



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



اثر افزودن ذرات Al_2O_3 بر ریزساختار و سختی پوشش کامپوزیتی $Al-Al_2O_3$ حاصل از فرآیند پاشش سرد

حمید ضیائی¹، امیر عبدالله زاده^{2*}، زهرا عیوضی¹، رجب علی سراج³، فیروز کارگر¹

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

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

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش پوشش کامپوزیتی $Al-Al_2O_3$ با استفاده از فرآیند پاشش سرد روی ورق آلیاژ Al-7075-T6 ایجاد شد. برای این منظور پودر آلومینیوم خالص و پودرهای Al_2O_3 با درصد وزنی 25، 50 و 75 مخلوط شدند. پوشش‌دهی با استفاده از گاز نیتروژن در دمای $300^\circ C$ ، فشار 30 بار و فاصله‌ی پاشش 20 mm انجام شد. اثر افزودن درصد‌های مختلف پودر Al_2O_3 بر کیفیت و خواص پوشش‌های حاصل بررسی شد. مشخصات ریزساختاری پوشش‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، ریزسختی‌سنجی، پراش سنجی پرتو ایکس و نرم افزار تحلیل تصویر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد ذرات تقویت‌کننده، به دلیل شکستن و خرد شدن ذرات بزرگ‌تر و همچنین عدم اتصال مناسب ذرات سخت تقویت‌کننده با زمینه، مقدار تخلخل پوشش افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش درصد وزنی پودر Al_2O_3 در مخلوط پودر اولیه، توزیع این ذرات در پوشش یکنواخت‌تر شده و سختی پوشش افزایش می‌یابد. سختی پوشش حاصل از پودر کامپوزیتی Al_2O_3 75wt.% برابر با 104 HV است که در مقایسه با پوشش آلومینیوم خالص بیش از 85 درصد افزایش را نشان می‌دهد. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نمایانگر ریزدانه شدن ساختار و عدم اکسیداسیون و تبدیل فاز در پوشش‌های خالص و کامپوزیتی است.

دریافت: 97/12/8

پذیرش: 98/1/17

کلیدواژگان

پاشش سرد

کامپوزیت $Al-Al_2O_3$

سختی

تخلخل

آلیاژ Al-7075-T6

The effects of Al_2O_3 particles on the microstructure and hardness of cold sprayed $Al-Al_2O_3$ composite coating

Hamid Ziaei, Amir Abdollah-zadeh*, Zahra Eyvazi, 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- Al_2O_3 Composite
Hardness
Porosity
Al-7075-T6

Abstract

In this study, $Al-Al_2O_3$ composite coating produced by cold spray method on Al-7075-T6 sheet. The pure Al powder is blended with different amount of Al_2O_3 powder including 25, 50 and 75 wt. %. The feedstock is sprayed on sand blasted substrate using nitrogen gas at a constant temperature of $300^\circ C$, pressure of 30 bar and the stand-off distance of 20 mm. The effect of different values of Al_2O_3 on the deposition behavior of the $Al-Al_2O_3$ powders are investigated. Microstructural characteristics of the coatings are evaluated by scanning electron microscopy, image analysis software, microhardness and X-ray diffraction tests. The results showed that the high velocity of particles leads to the Al_2O_3 particle breaking during the process. This phenomenon increases the porosity of the coatings. Furthermore, the higher value of reinforcement in the initial powder leads to the homogenous distribution of them and the higher coating hardness. The hardness of the $Al-75Al_2O_3$ coating is 104 HV, which is increased by 85% compared to pure Al coating. X-ray diffraction test indicated the fine-grained structure, no-oxidation and no phase transformation in the pure and composite coatings.

1- مقدمه

ممکن است دارای عیوب حاصل از ساخت مثل نقایص ریخته‌گری بوده و یا بر اثر قرارگرفتن در محیط‌های کاری سخت، دچار آسیب‌هایی مثل سایش و خوردگی شوند [1]. در عمل، جایگزینی این قطعات راه حلی کارآمد و اقتصادی

آلیاژهای آلومینیومی به طور گسترده در ساخت اجزای مختلف هواپیماها، خودروها و قالب‌های تزریق پلاستیک استفاده می‌شوند. با این حال این قطعات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Ziaei, H. Abdollah-zadeh, A. Eyvazi, Z. Seraj, R and Kargar, F., "The effects of Al_2O_3 particles on the microstructure and hardness of cold sprayed $Al-Al_2O_3$ composite coating", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.3, pp. 473-480, 2019.

نبوده و بنابراین باید تعمیر شوند [2]. روش‌های مختلفی برای تعمیر سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش جوشکاری MIG [3] و لیزر [4] برای بازسازی قطعات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما تنش باقی مانده حرارتی و انقباض ناشی از انجماد می‌تواند کیفیت بخش تعمیر شده را کاهش داده و باعث عمر کوتاه قطعه تعمیر شده شود [5]. فناوری‌های پاشش حرارتی به طور فزاینده‌ای برای پوشش‌دهی و تعمیر سازه‌های فولادی، تجهیزات برقی و خطوط لوله‌ای که در معرض آب دریا هستند، استفاده می‌شود [6]. با این حال، در این پوشش‌ها می‌توان تغییرات قابل توجهی در ترکیبات شیمیایی در مقایسه با پودر اولیه مشاهده کرد. به طور کلی، در روش‌های پاشش حرارتی همیشه شاهد درصد بالای اکسید یا تخلخل هستیم که کنترل آنها دشوار است و ممکن است به مقاومت در برابر خوردگی، استحکام و خواص ماشینکاری قطعه، آسیب برساند [7]. در مواد کامپوزیتی، ترشوندگی ضعیف و اختلاف ضریب انبساط حرارتی ذرات تقویت‌کننده و زمینه باعث توزیع غیریکنواخت و ایجاد ترک و تخلخل می‌شود و استحکام را کاهش می‌دهد [8,9].

پاشش سرد روش پوشش‌دهی حالت جامد بوده و به همین خاطر فرآیندی برتر نسبت به روش‌های معمول پاشش حرارتی محسوب می‌شود [10]. در این فرآیند، ذرات با اندازه‌های میکرونی توسط جریان گاز گرم و فشرده، پس از عبور از یک نازل همگرا-واگرا با سرعت مافوق صوت به سمت زیرلایه شتاب داده شده و به سطح آن برخورد می‌کنند و باعث ایجاد پوششی بسیار متراکم با تغییر شکل پلاستیک شدید ذرات و اتصال متالورژیکی موضعی می‌شوند. دمای ذرات پودری در این فرآیند به مراتب پایین‌تر از نقطه ذوبشان است [7,11]. تشکیل پوشش در روش پاشش سرد به سرعت برخورد ذرات پودر بستگی دارد. هر ماده‌ای دارای یک سرعت بحرانی است و ذراتی که به بالاتر از آن می‌رسند موجب تشکیل پوشش می‌شوند. اتصال ذرات در حین فرآیند اثر تغییر شکل پلاستیک شدید و پدیده ناپایداری برشی آدیاباتیک¹ در فصل مشترک‌ها است. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که سرعت برخورد ذرات از سرعت اتصال بیشتر باشد. پوشش متراکم زمانی تشکیل می‌شود که سرعت برخورد ذرات به مقدار قابل توجهی بالاتر از سرعت بحرانی باشد. در حالی که در سرعت‌های پایین‌تر، فرسایش زیرلایه و جدایش ذرات رخ می‌دهد. مقدار سرعت بحرانی بستگی به خواص زیرلایه و ذرات پاشش شده، شرایط ذرات قبل از برخورد (درجه حرارت، اندازه و وضعیت اکسید سطحی) دارد [12,13].

در این روش به دلیل دمای نسبتاً پایین فرآیند، مشکلات مربوط به فرایندهای دما بالا مانند اکسیداسیون، اعوجاج، تنش باقی‌مانده کششی، تغییرات متالورژیکی و تبدیل فاز نامطلوب کاهش می‌یابد. بنابراین فرآیند پاشش سرد برای زیرلایه‌هایی که حساس به گرما یا اکسیداسیون هستند بهتر از فرآیند پاشش حرارتی است [7]. این خواص باعث می‌شود که پاشش سرد نه تنها یک تکنولوژی قابل رقابت در هزینه و صنعتی شدن بلکه در زمینه عملکرد نیز باشد. علاوه بر این، پاشش سرد نیاز به سرمایه‌گذاری نسبتاً کمی در مقایسه با سایر فرایندهای پاشش حرارتی معمولی دارد. این فرآیند از لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و می‌توان آن را در یک مرکز تعمیرات یا به عنوان بخشی از تولید گنجاند [1,14].

برای بهبود عملکرد پوشش‌های ایجاد شده به روش پاشش سرد، ذرات تقویت‌کننده مانند ذرات سرامیکی یا فلزی سخت به پودر اولیه افزوده شده و پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد می‌شوند. افزودن ذرات سخت به پودر فلزی باعث افزایش بازده پوشش‌دهی، افزایش سختی و کاهش تخلخل پوشش می‌شود که

مقاومت به خوردگی پوشش‌های فلزی تحت تاثیر قرار می‌دهد [7]. تحقیقات مختلفی در زمینه پاشش سرد پودر $Al-Al_2O_3$ برای پوشش‌دهی و تعمیر آلیاژ 7075- Al صورت گرفته است. ابریسو و همکاران [15] پودر $Al-Al_2O_3$ را روی آلیاژ آلومینیوم 7075 توسط سیستم پاشش سرد کم فشار، نشانند. آن‌ها از پودر آلومینیوم با دو اندازه متفاوت استفاده کردند و متوجه شدند که کسر حجمی رسیده به سرعت بحرانی برای پودر آلومینیوم درشت، کمتر از آلومینیوم ریز بود در نتیجه راندمان رسوب پایینی داشت. افزودن 75% ذره سرامیکی به پودر باعث حضور 26% از آن در داخل پوشش شد. افزودن ذره سرامیکی باعث افزایش استحکام چسبندگی شد. اتصال ضعیف بین Al و Al_2O_3 بهبود احتمالی مقاومت سایشی پوشش را محدود می‌کند. در پژوهش دیگری [16]، یک قطعه مربوط به هلی کوپتر از جنس آلومینیوم 7075 توسط مخلوط پودری آلومینیوم-آلومینا-روی به روش پاشش سرد تحت تعمیر قرار گرفت. سختی این پوشش‌ها با افزودن آلومینا و روی افزایش می‌یابد. وقتی که روی به پوشش اضافه می‌شود موجب تشدید خوردگی گالوانیکی می‌شود. هایمن و همکاران [2] از پاشش سرد پرفشار برای ایجاد پوشش آلومینیوم-آلومینا روی آلومینیوم 7075 استفاده کردند. این پوشش‌ها دارای میکروتک و تخلخل بودند.

با توجه به نیاز روز افزون به تعمیر قطعات آلومینیومی و نبود اطلاعات کافی در مورد خواص پوشش‌های $Al-Al_2O_3$ از یک طرف و نبود اطلاعات کافی در مورد برهمکنش ذرات تقویت‌کننده با زمینه فلزی از طرف دیگر، هدف از این پژوهش، ایجاد پوشش کامپوزیتی آلومینیوم-آلومینا با فرآیند پاشش سرد و بررسی تاثیر افزودن درصدهای مختلف از ذرات Al_2O_3 بر سختی، تخلخل و ترک‌های موجود در پوشش $Al-Al_2O_3$ و همچنین بررسی اندازه دانه و میکروکنش پوشش‌ها است. در این راستا، پاشش پودر $Al-Al_2O_3$ در سه ترکیب مختلف انجام شد. پوشش‌های حاصل از لحاظ ریزساختاری، ریزسختی و درصد تخلخل و فازی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر آلومینیوم خالص تجاری با خلوص 99.6 درصد و پودر Al_2O_3 با اندازه دانه 45- میکرومتر استفاده شد. مورفولوژی پودرها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع اندازه دانه ذرات توسط آزمون تفرق لیزر مشخص شد. پودر آلومینیوم خالص و Al_2O_3 در سه ترکیب 25، 50 و 75 درصد وزنی آماده و به صورت مکانیکی مخلوط شدند. ورق $Al-7075-T6$ در ابعاد $3 \times 20 \times 50$ میلی متر تهیه شده و به عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه در جدول 1 نشان داده شده است. سطح زیرلایه‌ها با استفاده از ورق سنباده با شماره‌های 80 تا 400 سنباده زنی و سپس ماسه پاشی² شدند. ماسه پاشی زیرلایه‌ها با استفاده از ذرات آلومینا با مش 36، فشار هوای 6 بار و زاویه 45 درجه انجام شد. زیرلایه‌ها بعد از ماسه پاشی، به مدت 30 ثانیه در حمام اولتراسونیک استون قرار گرفته و تمیز شدند. برای پوشش‌دهی نمونه‌ها از دستگاه پاشش سرد موجود در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. در شکل 1 طرحواره‌ای از این دستگاه آورده شده است. قسمت‌های مختلف دستگاه شامل نازل همگرا-واگرا، گرمکن، منبع گاز، محفظه پیش‌گرم و منبع تغذیه پودر است. عملیات پاشش با استفاده از گاز نیتروژن در فشار 30 بار، دمای 300 درجه سانتی‌گراد و فاصله 20 میلی‌متر انجام شد.

¹ Adiabatic Shear Instability

² Sand Blast

در این شرایط ذرات با ابعاد یکسان تحت نیروی یکسانی قرار می‌گیرند، بنابراین سرعت نهایی آن‌ها یکسان خواهد بود. مورفولوژی کروی ذرات منجر به سرعت و تغییر شکل یکنواخت‌تر ذرات می‌شود. توزیع اندازه و اندازه ذرات پودر نیز تاثیر زیادی بر ویژگی‌های پوشش دارند. توزیع اندازه تعیین می‌کند که کدام بخش از ذرات پودر، توانایی رسیدن به سرعت بحرانی در حین پاشش را داشته و با سرعتی بالاتر از سرعت بحرانی به سطح زیرلایه برخورد کنند. این بخش از پودر در تشکیل پوشش شرکت خواهد کرد [17].

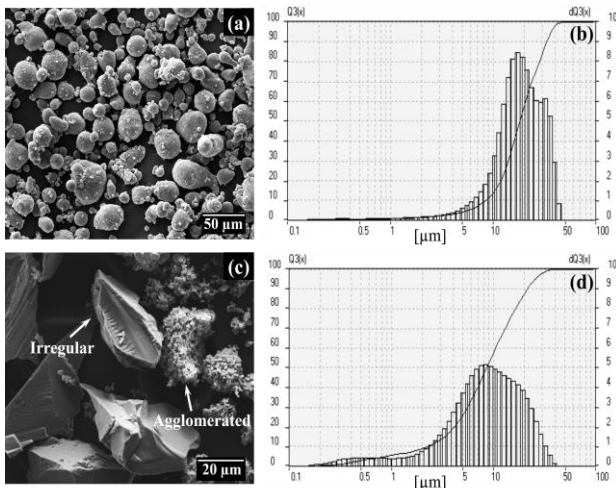


Fig. 2 (a) SEM image and (b) particle size distribution of pure Al powder, (c) SEM image and (d) particle size distribution of Al_2O_3 powder

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

همان‌طور که در شکل 2 (c) مشاهده می‌شود مورفولوژی ذرات پودر Al_2O_3 به صورت گوشه‌دار هستند و برخی از آن‌ها حالت آگلومره‌ای از ذرات ریز دارند. در مورد ذرات سرامیکی، توزیع اندازه مناسب باعث توزیع یکنواخت آن در پوشش نهایی می‌شود و مورفولوژی آن نیز روی سرعت برخورد و همچنین مقدار پودر اتصال یافته به پوشش تاثیر می‌گذارد. همچنین به دلیل گیرافتادن ذرات گوشه‌دار در پوشش، درصد بالاتری از این ذرات در پوشش نهایی حفظ می‌شوند [18].

2-3- بررسی ریزساختار

شکل 3 تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پرداخت کاری شده پوشش‌های حاصل را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد همه پوشش‌های کامپوزیتی دارای اتصال خوبی در فصل مشترک با زیرلایه هستند اما ریزترکی در فصل مشترک پوشش آلومینیوم خالص با زیرلایه مشاهده می‌شود. افزودن ذرات Al_2O_3 باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک مضاعف به ذرات نرم آلومینیومی شده و اتصال آن‌ها به یکدیگر و به زیرلایه را بهبود می‌بخشد. به همین خاطر افزودن ذرات Al_2O_3 باعث بهبود کیفیت اتصال پوشش به زیرلایه می‌شود. شکل 3 نشان می‌دهد که هر سه پوشش کامپوزیتی دارای توزیع نسبتاً همگنی از ذرات Al_2O_3 در زمینه آلومینیومی هستند. از طرف دیگر به نظر می‌رسد که با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 ، اندازه آن‌ها ریزتر می‌شود. علت آن می‌تواند به خاطر برخورد ذرات سخت Al_2O_3 با یکدیگر و شکستن آن‌ها باشد [10]. با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 ، احتمال برخورد آن‌ها با یکدیگر در طول

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم 7075 برحسب درصد وزنی

Table 1 Chemical composition of Al-7075 plate (in wt. %)

other	Cu	Mg	Zn	Al
< 1	1.2-2.0	1.5-2.6	5.1-6.1	Bal

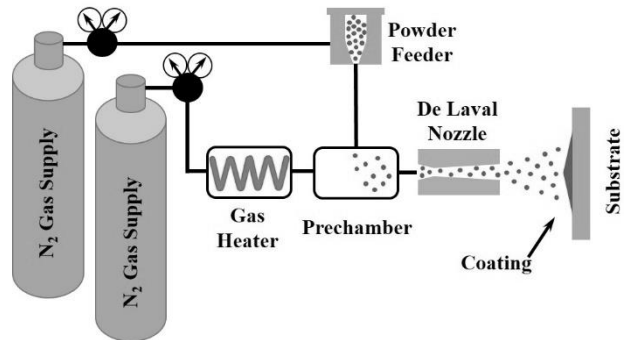


Fig. 1 Schematic of cold spray process

شکل 1 طرح‌واره‌ای از فرآیند پاشش سرد

در دستگاه مذکور نازل در حین فرایند ثابت است. با حرکت زیرلایه در مقابل نازل، پوشش یکنواخت روی سطح ایجاد شد. سرعت حرکت زیرلایه 10 میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. فاصله گام بین خطوط پوشش دهی 1.5 میلی‌متر و پوشش دهی در سه لایه انجام شد. بعد از پوشش دهی نمونه‌ها، مقطع زنی و مانع سرد انجام شد. سنباده زنی و پرداخت کاری نمونه‌ها برای بررسی‌های متالوگرافی صورت گرفت. ساختار پوشش‌های حاصل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه مقدار تخلخل و همچنین مقدار ذرات تقویت‌کننده در پوشش‌های کامپوزیتی نیز 5 تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در بزرگنمایی 500X گرفته شد و سپس اندازه‌گیری تخلخل و فازهای موجود در پوشش‌ها با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری Clemex نسخه 3.5.025 انجام گرفت. با ضرب کردن درصد حجمی ذرات Al_2O_3 (محاسبه شده با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر) در چگالی آن (3.99 g/cm^3)، مقادیر درصد وزنی ذرات محاسبه شد. سختی پوشش‌ها با استفاده از دستگاه ریزسختی سنجی و با نیروی 100 grf و زمان تاخیر 15 s اندازه‌گیری شد. پراش سنجی پرتو ایکس پودر آلومینیوم خالص، پودر Al_2O_3 ، پوشش آلومینیوم خالص و پوشش $Al-50Al_2O_3$ انجام شد. به همین منظور از دستگاه XRD مدل Rigaku Ultima IV با ولتاژ 40 kV، جریان 40 mA، پرتو ایکس $Cu \text{ } \alpha$ و گام 0.02 درجه استفاده شد. الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های مختلف توسط نرم افزارهای Xpert High Score نسخه 3.0.5 و Origin نسخه 9.50.00 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- مشخصه‌یابی پودر

شکل 2 نمودار توزیع اندازه ذرات و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینیوم خالص و Al_2O_3 مصرفی به اندازه زیر 45 میکرومتر را نشان می‌دهد. مطابق شکل 2 (a) ذرات پودر آلومینیوم دارای مورفولوژی کروی هستند. به دلیل برهمکنش بین ذرات پودر و جریان گاز، مورفولوژی ذرات پودر اثر قابل توجهی بر خواص نهایی پوشش دارد. به دلیل مساحت سطح یکنواخت ذرات پودر کروی، اثر جریان گاز روی این ذرات وابسته به جهت‌گیری آن‌ها نیست.

ترکیب پودر 25، 50 و 75 درصد وزنی به ترتیب برابر با 0.45، 0.70، 1.1 و 1.9 درصد محاسبه شد. افزایش درصد ذرات Al_2O_3 باعث افزایش تخلخل شده است. گزارش شده است که افزایش کسر ذرات سرامیکی و برخورد آن با زمینه نرم آلومینیومی باعث تغییر شکل پلاستیک مضاعف ذرات نرم پوشش شده و باعث افت تخلخل می‌شود [16]. به نظر می‌رسد که در پوشش‌های کامپوزیتی حاصل نیز این اتفاق رخ می‌دهد و با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 و اثر چکش کاری ناشی از آن‌ها، تغییر شکل پلاستیک بیشتری به ذرات آلومینیومی اعمال شده و میزان تخلخل زمینه پوشش کاهش پیدا می‌کند. در عین حال افزایش تخلخل نشان داده شده در نمودار به علت وجود تخلخل در خود ذرات Al_2O_3 و شکستن و خرد شدن این ذرات است. هم چنین در بعضی مناطق عدم چسبندگی مناسب ذرات Al_2O_3 با زمینه نرم آلومینیومی باعث به وجود آمدن تخلخل در فصل مشترک تماس بین آن دو می‌شود. تاثیر عوامل بیان شده با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 ، افزایش می‌یابد و بنابراین درصد تخلخل نهایی پوشش‌ها، بیشتر می‌شود.

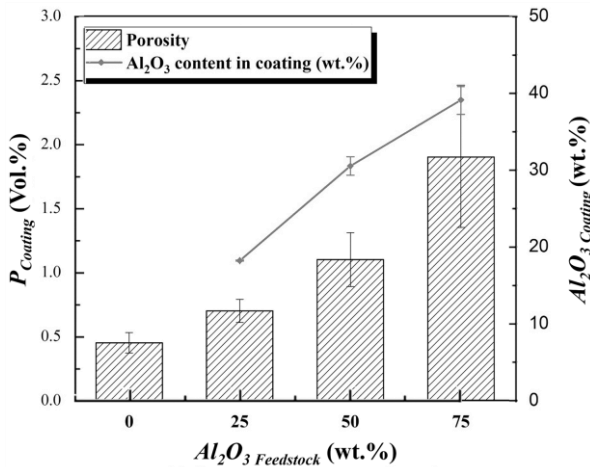


Fig. 4 coatings porosity and weight percent of Al_2O_3 in the coating as a function of Al_2O_3 in the feedstock

شکل 4 نمودار تخلخل و درصد وزنی فاز تقویت‌کننده پوشش‌ها برای مقادیر مختلف ذرات Al_2O_3 در مخلوط پودر اولیه

4-3 سختی پوشش‌ها

نتایج حاصل از ریزسختی پوشش‌های حاصل در شکل 5 آورده شده است. مقادیر سختی پوشش حاصل از آلومینیوم خالص برابر با 56 و ویکرز به دست آمد. با افزایش درصد Al_2O_3 سختی پوشش‌ها به ترتیب به مقدار 66، 81 و 104 ویکرز رسید. با افزایش کسر ذرات Al_2O_3 در پودر اولیه سختی پوشش‌ها نیز افزایش یافت. این افزایش سختی به علت حضور ذرات سخت Al_2O_3 و ریزدانه شدن ساختار میکروسکوپی پوشش است [19,20]. از سوی دیگر برخورد ذرات آلومینیوم نرم به زیرلایه باعث تغییر شکل پلاستیک شدید، بالا رفتن تجمع نایبایی‌ها و کارسختی بالای این ذرات می‌شود. هم چنین برخورد ذرات سخت Al_2O_3 روی این ذرات تغییر شکل یافته، باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک بیشتر و افزایش کارسختی در آن‌ها می‌شود [10].

مسیر پاشش و هم‌چنین در حین برخورد به زیرلایه افزایش پیدا می‌کند و باعث ریزتر شدن اندازه ذرات آن می‌شود. از طرف دیگر شکستن ذرات Al_2O_3 ، ریزتر شدن و توزیع آن در زمینه آلومینیومی باعث توزیع یکنواخت‌تر این ذرات شده است. در پوشش ایجاد شده با استفاده از پودر $Al-25wt.\% Al_2O_3$ ، میزان شکسته شدن ذرات Al_2O_3 به صورت جزئی است. این واقعیت به خاطر این است که کسر ذرات Al_2O_3 در پودر مذکور کمتر بوده و انرژی جنبشی ذرات Al_2O_3 برخوردی، باعث تغییر شکل پلاستیک ذرات نرم آلومینیومی می‌شود. اگرچه سرعت برخورد ذرات در هر سه پوشش کامپوزیتی یکسان است، اما با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 ، برهمکنش بین آن‌ها افزایش پیدا کرده و باعث شکستن، خرد شدن و کاهش اندازه آن‌ها می‌شود.

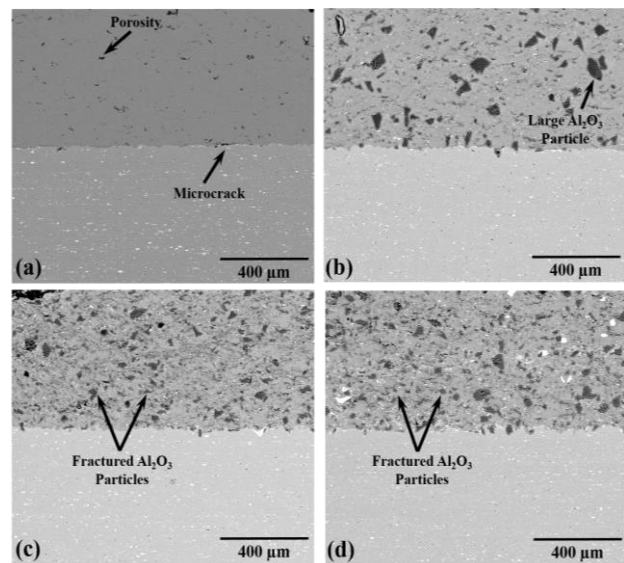


Fig.3 SEM micrographs of the coatings cross-sections: (a) Pure Al, (b) $Al-Al_2O_3$, (c) $Al-50Al_2O_3$ and (d) $Al-75Al_2O_3$.

شکل 3 تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های (a) آلومینیوم خالص، (b) $Al-25Al_2O_3$ ، (c) $Al-50Al_2O_3$ و (d) $Al-75Al_2O_3$

3-3 بررسی درصد تخلخل و ذرات تقویت‌کننده پوشش‌ها

نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد تخلخل پوشش‌ها و کسر ذرات Al_2O_3 موجود در پوشش در شکل 4 آورده شده است. کسر ذرات Al_2O_3 در پوشش‌های ایجاد شده از پودرهای با ترکیب 25، 50 و 75 درصد وزنی به ترتیب برابر با 18، 30 و 39 درصد وزنی محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که درصد ذرات Al_2O_3 پوشش‌ها کمتر از مقدار آن در پودر اولیه است. ذرات Al_2O_3 به خاطر ماهیت سرامیکی خود در اثر برخورد روی زیرلایه دچار تغییر شکل پلاستیک نمی‌شوند و فقط برخی از آن‌ها به داخل زمینه نرم پوشش فرو می‌روند و ذراتی که اتصال مناسبی به سطح نداشته باشند، در ادامه فرایند از سطح جدا می‌شوند. بنابراین ذرات سخت Al_2O_3 داخل پوشش ممکن است کمتر از مقدار موجود در پودر اولیه باشد [10]. هم چنین برخورد ذرات Al_2O_3 با یکدیگر نیز ممکن است باعث جدایش و کاهش درصد آن در پوشش شود. در این شرایط ذرات سخت Al_2O_3 ممکن است به جای برخورد و فرو رفتن در زمینه نرم آلومینیومی، به ذرات سخت Al_2O_3 برخورد کرده و باعث خرد شدن و جدا شدن آن ذرات از پوشش شود. در نتیجه درصد ذرات تقویت‌کننده در پوشش نسبت به پودر اولیه کاهش می‌یابد.

تخلخل پوشش آلومینیوم خالص و پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد شده با

افزایش عیوب کریستالی ماده است [22, 23]. برای کمی سازی میزان ریزدانه شدن و میکرو کرنش ایجاد شده در ذرات آلومینیوم و Al_2O_3 در اثر فرآیند پاشش سرد از رابطه ویلیامسون-هال استفاده شد که به صورت رابطه 1 است.

$$\beta \cos(\theta) = 2\varepsilon \sin(\theta) + \frac{0.9\lambda}{D} \quad (1)$$

در این رابطه، β پهناي پیک پراش در نیمه ارتفاع آن، θ نصف زاویه پراش (زاویه پراش برابر با 2θ است)، λ طول موج پرتو ایکس لامپ مسی مورد استفاده $Cu \text{ } \alpha$ برابر با 0.15406 nm ، D اندازه کریستالیت و ε متوسط میکرو کرنش موجود در شبکه بلوری ماده پراش داده است [24, 25]. همان طور که از معادله مشخص است اگر داده‌های مربوط به $\beta \cos(\theta)$ بر حسب $2\sin(\theta)$ برای چندین پیک پراش با زوایای مختلف رسم شود، بایستی بر روی یک خط راست واقع شوند. از روی شیب این خط می‌توان میکرو کرنش و از روی عرض از مبدا آن می‌توان اندازه کریستالیت را تعیین کرد [25]. چنین خطی به نمودار ویلیامسون-هال موسوم است. نمودار ویلیامسون-هال برای نمونه‌های مختلف رسم شد (شکل 7).

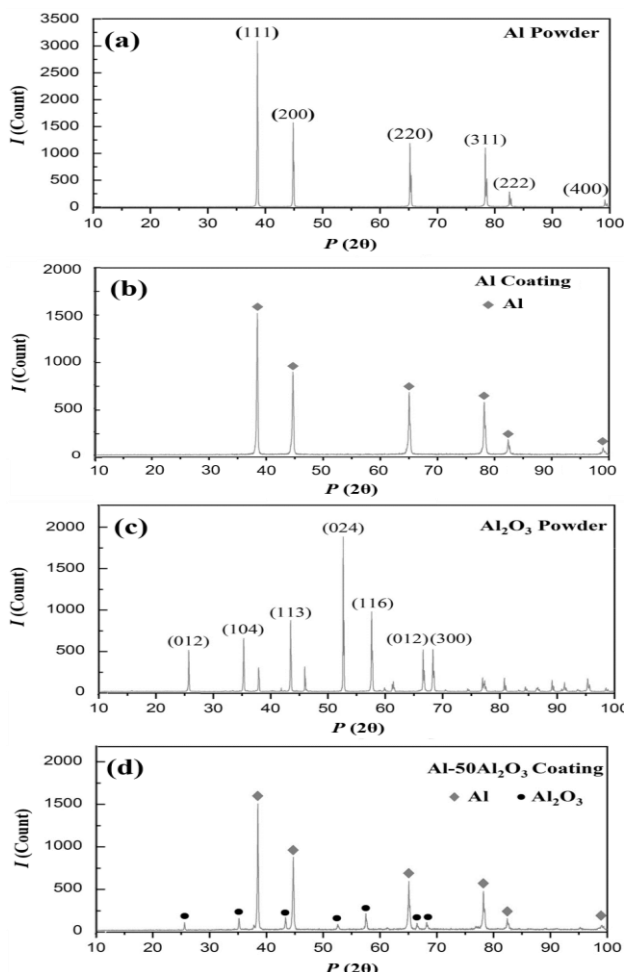


Fig. 6 The XRD patterns of (a) pure Al powder, (b) pure Al coating, (c) Al_2O_3 powder and (d) $Al-50Al_2O_3$ composite coating

شکل 6 الگوهای پراش پرتو ایکس از نمونه‌های (a) پودر آلومینیوم خالص، (b) پوشش آلومینیوم خالص، (c) پودر Al_2O_3 خالص و (d) پوشش کامپوزیتی $Al-50Al_2O_3$

نتایج مربوط به میکرو کرنش و اندازه کریستالیت در نمونه‌های مختلف در جدول 2 گزارش شده است. مطابق جدول 2، اندازه کریستالیت آلومینیوم در

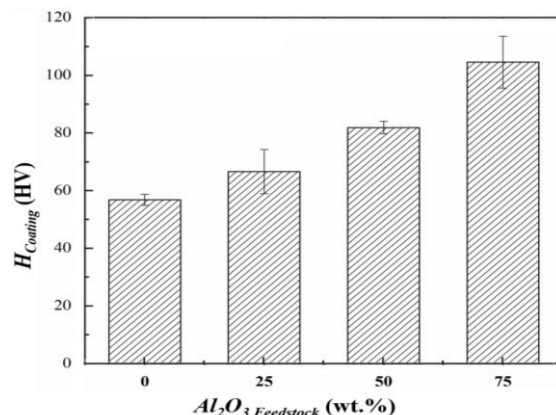


Fig. 5 The effect of Al_2O_3 content on the coatings microhardness

شکل 5 اثر مقادیر مختلف فاز تقویت کننده Al_2O_3 بر ریزسختی پوشش‌ها

این عوامل در مجموع باعث بالا رفتن سختی نهایی پوشش‌های کامپوزیتی می‌شود. برخورد ذرات پودر با سرعت بسیار بالا به سطح زیرلایه منجر به تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی در آن ذرات می‌شود. این تغییر شکل پلاستیک بالا منجر به افزایش چگالی عیوب کریستالی از جمله نابجایی‌ها می‌شود. افزایش عیوب کریستالی منجر به افزایش انرژی سیستم می‌شود. بنابراین برای کاهش انرژی سیستم و رسیدن به تعادل، نابجایی‌ها آرایش مجدد یافته و دانه‌هایی با اندازه کوچکتر تشکیل می‌شوند [21]. این ریزدانه شدن ساختار نیز باعث افزایش سختی پوشش می‌شود.

3-5- شناسایی فازی

الگوهای حاصل از آزمون پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودری آلومینیوم خالص و Al_2O_3 و همچنین پوشش آلومینیوم خالص بهینه و کامپوزیتی $Al-50Al_2O_3$ در شکل 6 آورده شده است. این الگوهای پراش با استفاده از نرم افزار X'Pert High Score مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شناسایی فازی انجام شد. شکل 6 (a) الگوی پراش پودر آلومینیوم خالص را نشان می‌دهد که از تکفاز آلومینیوم تشکیل شده است و هیچ ناخالصی یا فاز دیگری ندارد. شکل 6 (b) مربوط به الگوی پراش پودر Al_2O_3 است. فاز غالب شناسایی شده از این الگو فاز آلومینیای کوراندوم با ساختار رومبهدرال است. برای ساده سازی از شناسایی فازهای دیگر که پیک‌های ضعیفی داشتند، صرف نظر شد. شکل 6 (c) و (d) به ترتیب نشان‌دهنده الگوی مربوط به پراش پوشش آلومینیوم خالص و پوشش کامپوزیتی $Al-50Al_2O_3$ است. این الگوها نیز فقط پیک‌های مربوط به فازهای شناسایی شده در پودرهای اولیه را نشان می‌دهند که عدم اکسیداسیون و تبدیل فازی در فرآیند پاشش سرد را دلالت می‌کنند.

ذرات پودر آلومینیوم در اثر برخورد به سطح زیرلایه دچار کرنش پلاستیک شدیدی شده و ریزدانه می‌شوند. از طرف دیگر ذرات Al_2O_3 نیز در طول فرآیند پاشش به علت برهمکنش با یکدیگر و همچنین برخورد به سطح زیرلایه، ریزدانه می‌شوند. این عوامل در نهایت باعث پهن تر شدن پیک‌های مربوط به آلومینیوم و Al_2O_3 در الگوی پراش پوشش کامپوزیتی می‌شوند. مقایسه شدت پیک‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های حاصل از پاشش سرد، شدت پیک کمتری نسبت به پودرهای اولیه دارند که می‌تواند به دلیل اعوجاج شبکه بلوری ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید ذرات تشکیل دهنده پوشش و در نتیجه نامنظم شدن ساختار بلوری باشد. ساختارهای بلوری نامنظم دارای شدت پیک ضعیف‌تری هستند. کاهش ارتفاع و همچنین افزایش پهناي پیک در الگوی پراش به معنای

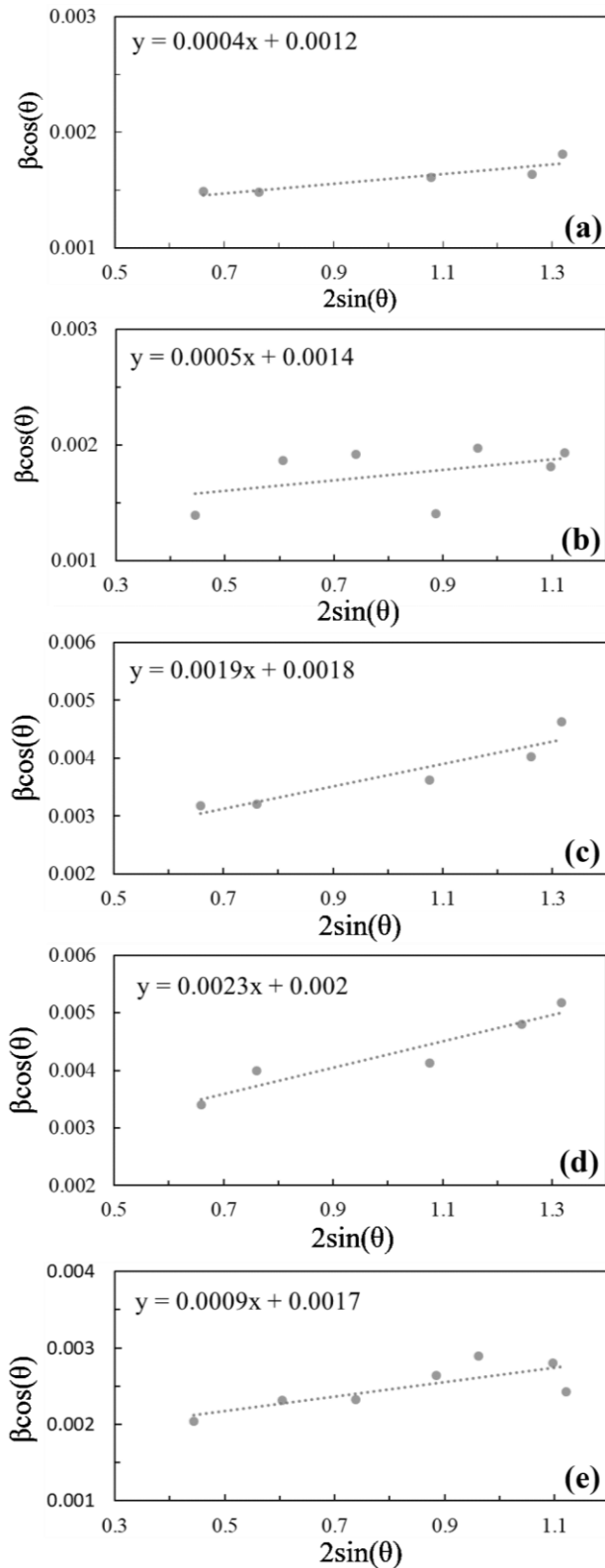


Fig. 7 Williamson-Hall plot for (a) pure Aluminum powder, (b) pure Al_2O_3 powder, (c) pure Aluminum coating, (d) Aluminum in $Al-50Al_2O_3$ coating and (e) Al_2O_3 in $Al-50Al_2O_3$ coating

شکل 7 نمودار ویلیامسون-هال برای نمونه‌های (a) پودر آلومینیوم خالص، (b) پودر Al_2O_3 ، (c) پوشش آلومینیوم خالص، (d) آلومینیوم حاضر در پوشش کامپوزیتی $Al-50Al_2O_3$ و (e) Al_2O_3 حاضر در پوشش کامپوزیتی $Al-50Al_2O_3$

اثر پاشش سرد از 115 به 77 نانومتر کاهش و میکرو کرنش از 0.04 به 0.19 درصد افزایش می‌یابد. علت این امر تغییر شکل پلاستیک شدید ذرات و افزایش چگالی نایجابی‌ها درون دانه‌های آلومینیوم است. افزودن ذرات Al_2O_3 به پوشش باعث کاهش بیشتری در اندازه کریستالیت و افزایش میکروکرنش آلومینیوم می‌شود. ذرات Al_2O_3 در اثر برخورد به سطح پوشش به خاطر سختی بالایی که دارند باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک بیشتری به ذرات آلومینیوم شده و در نهایت موجب ریزدانه شدن آن می‌شوند. از طرف دیگر ذرات Al_2O_3 نیز در طول فرآیند پاشش به علت تعامل با یکدیگر و همچنین برخورد به سطح زیرلایه، ریزدانه شده و اندازه کریستالیت آن از 99 به 81 نانومتر کاهش می‌یابد و میکروکرنش آن از 0.05 به 0.09 درصد می‌رسد.

جدول 2 مقادیر میکروکرنش و اندازه کریستالیت نمونه‌های مختلف حاصل از نمودار ویلیامسون-هال

Table 2 The microstrain values and crystallite sizes of different samples obtained from Williamson-Hall plots

نمونه	میکروکرنش (%)	اندازه کریستالیت (nm)
پودر آلومینیوم خالص	0.04	115
پودر Al_2O_3	0.05	99
پوشش آلومینیوم خالص	0.19	77
آلومینیوم حاضر در پوشش $Al-50Al_2O_3$	0.23	69
Al_2O_3 حاضر در پوشش $Al-50Al_2O_3$	0.09	81

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پوشش‌های کامپوزیتی $Al-Al_2O_3$ با استفاده از سه ترکیب پودری با درصد وزنی 25، 50 و 75 به روش پاشش سرد روی ورق $Al-7075-T6$ ایجاد شدند. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

- همه پوشش‌های کامپوزیتی دارای اتصال خوبی در فصل مشترک با زیرلایه در مقایسه با پوشش آلومینیوم خالص هستند. افزودن ذرات Al_2O_3 باعث اعمال تغییر شکل پلاستیک مضاعف به ذرات نرم آلومینیومی شده و کیفیت اتصال در پوشش‌های کامپوزیتی را بهبود می‌بخشد.
- درصد ذرات Al_2O_3 در پوشش‌ها کمتر از مقدار آن در پودر اولیه است. ذرات Al_2O_3 دچار تغییر شکل پلاستیک نشده و فقط برخی از آن‌ها به داخل زمینه نرم پوشش فرو می‌روند. ذراتی که اتصال مناسبی با زیرلایه پیدا نکنند، در ادامه فرایند از سطح جدا می‌شوند. همچنین با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده در مخلوط اولیه، به علت برخورد آنها با یکدیگر، اندازه آن‌ها در پوشش کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد ذرات Al_2O_3 و افزایش اثر چکش کاری ناشی از آن‌ها، میزان تخلخل در زمینه آلومینیومی نرم پوشش کاهش پیدا می‌کند. در حالی که به علت تشکیل ترک در ذرات Al_2O_3 و شکستن و خرد شدن آن‌ها، تخلخل در نواحی اطراف و داخل این ذرات ایجاد می‌شود. حضور این تخلخل‌ها، درصد تخلخل نهایی پوشش را افزایش می‌دهد.

- افزایش درصد ذرات Al_2O_3 در پودر اولیه باعث افزایش تعداد برخورد ذرات سخت به زمینه نرم آلومینیومی پوشش و بالا رفتن کارسختی آن می‌شود. همچنین حضور ذرات سخت Al_2O_3 و ریزدانه شدن ساختار پوشش باعث بالا رفتن سختی نهایی پوشش‌ها می‌شود.
- الگوهای حاصل از آزمون پراش پرتو ایکس نمونه‌های پودر و پوشش‌های حاصل از آن، فازهای یکسانی را نشان می‌دهند که بیانگر عدم اکسیداسیون و تغییر فاز در فرآیند پاشش سرد است. نمودار ویلیامسون-هال رسم شده از الگوی پراش نمونه‌ها نشان دهنده ریزدانه شدن مواد و افزایش میکروکرنش در ساختار بلوری آن‌ها در اثر پاشش سرد است.
- 5- مراجع**
- [1] Rech, S. Trentin, A. Vezzu, S. Vedelago, E. Legoux, J. G. and Irissou, E., "Different Cold Spray Deposition Strategies: Single- and Multi-layers to Repair Aluminium Alloy Components", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 23, No. 8, pp. 1237-1250, 2014.
 - [2] Heilmann, R. B. Kleiman, J. I. Litovsky, E. Marx, S. Ng, R. Petrov, S. Shagalov, M. Sodhi, R. N. S. and Tang, A., "High-Pressure Cold Gas Dynamic (CGD)-Sprayed Alumina-Reinforced Aluminum Coatings for Potential Application as Space Construction Material", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 252, pp. 113-119, 2014.
 - [3] Katsas, S. Nikolaou, J. and Papadimitriou, G., "Microstructural Changes Accompanying Repair Welding in 5xxx Aluminium Alloys and Their Effect on the Mechanical Properties", *Material and Design*, Vol. 27, No. 10 pp. 968-975, 2006.
 - [4] Ignata, S. Sallamand, P. Greveyb, D. and Lambertina, M., "Magnesium Alloys Laser (Nd:YAG) Cladding and Alloying with Side Injection of Aluminium Powder", *Applied Surface Science*, Vol. 225, No. 1-4, pp. 124-134, 2004.
 - [5] Shankar, K. and Wu, W., "Effect of Welding and Weld Repair on Crack Propagation Behaviour in Aluminum Alloy 5083 Plates", *Material and Design*, Vol. 23, No. 2, pp. 201-208, 2002.
 - [6] Paul, S. Lu, Q. and Harvey, M. D. F., "Mitigating Localized Corrosion Using Thermally Sprayed Aluminum (TSA) Coatings on Welded 25% Cr Superduplex Stainless Steel", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 629-636, 2015.
 - [7] Cong, D. Li, He, Z. Q. Chen, H. Zhao, Z. Zhang, L. and Wu, H., "Wear Behavior of Corroded Al-Al₂O₃ Composite Coatings Prepared by Cold spray", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 326, pp. 247-254, 2017.
 - [8] Sahranejad, N. Sarpoolaki, H. Rezaei, H. R. and Kaviani, S., "Study Important Factors for Production and Properties of Al-Al₂O₃ Composite", In Persian, *Journal of Iranian Ceramic Society*, Vol. 18, pp. 35-43, 2009.
 - [9] Tayyebi, M. Rahmatbadi, D. and Hashemi, R., "Review of Mechanical and Microstructural Properties of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Ceramic Particles Produced by SPD Processes", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 583-594, 2019.
 - [10] 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 & Coatings Technology*, Vol. 318, pp. 62-71, 2017.
 - [11] Winnicki, M. Baszczuk, A. Jasiorski, M. and Małachowska, A., "Corrosion Resistance of Copper Coatings Deposited by Cold Spraying", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 26, No. 8, pp. 1935-1946, 2017.
 - [12] Triantou, K. I. Pantelis, D. I. Guipont, V. I. and Jeandin, M., "Microstructure and Tribological Behavior of Copper and Composite Copper+Alumina Cold Sprayed Coatings for Various Alumina Contents", *Wear*, Vol. 336-337, pp. 96-107, 2015.
 - [13] Alishir, F. Nekoumanesh, H. and Assadi, H., "DSC Analysis of Cold-Sprayed Copper Coatings", In Persian, *Iranian Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 10, No. 22, pp. 35-40, 2014.
 - [14] Blochet, Q. Delloro, F. N. Guyen, F. Jeulin, D. Borit, F. and Jeandin M., "Effect of the Cold-Sprayed Aluminum Coating-Substrate Interface Morphology on Bond Strength for Aircraft Repair Application", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 671-686, 2017.
 - [15] Irissou, E. Legoux, J.G. Arsenaull, B. and Moreau, Ch.,

