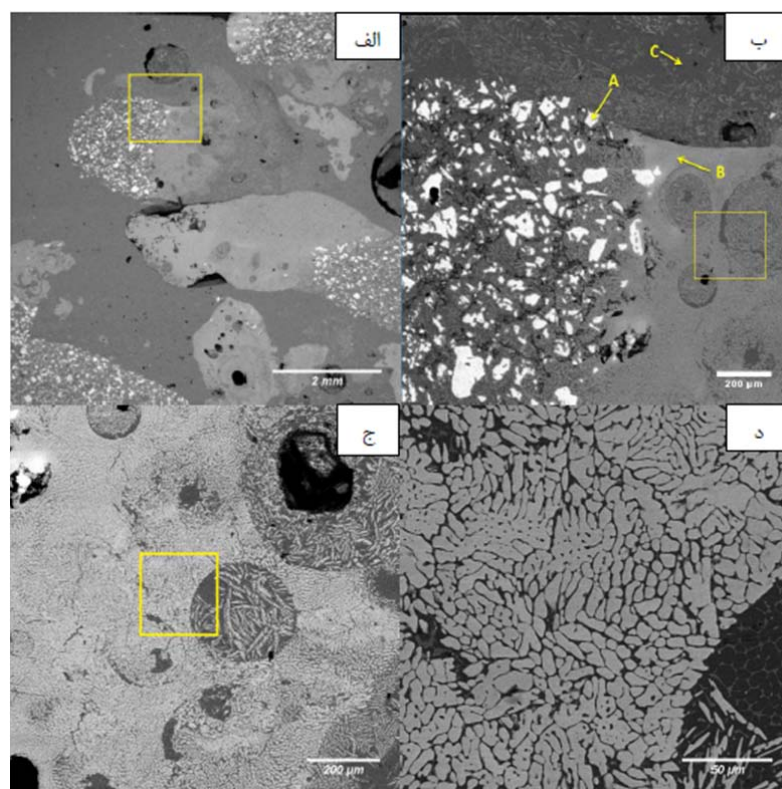
عملیات پوشش دهی با استفاده از فرآیند جوشکاری تحت گاز محافظ و الکتروود تنگستن و الکتروودهای توپودری تهیه شده انجام شد. الکتروود مصرف نشدنی تنگستن-۲٪ توریم به قطر ۲/۴ میلی‌متر جهت ایجاد قوس به کار برده شد. گاز محافظ مورد استفاده، گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ بود. شدت جریان، سرعت جوشکاری و میزان دمش گاز به ترتیب برابر با ۱۱۰ آمپر، ۱/۱۱ میلی‌متر بر ثانیه و ۱۴ لیتر بر دقیقه انتخاب گردید. در این پژوهش از جریان متناوب استفاده شد. بررسی ریزساختار به وجود آمده به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی

دلایل درصد پایین آن، در الگوی پراش ایکس مشخص نشده است. در تصویر با بزرگنمایی کم (شکل ۲-الف)، جزایری از بین فلزی و تیتانیوم در زمینه آلومینیم مشاهده می‌شود که نشان دهنده عدم یکنواختی ساختار است.

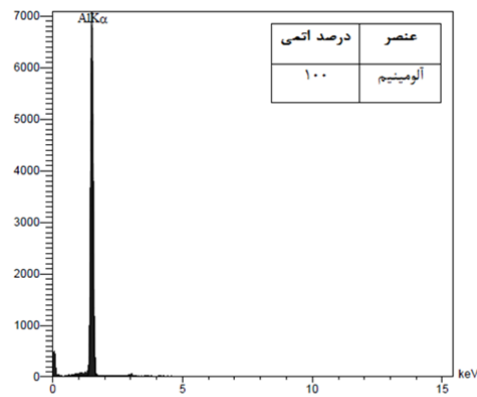
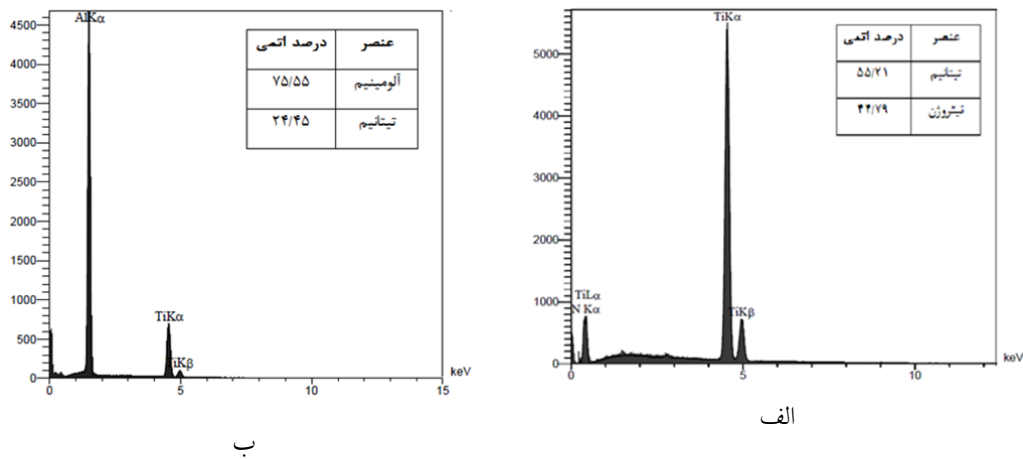
تیتانیوم موجود در الکتروود توپودری می‌باشد. همچنین در برخی نواحی مشاهده می‌شود که تیتانیوم با آلومینیم به طور کامل واکنش نداده و اطراف آن فاز بین فلزی دیده می‌شود. با توجه به تجزیه شیمیایی EDS، ممکن است در ساختار نیتريد تیتانیوم وجود داشته باشد، اما به



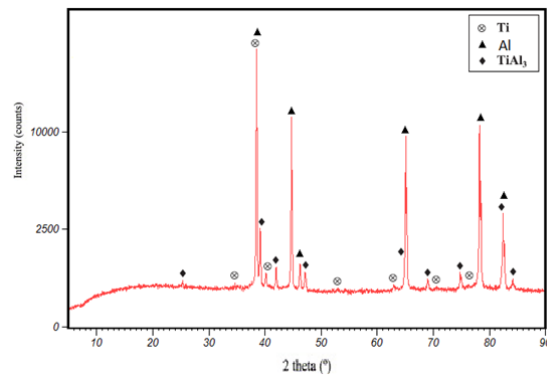
شکل ۱ مراحل ساخت الکتروود توپودری



شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پوشش داده شده؛ الف) زمینه آلومینیم و جزایر شامل تیتانیوم و بین فلزی  $Al_3Ti$  و دندریت‌های  $Al_3Ti$ ، ب) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل الف، ج) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل ب، د) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل ج (دندریت‌های  $Al_3Ti$ ).



شکل ۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) (الف) مربوط به نقطه A، (ب) نقطه B، (ج) نقطه C مشخص شده در شکل ۲-ب.

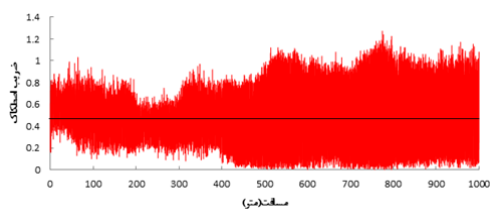


شکل ۴ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه پوشش داده شده

مسافت را برای نمونه پوشش داده شده و فلز پایه آلومینیمی نشان می دهند. ضریب اصطکاک نمونه پوشش داده شده به طور میانگین ۰/۴۷ و فلز پایه

بررسی مقاومت به سایش. آزمون سایش روی نمونه پوشش داده شده و فلز پایه آلومینیمی انجام شد. شکل های (۵ و ۶) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب

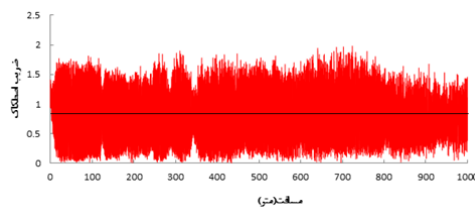
دیگر نرخ کاهش وزن یا نرخ سایش در زیرلایه آلومینیمی بیشتر از نمونه پوشش داده شده است. این افزایش مقاومت به سایش به طور مستقیم مربوط به وجود فازهای سخت در نمونه پوشش دار می باشد. شکل (۸) سختی فازهای مختلف را نشان می دهد. فازهای بین فلزی دارای سختی ۳۰۰ ویکرز می باشند. از فاز تیتانیم نیز سختی گرفته شده و برابر با ۱۷۵ بوده و زمینه آلومینیمی دارای سختی ۴۰ ویکرز می باشد؛ زیرا با توجه به شکل (۸)، اثر فرورفتگی سختی سنج علاوه بر آلومینیم روی برخی بین فلزی ها قرار گرفته است. سختی زیرلایه یا به عبارتی آلومینیم خالص تجاری برابر با ۲۳ ویکرز است و بنابراین سختی در نمونه پوشش دهی شده تا ۱۳ برابر افزایش یافته است.



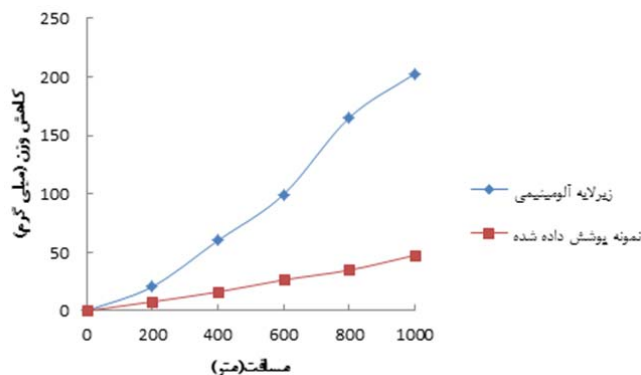
شکل ۶ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه پوشش دهی شده.

آلومینیمی ۰/۸ می باشد. بنابراین با ایجاد پوشش توسط جوشکاری، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، پوشش کامپوزیتی ساخته شده به روش نفوزی دارای میانگین ضریب اصطکاک ۰/۴۵ برای سایش تحت نیروی ۱۰ نیوتن است و به ضریب اصطکاک نمونه پوشش داده شده به کمک الکتروود توپودری نزدیک است [8].

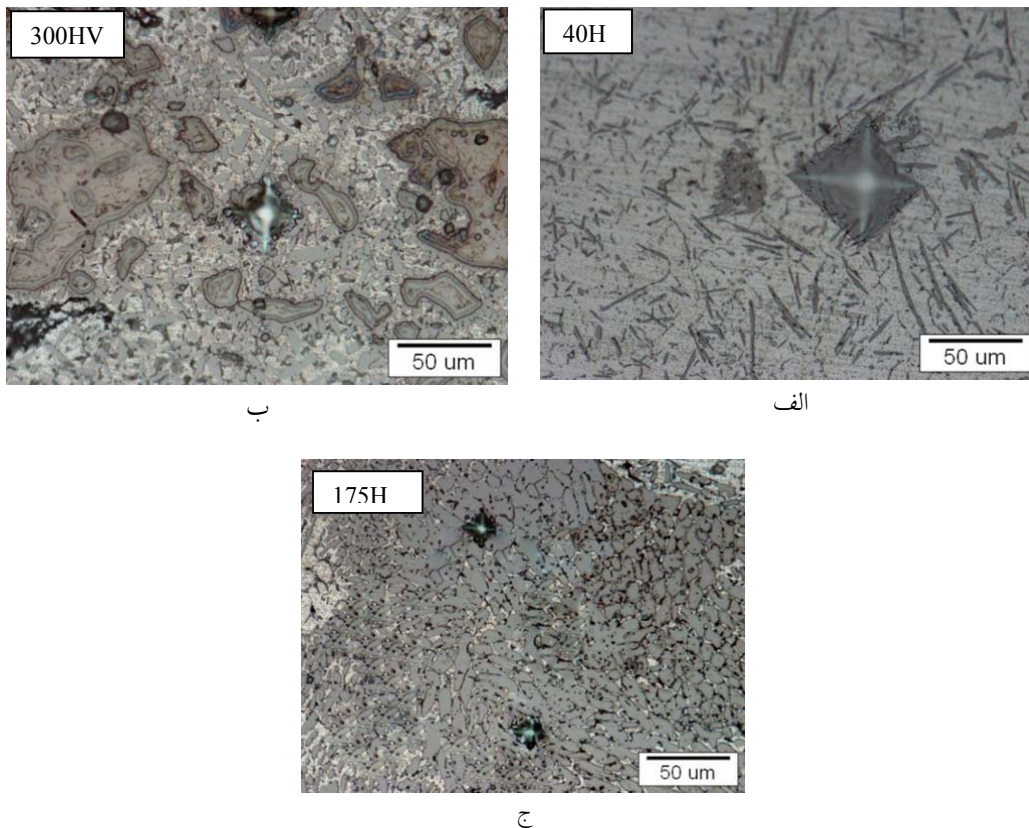
نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت در شکل (۷) آورده شده است و ملاحظه می شود که نمونه پوشش دار کاهش وزن کمتری نسبت به آلومینیم زیرلایه داشته است. به طوری که بعد از لغزش ۱۰۰۰ متر کاهش وزن نمونه پوشش دار ۴۷/۶ میلی گرم و فلز پایه آلومینیمی ۲۰۲/۸ میلی گرم بوده است. همچنین ملاحظه می گردد با افزایش مسافت کاهش وزن فلز پایه آلومینیمی نسبت به نمونه پوشش دار بیشتر افزایش یافته است، به عبارت



شکل ۵ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت زیرلایه آلومینیمی



شکل ۷ نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت



شکل ۸ میکروسختی فازهای مختلف. الف) زمینه آلومینیمی ب) فاز تیتانیم ج) دندریتهای بین فلزی  $Al_3Ti$ .

### نتیجه گیری

- ۱- با انجام عملیات پوشش دهی با استفاده از روش جوشکاری تحت پوشش گاز محافظ الکتروود تنگستن و الکتروود توپودری آلومینیمی حاوی پودر آلومینیم-۴۰٪ تیتانیم، ساختاری شامل فازهای آلومینیم، تیتانیم و بین فلزی آلومیناید تیتانیم ( $Al_3Ti$ ) به صورت درجا تشکیل می شود.
- ۲- سختی فاز بین فلزی برابر ۳۰۰ ویکرز است و حدود ۱۳ برابر سختی زیرلایه آلومینیمی (۲۳ ویکرز) می باشد.

### مراجع

1. Shrestha, S., Dunn, B.D., and Dong, H., (Ed.), "Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys", Woodhead Publishing Limited, pp. 40-57,(2010).
2. Xu, J., Liu, W., Kan, Y., Zhong, M., "Microstructure and Wear Properties of Laser Cladding Ti-Al-Fe-B Coatings on AA2024 Aluminum Alloy", Materials and Design, vol. 27, pp. 405-410, (2006).

3. Yang, R., Liu, Z., Yang, G., Wang, Y., "Study of In-situ Synthesis TiCp/Ti Composite Coating on Alloy Ti6Al4 V", *TIG Cladding*, vol. 36, pp. 349 – 354, (2012).
  4. Monfared, A., Kokabi, A.H., Asgari, S., "Microstructural Studies and Wear Assessments of Ti/TiC Surface Composite Coatings on Commercial pure Ti Produced by Titanium Cored Wires and TIG Process", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 137, pp. 959-966, (2013).
  5. Smith, A., "Discontinuous Reinforcements for Metal-Matrix Composites", handbook, Composites, ASM, vol. 21, pp.51, (1990).
  6. Nofar, M., Madaah Hosseini, H.R., Kolagar-Daroonkolaie, N., "Fabrication of High Wear Resistant Al/Al<sub>3</sub>Ti Metal Matrix Composite by in Situ Hot Press Method", *Materials and Design.*, vol. 30, pp.280–286, (2009).
  7. Abbasi Chianeha, V., Madaah Hosseini, H.R., Nofar, M., "Micro Structural Features and Mechanical Properties of Al–Al<sub>3</sub>Ti Composite Fabricated by in-Situ Powder Metallurgy Route", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 473, pp.127–132, (2009).
  8. Niu, L.B., Zhang, J.M., YANG, X.L., "In-Situ Synthesis of Al<sub>3</sub>Ti Particles Reinforced Al-based Composite Coating", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, pp.1387–1392, (2012).
  9. Uenishi K., Kobayashi K. F. "Formation of Surface Layer Based on Al<sub>3</sub>Ti on Aluminum by Laser Cladding and its Compatibility with Ceramics", *Intermetallics*, vol.7, pp. 553-559, (1999).
-