



اثر افزودن ذرات SiC بر ریزساختار و سختی پوشش کامپوزیتی Al-SiC حاصل از پاشش سرد

زهرا عیوضی¹، امیر عبدالله‌زاده^{2*}، حمید ضیائی¹، رجب‌علی سراج³، فیروز کارگر⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی متالورژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، zadeh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 97/8/22	با توسعه کاربرد قطعات منیزیمی در صنایع مختلف، ضرورت ایجاد لایه محافظ در برابر خوردگی و سایش روی این قطعات بیشتر احساس می‌شود. در این پژوهش پوشش کامپوزیتی Al-SiC با استفاده از فرایند پاشش سرد روی زیرلایه آلایژ منیزیم AZ31B ایجاد شد. برای این منظور پودر آلومینیم خالص و پودرهای کامپوزیتی با درصد وزنی 25، 50 و 75 از ذرات تقویت کننده SiC آماده‌سازی شد. پوشش‌دهی با استفاده از گاز نیتروژن در دمای 300 °C، فشار 30 بار و فاصله‌ی پاشش 20 mm انجام شد. اثر افزودن درصدهای مختلف پودر SiC بر کیفیت و خواص پوشش‌های حاصل بررسی شد. مشخصات ریزساختاری سطح مقطع پوشش‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون ریزسختی سنجی و نرم افزار تحلیل تصویر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد ذرات تقویت کننده، به دلیل شکستن و خرد شدن ذرات بزرگ‌تر و هم‌چنین عدم اتصال مناسب ذرات سخت تقویت کننده با زمینه، مقدار تخلخل پوشش افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش درصد وزنی پودر SiC در مخلوط پودر اولیه، توزیع این ذرات در پوشش یکنواخت‌تر شده و سختی پوشش افزایش می‌یابد. سختی پوشش حاصل از پودر کامپوزیتی Al-75wt%SiC حدود 90 HV است که در مقایسه با پوشش آلومینیم خالص بیش از 80 درصد افزایش را نشان می‌دهد.
پذیرش: 97/9/29	
کلیدواژگان: پاشش سرد کامپوزیت Al-SiC سختی تخلخل منیزیم AZ31B	

The effects of SiC particles on the microstructure and hardness of cold sprayed Al-SiC composite coating

Zahra Eyvazi, Amir Abdollah-zadeh*, Hamid Ziaei, RajabAli Seraj, Firooz Kargar

Department of Material Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, zadeh@modares.ac.ir

Keywords

Cold spray
Al-SiC Composite
Hardness
Porosity
Magnesium AZ31B

Abstract

With the development of the applications of magnesium components in many industries, relatively low corrosion and wear resistance of this alloy leads to the development of different protective layers. In this paper, the effect of SiC reinforcement on the cold spraying behavior of Al-SiC powder on a magnesium alloy substrate is addressed. The pure Al powder is blended with different amount of SiC powder including 25, 50 and 75 wt.%. The feedstock is sprayed on sand blasted AZ31B substrate. The process is carried out with 30bar pressure and 300°C temperature of process gas (Nitrogen). A 20mm standoff distance is used for spraying. The effect of different values of SiC on the deposition behavior of the Al-SiC powders are investigated. The coatings cross-section is evaluated by scanning electron microscopy, image analysis software and microhardness test. The results showed that the high velocity reinforcement particles leads to the SiC particle breaking during the process. This phenomenon increases the porosity of the coating. Furthermore, the higher value of reinforcement in initial powder leads to the homogenous distribution of them and the higher coating hardness. The hardness of the Al-75wt% SiC coating is about 90 HV, which is increased by 80% compared to pure Al coating microhardness.

1-مقدمه

جلوگیری از خوردگی و سایش این آلایژها ایجاد لایه مقاوم به سایش و خوردگی روی آن‌ها است. ایجاد لایه‌ای نازک برای جلوگیری از نفوذ مواد خورنده در افزایش مقاومت به خوردگی این قطعات بسیار موثر است. در بیشتر موارد خوردگی و سایش همزمان در قطعات آلایژ منیزیم رخ می‌دهد. بنابراین ضروری است که لایه محافظ به طور همزمان، مقاوم به سایش و خوردگی باشد.

آلایژهای منیزیم به دلیل چگالی پایین و استحکام ویژه بالا، پتانسیل زیادی برای کاربرد در صنایع هوایی و اتومبیل سازی دارند [1]. علیرغم مزایای این آلایژها، مقاومت به خوردگی و سایش ضعیف آن‌ها مهمترین مانع برای استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف است [2,3]. یکی از راه‌های موثر برای

Please cite this article using:

Eyvazi, Z., Abdollah-zadeh, A., Ziaei, H. Seraj, R.A., and Kargar, F. "The effects of SiC particles on the microstructure and hardness of cold sprayed Al-SiC composite coating", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 385-392, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

محققان را برای ایجاد پوشش‌های مقاوم به خوردگی و سایش به خود جلب کرده است.

فرایند پاشش سرد روش پوشش‌دهی حالت جامد است که دمای جریان گاز همیشه زیر دمای ذوب ذرات است. بنابراین ذرات پودر پیش از برخورد به سطح زیرلایه ذوب نمی‌شوند. در فرایند پاشش سرد، ذرات پودر جامد به جریان گاز پرفشار تزریق شده و با عبور از یک نازل همگرا-واگرا به سمت زیرلایه شتاب داده می‌شوند. در صورتی که سرعت ذرات پودر بیش از سرعت بحرانی باشد به دلیل وقوع پدیده ناپایداری برشی آدیاباتیک تغییر شکل پلاستیک شدیدی در ذرات پودر رخ می‌دهد. این امر باعث تشکیل جت فلزی در سطح می‌شود. تشکیل جت فلزی باعث تماس فلز با فلز شده و در نهایت اتصال متالورژیکی بین ذرات پودر و زیرلایه ایجاد می‌شود. این فرایند قابلیت ایجاد پوشش‌های با تراکم و ضخامت بالا، مقدار اکسیژن بسیار کم، عاری از تنش پسماند کششی و عدم تبدیل فازی را دارد که با سایر روش‌های پوشش‌دهی قابل دست‌یابی نیست [13].

کارایی پایین پوشش‌های ایجاد شده با مواد فلزی ضرورت استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی را افزایش داده است. افزودن ذرات سخت سرامیکی به پوشش‌های حاصل از پاشش سرد نه تنها باعث بهبود سختی و مقاومت به سایش پوشش می‌شود بلکه به افزایش چگالی پوشش نیز کمک می‌کند. از طرفی پوشش‌های دارای چگالی بالا به دلیل کم بودن تخلخل در آن‌ها از مقاومت به خوردگی مناسبی برخوردار خواهند بود [14]. به علت استحکام ویژه بالا، مقاومت به خوردگی خوب و قیمت پایین آلومینیوم و همچنین استحکام بالا، سختی بالا و چگالی پایین کاربید سیلیسیم، آلومینیوم مستحکم شده با ذرات سرامیکی کاربید سیلیسیم به عنوان گروه مهمی از مواد با کارایی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. کامپوزیت Al-SiC یک کامپوزیت زمینه آلومینیومی به همراه ذرات سخت کاربید سیلیسیم به عنوان فاز تقویت کننده است. حضور ذرات سرامیکی در پودر اولیه منجر به تشکیل ساختار کامپوزیتی، متراکم کردن پوشش، افزایش سختی و افزایش بازده پوشش‌دهی می‌شود [15]. پژوهش‌های متعددی در زمینه پاشش سرد پودرهای کامپوزیتی انجام شده است [16-18]. کاهش درصد وزنی ذرات پودر تقویت کننده در پوشش نسبت به درصد وزنی اولیه پودر، فرسایش نازل و وجود تخلخل و ترک از معایب این پوشش‌ها است. هدف این پژوهش بررسی تاثیر افزودن درصد‌های مختلف از ذرات سخت SiC در پودر کامپوزیتی بر سختی و ریزساختار پوشش کامپوزیتی Al-SiC است. بنابراین پوشش‌دهی پودر آلومینیوم خالص و مخلوط پودرهای Al با درصد‌های وزنی 25، 50 و 75 از پودر SiC انجام شد. پوشش‌های حاصل از لحاظ ریزساختاری، میزان سختی و درصد تخلخل مورد ارزیابی قرار گرفتند.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش پودر آلومینیوم خالص تجاری با خلوص 99.60 درصد و اندازه دانه کوچکتر از 45 میکرومتر، ساخته شده به روش افشانش گازی و پودر سرامیکی SiC با اندازه دانه‌ی کوچکتر از 30 میکرومتر برای پوشش‌دهی استفاده شد. مورفولوژی ذرات پودر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. توزیع اندازه ذرات نیز با استفاده از دستگاه آنالیز لیزری اندازه ذرات¹ (LPSA) موجود در دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری شد. ورق منیزیم AZ31B به عنوان زیرلایه برای پوشش‌دهی انتخاب شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه در جدول 1 نشان داده شده است. ورق‌ها با ضخامت 3 میلی‌متر تهیه و

روش‌های مختلف اصلاح سطح برای بهبود خواص سطحی آلیاژهای منیزیم به کار گرفته شده است [3]. از طرفی روش‌های مختلفی برای ساخت کامپوزیت‌های سطحی پایه فلزی وجود دارد. از جمله پاشش حرارتی، لایه‌نشانی و آلیاژسازی سطحی با لیزر و جوشکاری. در مورد پوشش‌های ایجاد شده به روش پاشش حرارتی، قوش و همکاران [4] مقادیر و اندازه متفاوت ذرات تقویت کننده SiC در پاشش پلاسمایی پودر کامپوزیتی Al/SiC را روی زیرلایه‌هایی از جنس آلومینیوم و فولاد ساده کربنی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش مقادیر ذرات SiC در پوشش و کاهش اندازه آن‌ها، استحکام چسبندگی پوشش کاهش و مقاومت پوشش در برابر سایش و فرسایش بهبود می‌یابد. در کاری دیگر یزدی و کاشانی‌بزرگ [5] فرایند آلیاژسازی را با استفاده از تکنیک TIG و پودر BN بر روی سطح تیتانیوم خالص انجام داده و به بررسی ریزساختار، ریزسختی و خواص سایشی سطح تولید شده پرداختند. نتایج این آزمایش حاکی از بهبود خواص سطحی بود. در کاری مشابه، کامپوزیت Al/SiCp با استفاده از فرایند TIG روی سطح آلومینیوم A380 ایجاد شد و خواص سطحی پس از ایجاد لایه کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت [6]. بررسی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی لایه کامپوزیتی ایجاد شده حاوی ذرات SiC به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز انجام شد، مطابق نتایج بدست آمده، ریزسختی و خواص سایشی بهبود قابل توجهی یافت [7]. کاظمی و همکاران [8] به منظور کامپوزیت‌سازی سطح فولاد ابزار گرمکار H13، از ذرات کاربید تیتانیوم پیش‌نشانی شده و فرایند کامپوزیت‌سازی لیزر پالسی Nd:YAG استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مشارکت مناسب و توزیع یکنواخت ذرات TiC در مناطق کامپوزیتی، سبب ایجاد سطوح عاری از ترک و تخلخل شده و همچنین مشارکت ذرات TiC با سختی و استحکام بالا از یک سو سبب کاهش ضریب اصطکاک و از سوی دیگر با جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک و ترک سطحی، سبب بهبود مقاومت سایشی نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به سطح غیرکامپوزیتی، شد. به‌کارگیری روش‌های ذوبی در کامپوزیت‌سازی سطحی به دلیل معایبی چون ایجاد فاز مذاب، عدم کنترل فرایند، عدم توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه، اکسیداسیون، تشکیل فاز نامطلوب بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه، تشکیل تخلخل و ایجاد ریزساختار غیرهمگن و دندردی محدود شده است [9,10]. برای به حداقل رساندن این معایب، روش‌های کامپوزیت‌سازی سطحی حالت جامد گسترش یافته‌اند.

فرایند همزن اصطکاکی روشی برای ساخت کامپوزیت سطحی در حالت جامد است. در این زمینه، احمدی‌فرد و همکاران [11] کامپوزیت سطحی پایه آلومینیوم 5083 تقویت شده با ذرات SiC را با استفاده از فرایند همزن اصطکاکی تولید نمودند. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش ریزسختی و استحکام کششی نسبت به فلز پایه بود. علیدخت و همکاران [12] به بررسی رفتار سایش در کامپوزیت پایه آلومینیومی تولید شده به روش همزن اصطکاکی پرداختند، در این مطالعه از آلیاژ A356 به عنوان فلز پایه و از ذرات SiC و MoS₂ به عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شد. بررسی رفتار سایش در کامپوزیت تولید شده نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه خواص سایشی بود. در کامپوزیت‌های ایجاد شده توسط فرایند همزن اصطکاکی، به علت وجود مناطق متأثر از حرارت، خواص مکانیکی و خوردگی کاهش می‌یابد. پاشش سرد یکی از فرایندهای نوین زیرمجموعه فناوری پاشش حرارتی است که به دلیل پوشش‌دهی در حالت جامد و نرخ رسوب‌دهی بالا توجه بسیاری از صنایع و

¹ Laser Particle Size Analyzer

3- نتایج و بحث

3-1- مشخصه یابی پودر

شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و منحنی توزیع اندازه ذرات از پودر آلومینیوم خالص و پودر SiC اولیه را نشان می‌دهد. ذرات پودر آلومینیوم دارای مورفولوژی کروی و ذرات SiC به صورت گوشه‌دار هستند. متوسط اندازه ذرات پودر آلومینیوم خالص و کاربید سیلیسیم به ترتیب 18.1 و 11.8 μm اندازه‌گیری شد. مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات پودر از جمله عوامل موثر بر کیفیت، درصد تخلخل نهایی و میزان تغییر شکل ذرات پودر هستند. استفاده از ذرات با توزیع اندازه عمدتاً یکسان باعث توزیع سرعت یکنواخت آن‌ها می‌شود. هرچه توزیع اندازه ذرات پودر باریک‌تر باشد، کیفیت پوشش حاصل بالاتر خواهد بود. در فرایند پاشش سرد سرعت ذرات رابطه مستقیم با وزن ذرات پودر دارد. با توجه به اینکه ذرات با اندازه یکسان دارای سرعت یکسانی هستند، بنابراین بهتر است اختلاف اندازه ذرات پودر کم باشد تا اختلاف سرعت ذرات پودر کمتر شود. اندازه مناسب ذرات تقویت‌کننده نیز باعث پراکندگی یکنواخت آن‌ها در پوشش می‌شود. از طرفی مورفولوژی گوشه‌دار ذرات سرامیکی باعث گیرافتادن و اتصال مکانیکی این ذرات در پوشش می‌شود.

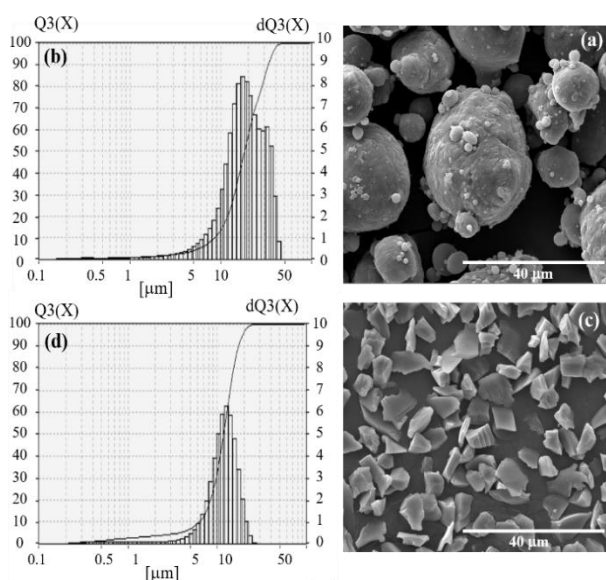


Fig. 2 (a) SEM image and (b) particle size distribution of pure Al powder, (c) SEM image and (d) particle size distribution of SiC powder

شکل 2 (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و (b) نمودار توزیع اندازه ذرات پودر آلومینیوم خالص، (c) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و (d) نمودار توزیع اندازه ذرات پودر کاربید سیلیسیم

3-2- بررسی ریز ساختاری

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های حاصل از پاشش سرد پودر آلومینیوم خالص و پودر کامپوزیتی Al-SiC در شکل 3 نشان داده شده است. مطابق با تصاویر، ریزترک‌هایی در پوشش آلومینیوم خالص مشاهده می‌شود. پوشش‌های کامپوزیتی، ریزساختار متراکمی را نشان می‌دهند که شامل ذرات سخت SiC است که در بین ذرات نرم آلومینیوم

در ابعاد 20x50 میلی‌متر برش داده شدند. به منظور حذف لایه‌ی اکسیدی، سطح نمونه‌ها با سنباده شماره 60 تا 400 سنباده‌زنی شد. پیش از پوشش‌دهی، به منظور افزایش زبری سطح و بهبود چسبندگی پوشش، سطح زیرلایه‌ها ماسه پاشی¹ شدند. سطح زیرلایه با ذرات آلومینا با اندازه مش 36، فشار هوای 8 بار و زاویه 45 درجه ماسه‌پاشی و سپس به مدت 30 ثانیه در حمام اولتراسونیک استون قرار گرفته و تمیز شدند. عملیات پوشش‌دهی با استفاده از دستگاه پاشش سرد موجود در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در شکل 1 تصویر شمایی از این دستگاه نشان داده شده است. قسمت‌های مختلف دستگاه شامل نازل همگرا-واگرا، گرمکن، منبع گاز، محفظه پیش‌گرم و منبع تغذیه پودر نشان داده شده است.

در این دستگاه، نازل ثابت بوده و زیرلایه نسبت به نازل حرکت می‌کند. پودرهای کامپوزیتی Al-SiC با سه ترکیب 25، 50 و 75 درصد وزنی از ذرات SiC به‌طور مکانیکی مخلوط شدند. پوشش‌دهی با استفاده از گاز نیتروژن در فشار 30 بار و دمای گاز 300 درجه سانتیگراد و فاصله 20 میلی‌متر انجام شد. سرعت حرکت زیرلایه 10 میلی‌متر بر ثانیه و فاصله گام بین خطوط پاشش، 1.5 میلی‌متر انتخاب شد و برای هر نمونه سه لایه پوشش‌دهی انجام گرفت تا ضخامت مناسبی از پوشش روی سطح ایجاد شود.

به منظور بررسی ریزساختاری سطح مقطع پوشش‌ها، مقطع زنی و مات سرد نمونه‌ها انجام شد. سپس سنباده‌زنی و پرداخت کاری نمونه‌ها با روش استاندارد متالوگرافی صورت گرفت. ساختار پوشش‌های حاصل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی مقدار تخلخل پوشش‌ها، پنج تصویر از قسمت‌های مختلف سطح مقطع پرداخت کاری شده هر پوشش در بزرگنمایی 500 برابر تهیه و اندازه‌گیری تخلخل پوشش با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری Clemex ورژن 3.5.025 انجام شد. ریزسختی پوشش‌ها از 5 ناحیه، با نیروی 100 grf و زمان تاخیر 15 ثانیه اندازه‌گیری شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق منیزیم AZ31B برحسب درصد وزنی

other	Mn	Zn	Al	Mg
< 0.2	0.2-1	0.6-1.4	2.5-3.5	bal

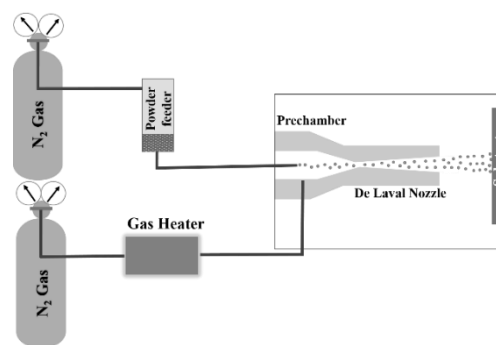


Fig.1 Schematic of cold spray process

شکل 1 تصویر شمایی از فرایند پاشش سرد

¹ Sandblast

دلیل کاهش احتمال برخورد این ذرات به یکدیگر و برخورد آن‌ها با زمینه نرم آلومینیومی انرژی جنبشی این ذرات توسط زمینه جذب و از شکسته شدن آن‌ها جلوگیری می‌شود. به همین خاطر در پوشش ایجاد شده با استفاده از پودر SiC 25wt% Al در مقایسه با پوشش‌های حاصل از پودرهای کامپوزیتی با درصد ذرات تقویت کننده بیشتر، میزان شکسته شدن ذرات سرامیکی بسیار کم است. در حالی که با افزایش کسر ذرات تقویت کننده در پودر اولیه، احتمال برخورد و برهمکنش آن‌ها با یکدیگر بیشتر شده که منجر به ترک خوردن، شکستن و خرد شدن ذرات و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در پوشش نهایی می‌شود.

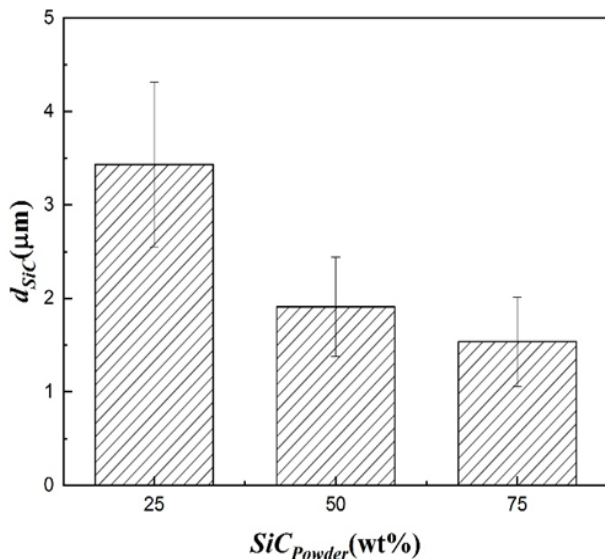


Fig. 4 Average size of SiC particles in the coatings

شکل 4 میانگین اندازه ذرات SiC در پوشش‌های کامپوزیتی

مطابق با شکل 5، بررسی فصل مشترک اتصال، نشان دهنده آشفتنگی و قفل مکانیکی پوشش در زیرلایه است. حضور ذرات SiC باعث تغییر شکل پلاستیک مضاعف ذرات نرم آلومینیومی و زیرلایه می‌شود. در این شرایط به دلیل فروری ذرات سرامیکی در زیرلایه، استحکام اتصال پوشش به زیرلایه افزایش می‌یابد.

شکل 6 درصد ذرات SiC باقی مانده در پوشش را نسبت به درصد وزنی پودر اولیه نشان می‌دهد. درصد ذرات SiC موجود در پوشش‌های حاصل از پودرهای کامپوزیتی با ترکیب 25، 50 و 75 درصد وزنی، به ترتیب برابر با 16.08، 27.96 و 38.32 درصد محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که درصد ذرات SiC باقی مانده در پوشش کمتر از مقدار آن در پودر اولیه است. در زمان پوشش دهی، ذرات SiC به علت سختی بالا دچار تغییر شکل پلاستیک نمی‌شوند و بخش زیادی از ذرات از سطح جدا می‌شوند. علاوه بر این، برخورد و برهمکنش ذرات SiC با یکدیگر در طول مسیر پاشش نیز ممکن است باعث کاهش درصد آن در پوشش شود [19].

تغییر شکل یافته حضور دارند. حضور ذرات SiC در پوشش‌های کامپوزیتی باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک بیشتر به زمینه نرم آلومینیومی و کوبش پوشش می‌شود. بنابراین اتصال ذرات آلومینیومی به یکدیگر بهبود می‌یابد و پوشش‌هایی با حداقل ترک حاصل می‌شود.

در شکل 3، ذرات سخت SiC با رنگ تیره‌تر در پوشش قابل مشاهده است. توزیع تصادفی و پراکندگی نسبتاً یکنواخت ذرات تقویت کننده در زمینه آلومینیومی در تمام پوشش‌ها قابل مشاهده است. ذرات SiC، مورفولوژی گوشه‌دار خود را بعد از پوشش دهی حفظ کرده‌اند. در واقع ذرات مذکور در اثر برخورد به زیرلایه دچار تغییر شکل پلاستیک نشده اما در میان ذرات آلومینیومی قرار گرفته و به دلیل مورفولوژی گوشه‌دار به صورت مکانیکی در زمینه نرم آلومینیومی قفل شده‌اند. این ذرات درشت SiC با مورفولوژی اولیه در پوشش کامپوزیتی SiC 25wt% Al با فلش نشان داده شده‌اند.

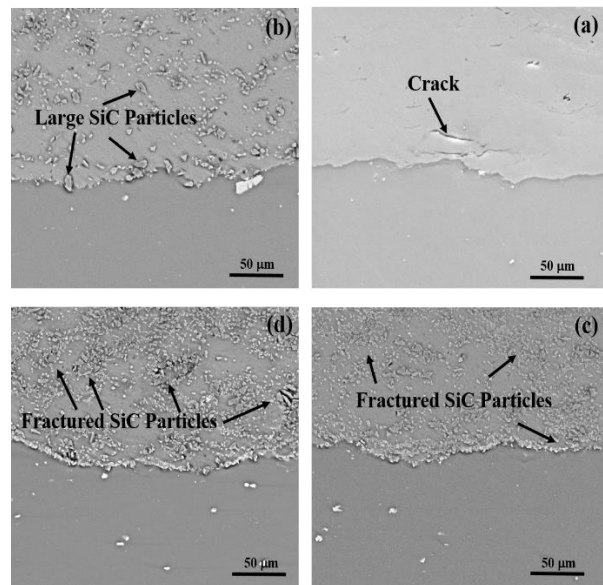


Fig.3 SEM cross-sections of deposited coatings with the feedstock powders for (a) Pure Al, (b) Al-(25wt.%)SiC, (c) Al-(50wt.%)SiC and (d) Al-(75wt.%)SiC

شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های حاصل از پودرهای (a) آلومینیم خالص، (b) Al-(25wt.%)SiC، (c) Al-(50wt.%)SiC و (d) Al-(75wt.%)SiC

شکل 4 میانگین اندازه ذرات SiC داخل پوشش‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده، اندازه آن‌ها در پوشش کاهش می‌یابد. شکسته شدن ذرات تقویت کننده در حین فرایند پاشش سرد پدیده معمولی است که به علت برخورد این ذرات به یکدیگر در طول مسیر پاشش و هم‌چنین برخورد آن‌ها به سطح زیرلایه اتفاق می‌افتد. با افزایش درصد ذرات SiC احتمال برخورد آن‌ها با یکدیگر افزایش پیدا کرده و باعث افزایش میزان ترک در آن‌ها می‌شود. برخورد ذرات بعدی منجر به شکست و ریز شدن اندازه آن‌ها می‌شود. بنابراین، با افزایش درصد ذرات SiC در پودر کامپوزیتی، اندازه آن‌ها در پوشش کوچک‌تر می‌شود. از طرف دیگر با شکسته شدن ذرات SiC، ابعاد آن‌ها کوچک‌تر شده و توزیع یکنواختی از این ذرات در زمینه آلومینیومی حاصل می‌شود. کاهش اندازه ذرات تقویت کننده در نمونه Al-50SiC و نمونه Al-75SiC کاملاً مشهود است. در مقادیر کمتر ذرات تقویت کننده، به

از آنجایی که شتاب‌گیری ذرات، با اندازه آن‌ها نسبت عکس دارد، ذرات کوچک‌تر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر به راحتی تحت تاثیر جریان گاز قرار گرفته و به سرعت‌های بالاتری دست می‌یابند. بنابراین، ذرات ریز SiC که دارای انرژی جنبشی بیشتری هستند، زمینه آلومینیومی را تحت تغییر شکل پلاستیک قرار داده و خود را درون پوشش جای می‌دهند. در صورتی که ذرات درشت SiC به خاطر سرعت کم‌تر و ابعاد بزرگ‌تری که دارند غالباً اتصال ضعیفی با زمینه تشکیل می‌دهند و در اثر برخورد ذرات بعدی از پوشش جدا می‌شوند. در نتیجه درصد ذرات تقویت‌کننده در پوشش نسبت به پودر اولیه کاهش می‌یابد [20]. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده، میزان حضور این ذرات در پوشش نهایی نسبت به پودر اولیه، کاهش بیشتری می‌یابد.

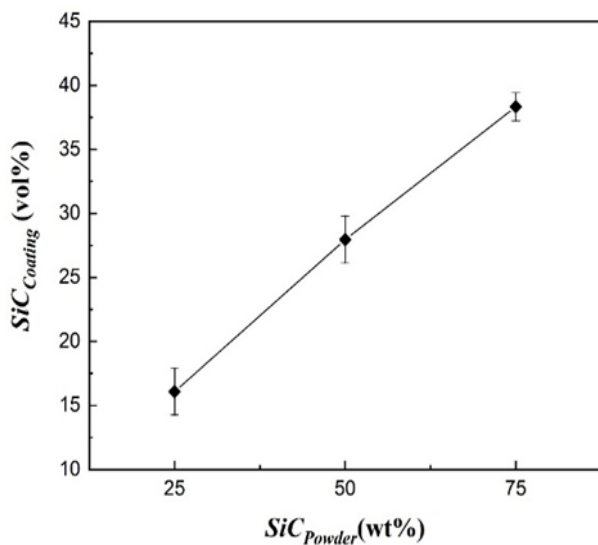


Fig. 6 Volume fraction of SiC in the coating as a function of SiC in the feedstock

شکل 6 درصد حجمی فاز تقویت‌کننده پوشش‌ها برای مقادیر مختلف ذرات SiC در مخلوط پودر اولیه

3-3- درصد تخلخل پوشش

نتایج حاصل از محاسبه درصد تخلخل پوشش‌های کامپوزیتی و خالص در شکل 7 نشان داده شده است. تخلخل پوشش آلومینیوم خالص و پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد شده با ترکیب پودر 25، 50 و 75 درصد وزنی به ترتیب برابر با 0.35، 0.68، 0.84 و 1.32 درصد محاسبه شد. با افزایش درصد ذرات SiC و به دلیل اثر چکش‌کاری¹ بیشتر آن‌ها، میزان تخلخل در زمینه نرم آلومینیومی پوشش کاهش پیدا می‌کند. اما در پوشش نهایی روند افزایشی درصد تخلخل مشاهده می‌شود. برهمکنش ذرات SiC باعث ترک خوردن و خرد شدن برخی از این ذرات و ایجاد فضای خالی در بین این ذرات می‌شود. همچنین ایجاد اتصال ضعیف بین ذرات SiC و آلومینیوم، احتمال تشکیل ترک و حفره در اطراف ذرات SiC را بیشتر می‌کند. تاثیر عوامل بیان شده با افزایش درصد ذرات SiC، افزایش می‌یابد. در نتیجه درصد تخلخل نهایی پوشش‌ها، بیشتر می‌شود.

شکل 8 فاصله بین ذرات تقویت‌کننده درون پوشش را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده در پودر اولیه، فاصله آن‌ها از یکدیگر در

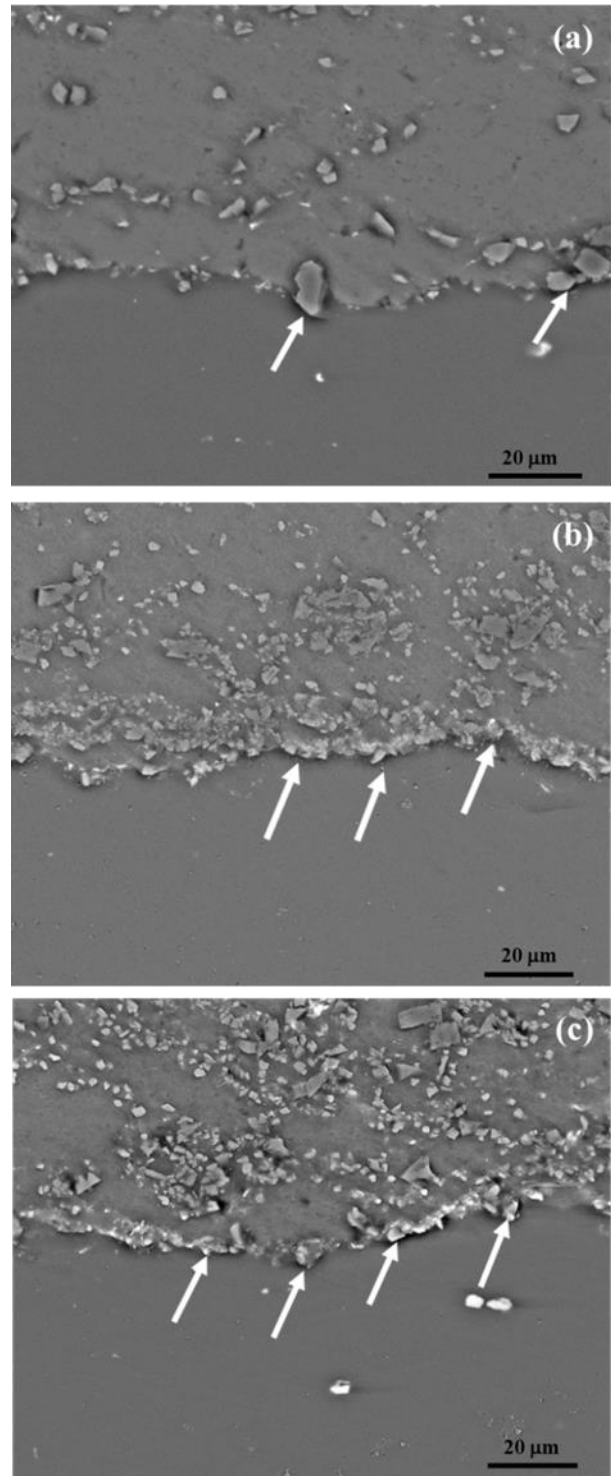


Fig. 5 SEM images of the composite coating interface; (a) Al-(25wt.%SiC), (b) Al-(50wt.%SiC) and (c) Al-(75wt.%SiC). Arrows show embedded SiC particles in substrate and mechanical locking

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک پوشش‌های کامپوزیتی؛ (a) Al-(25wt.%SiC)، (b) Al-(50wt.%SiC) و (c) Al-(75wt.%SiC). فلش‌ها نشان‌دهنده قفل مکانیکی ذرات تقویت‌کننده در زیرلایه هستند

¹- Peening Effect

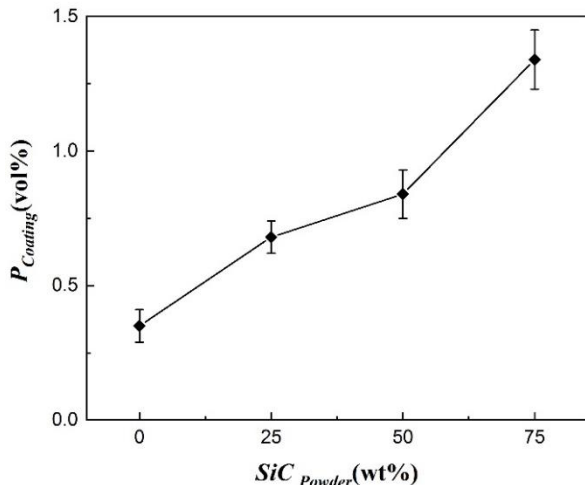


Fig. 7 Volume fraction of porosity in the coatings

شکل 7 درصد تخلخل پوشش‌های خالص و کامپوزیتی

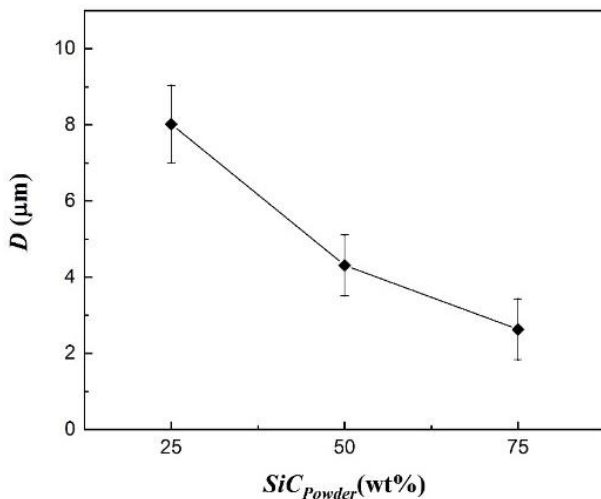


Fig. 8 SiC inter-particle distance in the composite coatings

شکل 8 فاصله بین ذرات SiC در پوشش‌های کامپوزیتی

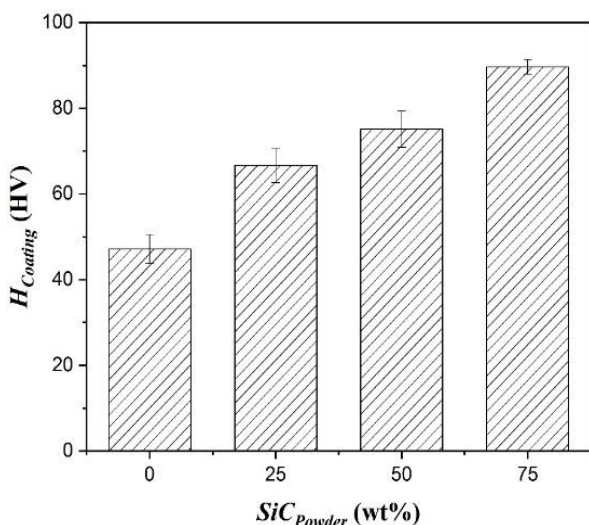


Fig. 9 Effect of SiC content on coatings microhardness

شکل 9 اثر مقادیر مختلف فاز تقویت کننده SiC بر ریزسختی پوشش‌ها

پوشش نهایی کمتر می‌شود. میانگین فاصله بین ذرات تقویت کننده در پوشش کامپوزیتی 25 و 75 درصد، به ترتیب برابر با 8.02، 4.31 و 2.63 میکرومتر است. افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده منجر به خرد شدن و توزیع یکنواخت‌تر و در نهایت کاهش فاصله بین آن‌ها در پوشش می‌شود [22,21].

4-3- سختی پوشش‌ها

شکل 9 اثر ذرات تقویت کننده بر سختی پوشش را نشان می‌دهد. مقدار سختی پوشش آلومینیوم خالص برابر با 47.2 و بکرز اندازه‌گیری شد. با افزایش درصد ذرات SiC از 25 تا 75 درصد، متوسط سختی پوشش‌های کامپوزیتی از 66.7 به 89.7 و بکرز افزایش می‌یابد. افزایش سختی پوشش‌های کامپوزیتی با افزایش درصد ذرات تقویت کننده، ناشی از حضور مقادیر بیشتر ذرات تقویت کننده در پوشش است [23]. از سوی دیگر تغییر شکل پلاستیک ذرات آلومینیومی در لحظه برخورد باعث کرنش سختی و افزایش چگالی نایجایی‌ها در آن‌ها می‌شود که به افزایش سختی پوشش کمک می‌کند [24]. همچنین اثر چکش کاری زمینه نرم آلومینیومی با ذرات سخت SiC، باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک مضاعف و افزایش کارسختی پوشش می‌شود. بنابراین با افزایش درصد ذرات تقویت کننده، سختی پوشش بیشتر می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پوشش‌های کامپوزیتی Al-SiC با سه درصد وزنی 25، 50 و 75 به روش پاشش سرد روی ورق AZ31B ایجاد شدند. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

- حضور ذرات SiC در فصل مشترک پوشش و زیرلایه باعث ایجاد قفل مکانیکی بیشتر و بهبود اتصال آن به زیرلایه در مقایسه با پوشش آلومینیوم خالص می‌شود. از سوی دیگر افزودن ذرات SiC باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک مضاعف به ذرات نرم آلومینیومی شده و کیفیت پوشش‌های کامپوزیتی را بهبود می‌بخشد.
- در هر سه پوشش کامپوزیتی، ذرات SiC به صورت یکنواخت درون پوشش پراکنده می‌شوند. با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده در مخلوط اولیه، اندازه این ذرات و فاصله بین آن‌ها در پوشش کامپوزیتی نهایی کاهش می‌یابد.
- درصد ذرات SiC باقی‌مانده در پوشش کمتر از مقدار آن‌ها در مخلوط اولیه است. ذرات سخت SiC در اثر برخورد به سطح زیرلایه، دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و تنها بخشی از آن‌ها داخل پوشش به دام می‌افتند. علاوه بر این، برخورد ذرات SiC با یکدیگر در سطح پوشش، باعث خرد شدن و جدا شدن برخی از آن‌ها می‌شود. این امر کسر باقی‌مانده ذرات تقویت کننده در پوشش نهایی را کاهش می‌دهد.
- با افزایش درصد ذرات SiC، میزان تخلخل پوشش افزایش می‌یابد. این ذرات در اثر برخورد به زیرلایه دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و اتصال خوبی با زمینه برقرار نمی‌کنند. علاوه بر این در اثر برهمکنش این ذرات با یکدیگر، ترک در آن‌ها ایجاد می‌شود. در برخی موارد نیز تخلخل در فضای بین این ذرات تشکیل می‌شود که تخلخل نهایی را افزایش می‌دهد.

- [16] Spencer, K. Fabijanic, D. and M. Zhang, "Cold Spray of Al-MMC Coatings on Magnesium Alloys for Improved Corrosion and Wear Resistance", *Materials Science Forum*, Vol. 618 619, pp. 377–380, 2009.
- [17] Spencer, K. Fabijanic, D. M. and Zhang, M. X. "The Use of Al–Al₂O₃ Cold Spray Coatings to Improve the Surface Properties of Magnesium Alloys", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 3, pp. 336–344, 2009.
- [18] Rolland, G. Sallamand, P. Guipont, V. Jeandin, M. Boller, E. and Bourda, C. "Damage Study of Cold-Sprayed Composite Materials for Application to Electrical Contacts", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 758–772, 2012.
- [19] Yu, M. Li, W. Y. Chen, H. Suo, X. K. and Liao, H. L., "Effect of Matrix/Reinforcement Combination on Cold Sprayed Coating Deposition Behaviour", *Surface Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 796–800, 2014.
- [20] Sansoucy, E. Marcoux, P. Ajdelsztajn, L. and Jodoin, B. "Properties of SiC-Reinforced Aluminum Alloy Coatings Produced by the Cold Gas Dynamic Spraying Process", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, No. 16, pp. 3988–3996, 2008.
- [21] Gyansah, L. Tariq, N. H. Tang, J.R. Qiu, X. Feng, B. Huang, J. Du, H. Wang, J.Q. and Xiong, T.Y., "Cold Spraying SiC /Al Metal Matrix Composites: Effects of SiC Contents and Heat Treatment on Microstructure, Thermophysical and Flexural Properties", *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 2, pp. 0–48, 2018.
- [22] Kumar, S. Reddy, S. K. and Joshi, S. V., "Microstructure and Performance of Cold Sprayed Al-SiC Composite Coatings with High Fraction of Particulates", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 318, pp. 62–71, 2017.
- [23] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, S. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC Surface Composite by Friction Stir Processing and its Characterization", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 31–36, 2016.
- [24] Ziaei, H. Abdollah-zadeh, A. Eyvazi, Z. Seraj, R. A. and Kargar, F., "Investigation of the Effect of Al₂O₃ Reinforcement on the Hardness and Microstructure of Al-Al₂O₃ Cold Spray Coatings on the Al-7075 Substrate", In Persian, *The 7th International Engineering Materials & Metallurgy Conference*, Tehran, 9-11 October, 2018.
- سختی پوشش حاصل از پودر کامپوزیتی Al-75wt%SiC حدود 90 HV است که در مقایسه با پوشش آلومینیم خالص بیش از 80 درصد افزایش را نشان می‌دهد.

5-مراجع

- [1] Alderman, M. Manual, M. V. Hort, N. and Neelameggham, N. R., "Magnesium Technology 2014", John Wiley & Sons, Hoboken New Jersey, 2014.
- [2] Villafuerte, J. and Zheng W., "Corrosion Protection of Magnesium Alloys by Cold Spray", *Advance Material Process*, Vol. 165, No. 9, pp. 53–54, 2007.
- [3] Gray, J. E. and Luan, B., "Protective Coatings on Magnesium and its Alloys: A Critical Review," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 336, No. 1–2, pp. 88–113, 2002.
- [4] Ghosh, K. Troczynski, T. and Chaklader, A.C.D., "Aluminum-Silicon Carbide Coatings by Plasma Spraying", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 7, No.1, pp. 78–86, 1998.
- [5] Yazdi, R. and Kashani Bozorg, F., "Pure Titanium Surface Alloying with BN Powder by Using TIG Method", In Persian, 7th national seminar of surface engineering and heat treatment, 2006.
- [6] Lofei, B., Rostami, M. and Sadeghian, Z., "Effect of Silicon Content on Microstructure of Al-Si/SiCp Composite Layer Cladded on A380 Al Alloy by TIG Welding Process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 9, pp. 2824–2830, 2014.
- [7] Mazaheri, H. Najafabadi, M. F. and Alaei, A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composit Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 1, pp. 65–72, 2015.
- [8] Kazemi, M. Saghafan, H. Kheirandish, Sh. and Soleimani Gilakjan, R., "The Effect of Laser Surface Compositing Using Nd:YAG Pulsed Laser with TiC Particles on Tribological Behavior of H13 Tool Steel", In Persian, *Metallurgical Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 4–14, 2017.
- [9] Farghdani, F. Karimzadeh, F. A. and Enayati, M. H., "Formation of Surface Metal Matrix Composite AZ91/Mg_xCu_y and its Wear Behavior after T6 Heat Treatment", In Persian, *Science and Surface Engineering*, Vol. 12, No. 28, pp. 1–14, 2016.
- [10] Carboneras, M. López, M. D. Rodrigo, P. Campo, M. Torres, B. Otero, E. and Rams, J., "Corrosion Behaviour of Thermally Sprayed Al and Al/SiCp Composite Coatings on ZE41 Magnesium Alloy in Chloride Medium", *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 3, pp. 761–768, 2010.
- [11] Ahmadifard, S. Roknian, M. Khodae, F. and Heidarpour, A., "Fabrication and Investigation of Microstructutr and Mechanical Properties of A356-TiO₂-Gr Surface Hybrid Nanocomposite by Friction Stir Processing", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 61–68, 2018.
- [12] Ahmadalidokht, S., Abdolazadeh, A., Soleymani, S. and Asadi, H., "Investigating the Wear Behaviour of Hybrid Aluminum Based Composite Produced by FSP", In Persian, 5th conference of metallurgy engineering of Iran, 2012.
- [13] Champagne, V. K., "The Cold Spray Materials Deposition Process. Fundamental an Application", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2007.
- [14] Ceschini, L. Dahle, A. Gupta, M. Jarfors, A. E. W. Jayalakshmi, S. Morri, A. Rotundo, F. Toschi, S. and Singh, R. A., "Aluminum and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites", Springer, Singapore, 2017.
- [15] Suo, X. K. Suo, Q. L. W. Li, Y. Planche, M. P. and Liao, H. L., "Effects of SiC Volume Fraction and Particle Size on the Deposition Behavior and Mechanical Properties of Cold-Sprayed AZ91D/SiCp Composite Coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 23, No. 1–2, pp. 91–97, 2014.

