

رویه کاری آلومینیم با ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی توسط فرآیند جوشکاری TIG

مهدی رستمی و بهنام لطفی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله : ۹۰/۱۱/۲ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۲/۱۰)

چکیده

جهت ایجاد لایه کامپوزیتی بر سطح آلیاژ ریختگی آلومینیم A380 از فرآیند قوس تنگستن تحت گاز محافظ آرگون (TIG) استفاده شد. بدین منظور مخلوطی از پودرهای آلومینیم، سیلیسیم و کاربیدسیلیسیم به نسبت‌های مختلف همراه با مقدار مناسب چسب سیلیکات سدیم و آب به صورت خمیر پیش‌نشست بر روی زیرلایه مورد نظر چسبانده شد. پس از خشک شدن و پیش‌گرم نمونه‌ها عملیات ذوب سطحی توسط فرآیند جوشکاری TIG تحت پارامترهای بهینه انجام شد. در اثر این عملیات لایه کامپوزیتی Al-SiC بر سطح آلیاژ آلومینیم ایجاد گردید. جهت ارزیابی ریزساختاری و بررسی خواص لایه ایجاد شده بر زیرلایه از پراش‌سنجی پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM)، میکروآنالیزور عنصری (EDS) و ریزسختی‌سنجی استفاده شد. نتایج حاصل توزیع یکنواختی از ذرات SiC در زمینه دندریتی آلومینیم را نشان داد. همچنین ذرات SiC در حین اعمال گرمای ناشی از عملیات ذوب سطحی لایه پیش‌نشسته شده، به صورت جزئی حل شده و منجر به تشکیل فازهایی همچون Si و Al₄SiC₄ با سختی در حدود ۱۰۰۰ ویکرز می‌شود. همچنین افزودن سیلیسیم به مخلوط پودر پیش‌نشست منجر به افزایش سختی سطحی روکش می‌شود.

واژه های کلیدی: آلیاژ ریختگی آلومینیم، کاربید سیلیسیم، TIG، ذوب سطحی، لایه کامپوزیتی.

Hardfacing of composite layer on aluminum by GTAW process

M. Rostami and B. Lotfi

Department of materials science and engineering, faculty of engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

(Received 21 January 2012, accepted 28 February 2012)

Abstract

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) was applied to create a composite layer on the surface of cast aluminum alloy A380. Different mixtures of aluminum, silicon and silicon carbide powders with Sodium silicate solution were pasted on the substrate. After drying and preheating, surface melting was conducted by TIG process. A composite layer of Al-SiC was created on the surface by this process. Evaluation of microstructure and properties of obtained composite clad was done by X-ray diffraction (XRD), optical and scanning electron microscope (SEM), elemental microanalysis (EDS) and microhardness testing methods. The results showed uniform distribution of SiC particles in Aluminum dendritic matrix. SiC particles are dissolved partially during heating and melting of the preplaced layer and may lead to the formation of Si and Al₄SiC₄ phases with a Vickers hardness of about 1000 HV. Surface hardness can be increased by further addition of silicon in preplaced powders.

Keywords: Cast Aluminum Alloy, Silicon Carbide, Tungsten Inert Gas, Surface Melting, Composite Layer.

E-mail of corresponding author: Rostami64mehdi@gmail.com

مقدمه

هستند. یکی از روش‌های امکان‌پذیر در کشور به منظور ایجاد لایه‌های سطحی آلیاژی یا کامپوزیتی بکارگیری جوشکاری قوس تنگستن در محیط گاز خنثی (TIG) است، که به دلیل سهولت در دسترسی و کار با آن و ارزیابی نسبت به سایر روش‌ها، کاربرد روزافزونی یافته است.

برای ایجاد کامپوزیت زمینه آلومینیم از ذرات مختلفی نظیر SiC، TiC و Al_2O_3 به دلیل سختی بالا، پایداری حرارتی مناسب و مقاومت سایشی بالا می‌توان استفاده نمود [۱۱]. در پژوهشی ایجاد لایه کامپوزیتی سطحی $Al-Al_2O_3$ به وسیله دو روش جوشکاری لیزر و TIG بررسی شده و در اثر ایجاد لایه‌های سطحی حاوی ذرات سرامیکی Al_2O_3 ، سختی زیرلایه از HV ۴۰ به HV ۱۳۳ در سطح افزایش یافته و مقاومت سایشی بهبود یافته است [۶].

در تلاشی دیگر کومار و همکارانش با تغذیه مخلوط پودری Si-12% Al و SiC در حوضچه مذاب ایجاد شده حاصل از جوش لیزر مشاهده کردند که با افزایش حرارت ورودی واکنش بین ذرات SiC و مذاب آلومینیم منجر به ایجاد ذرات صفحه‌ای شکل Al_4SiC_4 و Si در ترکیب کامپوزیت شده که در این حالت سختی سطحی آلومینیم ریختگی ۳۵۶ به مقدار HV ۲۷۰ افزایش یافته است [۱۲].

در تحقیق حاضر به منظور بهبود خواص سطحی آلیاژ آلومینیم، ایجاد لایه کامپوزیتی سطحی حاوی ذرات SiC در زمینه‌ای از آلیاژ Al-Si از طریق پیش‌نشست خمیری از مخلوط پودری حاوی آلومینیم و کاربید سیلیسیم و همچنین در تعدادی نمونه‌ها به همراه سیلیسیم بر روی زیرلایه و ذوب سطحی توسط فرآیند TIG بررسی شده است.

مواد و روش تحقیق

از آلیاژ Al-8.5Si-3.5Cu با ابعاد $10 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$ به عنوان زیرلایه جهت انجام عملیات سطحی استفاده شد. آماده سازی سطحی نمونه‌ها قبل از پیش‌نشست مخلوط پودری جهت اکسیدزدایی و حذف آلودگی‌های سطحی از روی سطح نمونه‌ها توسط سنباده‌زنی و تمیزکاری با استن انجام شد.

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی همچون نسبت استحکام به وزن بالا، سهولت ساخت، مقاومت به خوردگی مناسب، هدایت گرمایی و الکتریکی بالا و قیمت نسبتاً پایین در بسیاری از صنایع نظیر صنایع شیمیایی، اتومبیل سازی و هوا فضا کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند [۱۰]، اما سختی و مقاومت به سایشی پایین این آلیاژها استفاده آن‌ها را در بسیاری از کاربردهای مرتبط با سایش محدود کرده است [۳]. جهت بهبود رفتار سایشی آلومینیم و آلیاژهای آن، تحقیقات زیادی صورت گرفته که شامل بهینه‌سازی ترکیب آلیاژ، تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی و بکارگیری تکنولوژی‌های سطحی متفاوتی همچون آندایزینگ^۱، رسوب فیزیکی بخار^۲ و آبکاری الکتریکی^۳ جهت ایجاد یک لایه سخت در سطح قطعات می‌باشد [۴].

پوشش‌های اعمال شده توسط فرآیندهای مذکور بسیار نازک بوده و در مقابل نیروهای اعمالی بالا دچار شکست شده بنابراین لازم است که یک پوشش نسبتاً ضخیم بر روی آلیاژهای آلومینیم اعمال شود. از این رو ایجاد لایه‌های آلیاژی و کامپوزیتی از طریق عملیات جوشکاری سطحی بر سطح قطعات آلومینیمی و آلیاژهای آن جهت بهبود خواص تریبولوژیکی آنها توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۹]. جهت تأمین انرژی مورد نیاز برای عملیات جوشکاری و ذوب سطحی امروزه معمولاً از منابع با چگالی انرژی بالا مانند پرتو لیزر و پرتو الکترونی استفاده می‌شود. سرعت این فرآیندها زیاد بوده و با انتخاب متغیرهای مناسب، لایه‌های سطحی آلیاژی و یا کامپوزیتی با ضخامت مورد نظر بدست می‌آید که باعث بهبود رفتار سایشی فلز زیرلایه می‌شود [۱۰]. روش‌های مذکور هر چند دارای سرعت و دقت بالایی هستند اما به دلیل هزینه نسبتاً زیاد و نیز عدم دسترسی آسان در کشور با محدودیت‌هایی از نقطه نظر استفاده روبه‌رو

1. hard anodizing

2. physical vapor deposition

3. Electroplating

رستمی و لطفی، رویه کاری آلومینیم با ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی توسط فرآیند جوشکاری TIG، علوم و مهندسی سطح ۱۵ (۱۳۹۱) ۳۵

جدول ۲. پارامترهای فرآیند جوشکاری سطحی به روش TIG

نوع الکترود EWTh-2	نوع جریان AC
قطر الکترود 2.4mm	شدت جریان (A) ۱۱۰-۱۶۰
گاز محافظ آرگون	ولتاژ (V) ۱۰
دبی گاز (lit/min) ۸	طول قوس (mm) ۲-۳
حرارت ورودی (KJ/cm) ۶۷	سرعت جوشکاری (mm/s) ۱۰

الکترونی روبشی (SEM)^۳ مجهز به دستگاه سنجش شدت انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. برای شناسایی و تعیین فازها در لایه های سطحی ایجاد شده، از یک پراش سنج پرتو ایکس (XRD)^۴ با استفاده از لامپ مسی و ولتاژ شتاب دهنده ۴۰ KV استفاده شد. سختی لایه های کامپوزیتی ایجاد شده توسط یک دستگاه ریزسختی سنجی ویکرز تحت بار اعمالی ۲۵ گرم اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه های SA1 و SA2 در بزرگنمایی ۱۰۰× را نشان می دهد. مطابق شکل توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات SiC در زمینه آلیاژ آلومینیم برای هر دو نمونه مشاهده می شود. میکروآنالیز شیمیایی (EDS) صورت گرفته از زمینه کامپوزیت نمونه SA1 در شکل ۲ بیانگر حضور پیک های مربوط به Al و همچنین پیک های ضعیف مربوط به Si می باشد. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از سطح این نمونه نیز موید حضور فاز SiC در زمینه α-Al است (شکل ۳).

در شکل ۱- ب علاوه بر ذرات SiC حضور ذرات تیغه ای شکل به رنگ تیره در ساختار نمونه SA2 دیده می شود. میکروآنالیز شیمیایی (EDS) صورت گرفته از این ذرات در شکل ۴- ب بیانگر حضور پیک های مربوط به Al و Si و C

مطابق با جدول ۱ از چهار ترکیب با نسبت های مختلف از پودرهای آلومینیم، سیلیسیم و کاربید سیلیسیم به همراه محلول چسب سیلیکات سدیم به مقدار ۲۰ درصد وزنی آب، به منظور لایه نشانی بر روی زیرلایه قبل از عملیات ذوب سطحی استفاده شد.

جدول ۱. ترکیبات مختلف پودر پیش نشست بر سطح آلیاژ پایه

کد نمونه	% Al	% SiC	% Si
SA1	۸۰	۲۰	۰
SA2	۷۰	۳۰	۰
SA3	۷۲/۸	۲۰	۷/۲
SA4	۶۸	۲۰	۱۲

جهت انجام عملیات ذوب سطحی از یک دستگاه جوش تنگستن دستی ساخت شرکت میلر آمریکا^۱ استفاده شد. الکترود مورد استفاده از جنس تنگستن ۲٪ توریم با نشانه سبز رنگ، گاز مصرفی آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ با فلوی ۸ ml/min و جریان از نوع متناوب (AC) با موج سینوسی می باشد. مشخصات پارامترهای فرآیند جوشکاری TIG در جدول ۲ ارائه شده است. جهت تخمین گرمای ورودی از رابطه ۱ استفاده شد، که در آن V ولتاژ، I جریان و S سرعت جوشکاری است. در فرآیند TIG مقدار η (ضریب بازده قوس) بین ۳۵-۵۰٪ متغیر بوده و معمولاً ۴۸٪ در نظر گرفته می شود.

$$E(kJ/cm) = [\eta \times V(V) \times I(A)] / S(mm/s) \quad (1)$$

جهت بررسی ریزساختاری سطح نمونه های رویه کاری شده، پس از عملیات متالوگرافی و حکاکی سطحی با استفاده از محلول هیدرو فلوریک اسید ۰/۵ درصد در مدت زمان ۲۰ ثانیه، از میکروسکوپ انعکاسی نوری^۲ و

³. Leo1455 VP Model

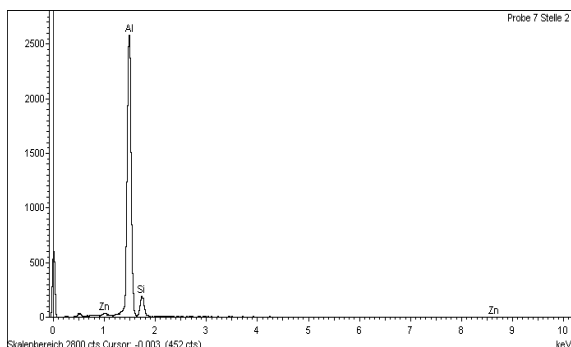
⁴. Philips pw1840 Model

¹. Miller-Syncrowave Model

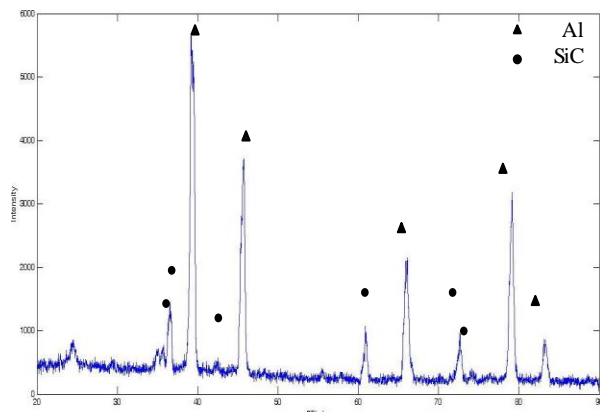
². MEIJI TECHNO Model

به ایجاد سیلیسیم آزاد در مذاب آلومینیم می‌شود، از طرفی دیگر مطابق با دیاگرام فازی Al-Si چنین استنباط می‌شود که سیلیسیم قابلیت انحلال پایینی در آلومینیم داشته، بنابراین می‌توان انتظار داشت تقریباً تمام سیلیسیم موجود در ترکیب آلیاژ به صورت سیلیسیم یوتکتیکی با مرفولوژی سوزنی رسوب کند [۱۴]. در تحقیق مشابه انجام شده به روش جوشکاری لیزر نیز حضور فاز Si سوزنی در زمینه Al-Si مشاهده شده است [۱۲].

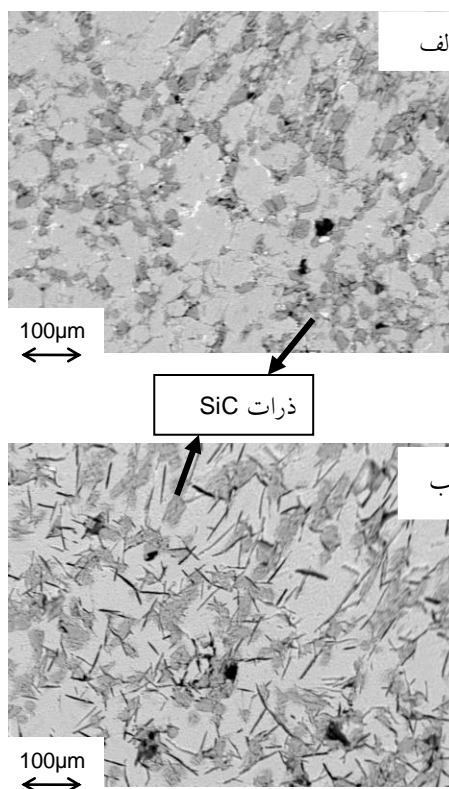
حضور ذرات تیغه‌ای مربوط به فاز Al_4SiC_4 در ساختار نمونه SA2 شامل ۳۰٪ وزنی ذرات SiC منجر به کاهش اتصال بین روکش و زیرلایه می‌شود [۱۳]. بنابراین به نظر می‌رسد که حضور ذرات SiC در ترکیب مخلوط بودر پیش‌نشست به مقدار ۲۰٪ وزنی، ترکیب بهینه باشد.



شکل ۲. میکروآنالیز شیمیایی (EDS) از زمینه نمونه SA1



شکل ۳. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از سطح نمونه SA1



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (الف)

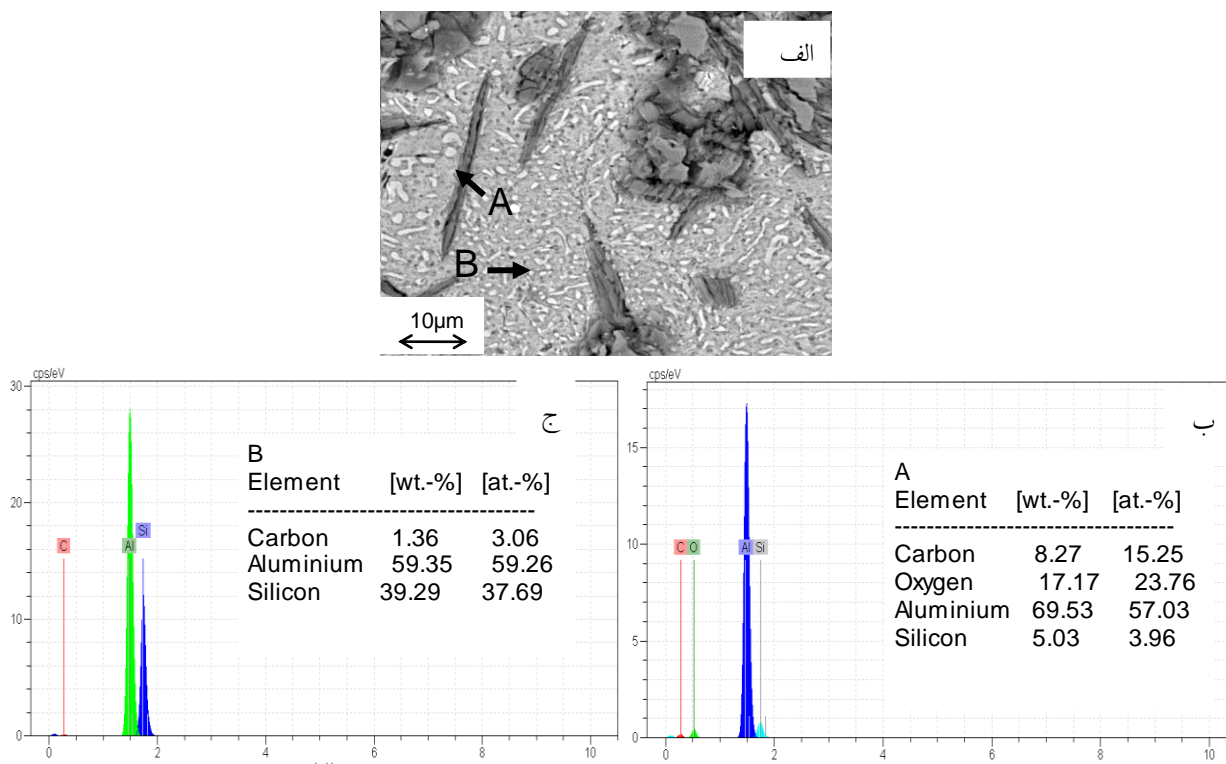
نمونه SA1 (ب) نمونه SA2

است. با توجه به تحقیقات مشابه در بررسی ساختار کامپوزیتی Al-SiC توسط آقای کومار و سیمچی احتمال می‌رود که این ذرات مربوط به تشکیل فاز Al_4SiC_4 در ترکیب کامپوزیت باشد [۱۲ و ۱۳].

در اثر گرمای ناشی از فرآیند جوشکاری و واکنش بین ذرات SiC و مذاب آلومینیم، این ذرات به صورت جزئی در مذاب حل شده و منجر به ایجاد Si و C آزاد در مذاب آلومینیم می‌شود. در این حالت انتظار می‌رود ترکیباتی مانند Al_4SiC_4 و Si مطابق با واکنش ۱ در دمایی بالاتر از $1400^\circ C$ درجه سانتیگراد در زمینه کامپوزیت ایجاد شود [۱۲].

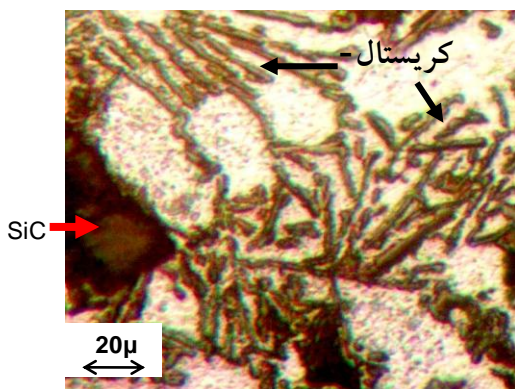


میکروآنالیز شیمیایی (EDS) از زمینه کامپوزیت نمونه SA2 مطابق با شکل ۴-ج بیانگر حضور پیک‌های قوی مربوط به Si می‌باشد که نشان دهنده تشکیل ساختار یوتکتیکی Al-Si است. در حین عملیات جوشکاری، انحلال ذرات SiC منجر



شکل ۴. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه SA2 (ب) میکروآنالیز شیمیایی (EDS) نقطه A (ج) میکروآنالیز شیمیایی (EDS) نقطه B

کنار فاز سخت و شکننده سیلیسیم یوتکتیکی است [۱۶].

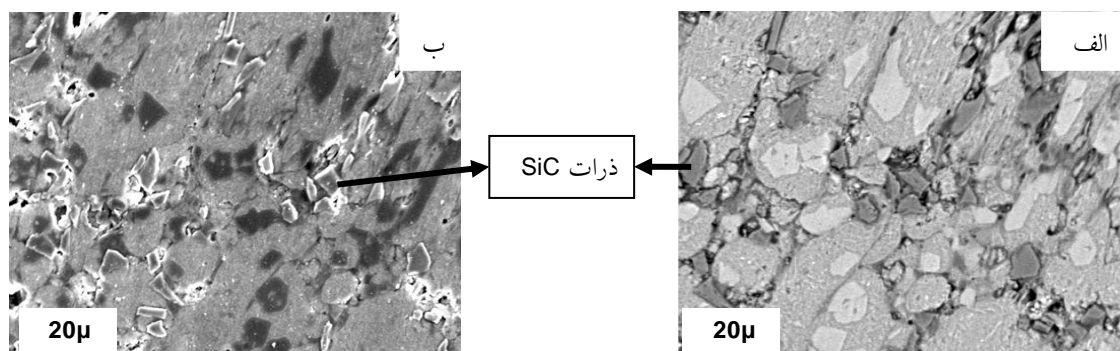


شکل ۵. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه SA3

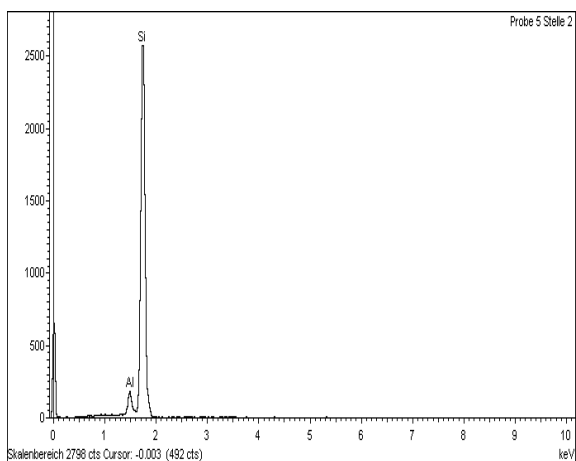
شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تحت سیگنال‌های الکترون‌های برگشتی (BS) و الکترون‌های ثانویه (SE) از سطح نمونه SA4 پس از عملیات جوشکاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ذرات روشن در شکل ۶- الف و ذرات تیره در شکل ۶- ب با مرفولوژی گوشه‌دار در کنار ذرات SiC در ساختار روکش تشکیل شده است.

به منظور بهبود ترشوندگی ذرات SiC با مذاب آلومینیم و بهبود چسبندگی روکش با زیر لایه در حین فرآیند جوشکاری سطحی، Si در دو مقدار ۷/۲ و ۱۲ درصد وزنی به مخلوط پودر پیش‌نشست حاوی SiC ۲۰٪ اضافه گردید. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه حاوی ۷/۲ درصد وزنی سیلیسیم (SA3) را نشان می‌دهد. مطابق شکل کریستال‌های سوزنی شکل سیلیسیم منجر به تشکیل ساختار یوتکتیکی در زمینه کامپوزیتی روکش شده است. به نظر می‌رسد که جوانه زنی کریستال‌های سیلیسیم یوتکتیکی از سطح ذرات SiC شروع شده و به صورت هم‌بافته^۱ رشد کند [۱۵]. در حین انجماد این نوع آلیاژها، دندریت‌های اولیه آلومینیم در ساختار تشکیل و رشد کرده و پس از رسیدن ترکیب آلیاژ به نقطه یوتکتیک، فرآیند انجماد به صورت فاز سخت و خشن یوتکتیک Al-Si خاتمه می‌یابد، در این حالت ترکیب روکش در دمای اتاق شامل یک فاز نرم از دندریت‌های آلومینیم در

^۱. Epitaxial Growth

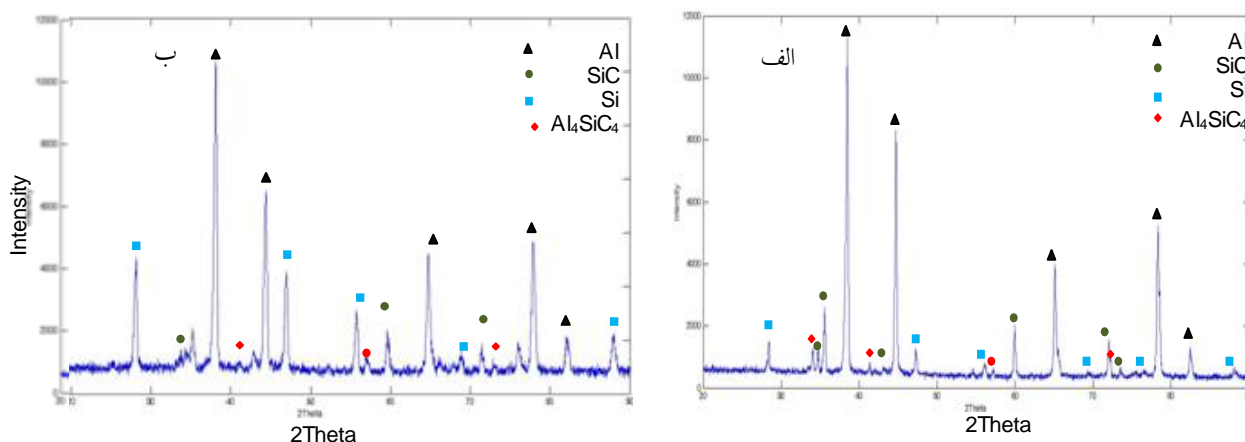


شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح نمونه SA4 تحت سیگنال الف) الکترون‌های برگشتی (BS) ب) الکترون‌های ثانویه (SE)



شکل ۷. میکروآنالیز شیمیایی (EDS) از ذرات به رنگ روشن در زمینه یونکتیک نمونه SA4

میکروآنالیز شیمیایی (EDS) صورت گرفته از این ذرات مطابق با شکل ۷ بیانگر ذرات سیلیسیم آزاد است. با توجه به دیاگرام فازی Al-Si با افزایش سیلیسیم آلیاژ به مقادیر بالاتر از ترکیب یونکتیک انتظار تشکیل Si پرویونکتیک با مرفولوژی گوشه دار در ترکیب می‌رود. مناطق سفید رنگ اطراف ذرات SiC در شکل ۶-ب نیز نشان دهنده انحلال جزئی این ذرات در مذاب آلومینیم است. شکل ۸ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) از سطح نمونه‌های SA3 و SA4 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سیلیسیم اولیه در مخلوط پودری شدت پیک‌های مربوط به سیلیسیم افزایش یافته است. تشکیل ذرات سیلیسیم پرویونکتیک گوشه دار در نمونه SA4 علت افزایش شدت پیک مربوط به Si است.



شکل ۸. الگوی پراش پرتو ایکس (الف) نمونه SA3 ب) نمونه SA4

(۲) افزودن سیلیسیم اولیه در مخلوط پودر پیش نشست به مقادیر بالاتر از ۱۲٪ وزنی منجر به رسوب ذرات سیلیسیم آزاد در زمینه Al-Si یوتکتیک می‌شود.

(۳) سختی سطح روکش با افزودن ذرات SiC و سیلیسیم اولیه در پودر پیش نشست افزایش یافته بنحوی که حداکثر سختی از مخلوط پودری حاوی ۱۲٪ وزنی سیلیسیم به میزان HV ۱۹۰ بدست آمد.

منابع

۱. ا. طهماسبی، کتاب آلومینیم، اصفهان، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۳.
2. E. A. Starke, *Aluminum alloys: properties and applications*, Encyclopedia of Materials Science and Technology, 114-116.
3. *Surface engineering*, ASM Metals Handbook, Vol. 5, 10th Ed., 1993.
4. W.L. Tomilson and A.S. Bransodson, *Surface engineering*, Vol. 11, 1990, 337.
5. J. Xu and W. Liu, *Microstructure and wear properties of laser cladding Ti-Al-Fe-B coatings on AA2024 aluminum alloy*, Materials and Design, 27(2006)405-410.
۶. ش. موسوی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
7. R. Sun and Y. Lei, *Microstructure and hardness of laser clad SiCp-Al composite coatings on Al alloys*, Materials Letters, 62(2008)3272-3275.
8. R. Jendrzejewski and K. Van Acker, *Metal matrix composite production by means of laser dispersing of SiC and WC powder in Al alloy*, Applied Surface Science, 255(2009)5584-5587.
9. S. Yang and N. Chen, *In situ formation of MoSi2/SiC composite coating on pure Al by laser cladding*, Materials Letters, 57(2003) 3412-3416.
10. E. Toyserkani, *Laser cladding*, CRC Press, 2005.
11. K.N. Strafford and associates, *Surface Engineering Practice*, Ellis Horwood Limited, 1990.
12. R. Anandkumar, *Microstructure and wear studies of laser clad Al-Si/SiC(p) composite coatings*, Surface & Coatings Technology, 201(2007)9497-9505.

نتایج آزمون ریزسختی سنجی از سطح روکش‌های ایجاد شده در جدول ۳ ارائه شده است. با افزودن ذرات SiC به میزان ۲۰ درصد وزنی به مخلوط پودری پیش نشست سختی سطحی به جهت حضور این ذرات (با سختی حدوداً ۲۰۰HV) افزایش یافته است. سختی روکش با افزودن مقدار بیشتر ذرات SiC به میزان ۳۰٪ وزنی افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. علت این موضوع را می‌توان مربوط به تشکیل ساختار یوتکتیک غنی از کریستال‌های سوزنی Si با سختی بالا در زمینه یوتکتیکی Al-Si و همچنین تشکیل ذرات تیغه‌ای شکل Al₄SiC₄ با سختی در حدود ۴۰۰HV دانست. افزودن Si به مخلوط پودر پیش نشست نیز موجب افزایش سختی سطحی روکش Al-20SiC می‌شود زیرا در این حالت کریستال‌های سیلیسیم منجر به تشکیل ساختار یوتکتیکی در زمینه کامپوزیت می‌شود. با اضافه کردن مقدار سیلیسیم به میزان ۱۲٪ وزنی در مخلوط پودری، سختی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (۱۹۰HV) که دلیل آن را می‌توان ناشی از حضور ذرات Si آزاد با سختی بالا (HV ۸۰۰-۴۰۰) در زمینه روکش دانست. در تحقیقی با ایجاد روکش به صورت تغذیه مخلوط پودری حاوی Al-12%Si و ۳۰٪ وزنی SiC توسط فرآیند جوشکاری لیزر تحت شرایط حرارت ورودی کم و زیاد سختی سطح به ترتیب برابر ۱۴۰ و HV ۲۷۰ گزارش شده است [۱۲].

جدول ۳. سختی سطحی نمونه‌های روکش داده شده

کد نمونه	زیرلایه	SA1	SA2	SA3	SA4
عددسختی (HV)	۷۰	۱۰۵	۱۳۲/۵	۱۲۱	۱۹۰

نتیجه‌گیری

(۱) ریزساختار لایه سطحی کامپوزیتی حاصل شامل ذرات کاربید سیلیسیم در زمینه یوتکتیکی Al-Si به همراه کریستال‌های سوزنی Si و همچنین ذرات سخت Si آزاد با مورفولوژی گوشه‌دار در نمونه‌های حاوی سیلیسیم اولیه در مخلوط پودر پیش نشست است.

13. A. Simchi and D. Godlinski, *Effect of SiC particles on the laser sintering of Al-7Si-0.3Mg alloy*, Scripta Materialia, 59(2008)199-202.
14. C. Cui and associates, *Spray forming of hypereutectic Al-Si alloys*, Journal of Materials Processing Technology, 209(2009) 5220-5228.
15. F. Robles, J. Sokolowski, *Thermal analysis and microscopical characterization of Al-Si hypereutectic alloys*, Journal of Alloys and Compounds 419(2006)180-190.
16. E. Ye, *An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications*, Journal of Materials Engineering and Performance, 12(2003)288-297.