



## بررسی تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر خواص و کیفیت پوشش کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ ایجاد شده به روش پاشش سرد

افشین جودکی<sup>1</sup>، محمد جواد اشرفی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16846-13114، [mj\\_ashrafi@iust.ac.ir](mailto:mj_ashrafi@iust.ac.ir)

| چکیده   | اطلاعات مقاله:   |
|---|--|
| <p>در این پژوهش پوشش کامپوزیتی <math>Al-Al_2O_3</math> با استفاده از فرآیند پاشش سرد بر روی ورق آلیاژ Al-1050 ایجاد شد. به منظور ایجاد پوشش پودر آلومینیوم خالص و پودر <math>Al_2O_3</math> با درصد وزنی 50 درصد مخلوط شدند. پوشش با استفاده از گاز نیتروژن در دمای 300 درجه سانتی‌گراد و فشار 30 بار و فاصله‌ی پاشش 20mm انجام شد. پوشش ایجاد شده با استفاده از فرآیند ساچمه‌زنی سانتریفیوژی با سرعت 3000 دور بر دقیقه و اندازه ساچمه 0.6mm به مدت زمان 3 دقیقه مورد ساچمه‌زنی قرار گرفت. اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر خواص و کیفیت پوشش مورد بررسی قرار گرفت مشخصات پوشش با استفاده از ریز سختی سنجی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، نرم‌افزار تحلیل تصویر clemex، میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بر اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر روی پوشش کامپوزیت 10 درصد سختی پوشش افزایش می‌یابد و تخلخل پوشش بر اثر فرآیند ساچمه‌زنی به مقدار 80 درصد کاهش می‌یابد. نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد بر اثر فرآیند ساچمه‌زنی زبری سطح افزایش می‌یابد، و از سوی دیگر به دلیل متراکم شدن و فرسایش، کاهش ضخامت در پوشش رخ می‌دهد.</p> | <p>دریافت: .....<br/>پذیرش: .....<br/><b>کلیدواژه‌ها:</b><br/>پاشش سرد<br/>ساچمه‌زنی<br/>تخلخل<br/>سختی<br/>کامپوزیت <math>Al-Al_2O_3</math></p> |

## Investigating the effect of the shot peening process on the properties and quality of $Al-Al_2O_3$ composite coating created by cold spraying

Afshin Joodaki<sup>1</sup>, Mohammad Javad Ashrafi<sup>1\*</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, [mj\\_ashrafi@iust.ac.ir](mailto:mj_ashrafi@iust.ac.ir)

### Keywords

Cold Spray  
Shot Peening  
Porosity  
Hardness  
Al-  $Al_2O_3$  Composite

### Abstract

In this research,  $Al-Al_2O_3$  composite coating was created using cold spraying process on Al-1050 alloy sheet. In order to create the coating, pure aluminum powder and  $Al_2O_3$  powder were mixed with equal weight percentage (50% wt.). The coating was done using nitrogen gas at a temperature of 300 °C and a pressure of 30 bar and a spraying distance of 20 mm. Moreover, the coating was shot peened using a centrifugal process with a speed of 3000 rpm and peen size of 0.6 mm for 3 minutes. The effect of the shot peening process on the properties and quality of the coating was investigated. The characteristics of the coating were investigated using microhardness measurement, scanning electron microscope, image processing, and atomic force microscope. The results show that the hardness of the coating increases by 10% due to the shot peening process on the composite coating and the porosity of the coating decreases by 80% due to the shot peening process. The results of the atomic force microscope show that the surface roughness increases due to the shot peening process, and on the other hand, the coating thickness decreases due to condensation and erosion.

### 1- مقدمه

فرآیند پاشش سرد یک تکنیک رسوب مواد در حالت جامد است که ذرات با شتاب به سطح بستر برخورد می‌کنند و پوشش تشکیل می‌شود [1,2]. در این فرآیند، ذرات پودر برای تشکیل یک جت مافوق صوت، سیال شده و به یک نازل همگرا- واگرا تزریق می‌شوند [3]. هنگامی که سرعت ذرات از سرعت

بحرانی خود بیشتر شود ذرات بر روی سطح بستر رسوب می‌کنند [2,4,5] و پوشش متراکم زمانی تشکیل می‌شود که سرعت برخورد ذرات به مقدار قابل توجهی بالاتر از سرعت بحرانی باشد. درحالی‌که در سرعت پایین تر، فرسایش زیرلایه و جدایش ذرات رخ می‌دهد مقدار سرعت بحرانی بستگی به خواص زیرلایه و ذرات پاشش دارد [6].

با توجه به تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی در بهبود کیفیت پوشش‌های پاشش سرد تا به امروز پوشش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند و با در نظر گرفتن کاربرد گسترده ذرات تقویت‌کننده در پوشش‌های پاشش سرد، بررسی‌های کمتری نسبت به پوشش‌های کامپوزیت انجام شده است. در این پژوهش سعی شد به بررسی اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر بهبود کیفیت پوشش کامپوزیت Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> پرداخته شود.

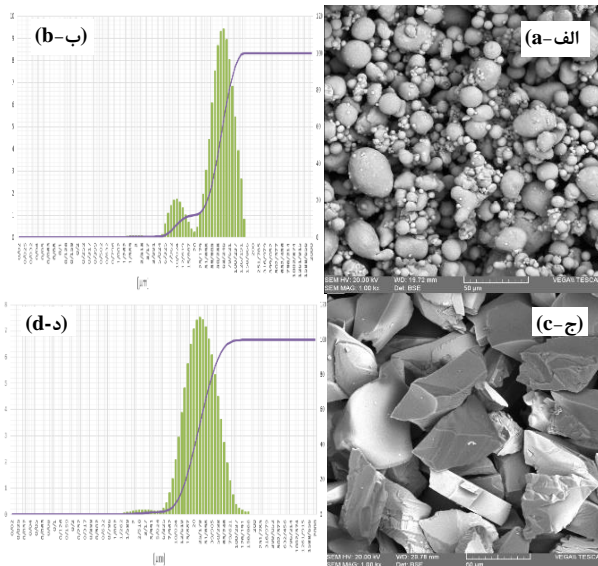
## 2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از پودر آلومینیوم خالص تجاری با خلوص 99.6 درصد و پودر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با اندازه دانه کمتر از 45 میکرومتر استفاده شد. توزیع اندازه دانه ذرات با استفاده از آزمون آنالیز لیزر مشخص شد. پودر آلومینیوم خالص و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با ترکیب وزنی 50 درصد آماده و مخلوط شدند، در شکل شماره 1 نمودار توزیع اندازه ذرات و تصاویر SEM پودرها ارائه گردید. ورق Al-1050 در ابعاد 4×30×50 میلی‌متر تهیه و به‌عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی زیرلایه در جدول شماره 1 نشان داده شده است. سطح زیرلایه‌ها ابتدا با استفاده از ورق سنباده با شماره‌های 80 تا 400 سنباده‌زنی و سپس ماسه پاشی<sup>1</sup> شدند. ماسه پاشی زیرلایه‌ها با استفاده از ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با مش 200، فشار هوای 6 بار انجام شد. زیرلایه‌ها بعد از ماسه پاشی به مدت 30 ثانیه در حمام آلتراسونیک استون قرار گرفته و تمیز شدند. برای پوشش دهی نمونه‌ها از دستگاه پاشش سرد موجود در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. در شکل شماره 2 طرح‌واره‌ای از آن نشان داده شده است. پارامترهای عملیات پاشش در جدول شماره 2 آورده شده است. به‌منظور بررسی اثر ذرات تقویت‌کننده و فرآیند ساچمه‌زنی دو پوشش آلومینیوم خالص و دو پوشش کامپوزیت Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ایجاد شد، در دستگاه مذکور نازل در حین فرآیند ثابت است و با حرکت زیرلایه در مقابل نازل، پوشش یکنواخت روی سطح ایجاد شد.

در فرآیند پاشش سرد پس از برخورد ذرات به سطح زیر در ذرات تغییر شکل پلاستیک شدید رخ می‌دهد، که این تغییر شکل پلاستیک شدید ذرات در فرآیند پاشش سرد به‌خوبی زیر نقطه ذوب مواد اسپری شده است [2]. در این روش به دلیل دمای نسبتاً پایین فرآیند، مشکلات مربوط فرآیندهای دمابالا مانند اکسیداسیون، اعوجاج، تنش باقی‌مانده کششی، تغییرات متالورژیکی و تبدیل فاز نامطلوب کاهش می‌یابد. بنابراین فرآیند پاشش سرد برای زیرلایه‌هایی که به گرما و اکسیداسیون حساس هستند بهتر از فرآیندهای پاشش حرارتی است [7]. این خواص باعث می‌شود که پاشش سرد نه تنها یک فناوری قابل‌رقابت 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 فرآیندهای پاشش حرارتی معمولی دارد. این فرآیند از لحاظ اقتصادی به‌صرفه بوده و می‌توان از آن در یک مرکز تعمیرات و تولید استفاده کرد [8].

طیف وسیعی از پوشش‌های فلزی مانند مس، نیکل، آلومینیوم، تیتانیوم و روی با استفاده از فرآیند پاشش سرد ایجاد می‌شوند [10، 11]. اخیراً برای بهبود عملکرد این پوشش‌های فلزی از ذرات سرامیک و فلز سخت استفاده شده است. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> یکی از متداول‌ترین تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در فرآیند پاشش سرد است مانند [6] Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، [12، 13]، [14] Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و [6] Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> افزودن ذرات سخت به پودر باعث افزایش بازدهی پوشش دهی، افزایش سختی و کاهش تخلخل پوشش می‌شود که مقاومت به خوردگی پوشش‌های فلزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [8]. تحقیقات مختلفی در زمینه پاشش سرد پوشش Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> صورت گرفته است، ضیائی و همکاران [15] پودر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> را با درصد‌های وزنی مختلف با پودر آلومینیوم مخلوط و پوشش ایجاد کردند. نتایج حاصله نشان می‌دهد وجود ذرات باعث تغییر شکل پلاستیک شدید بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش سختی، ریزدانه شدن پوشش، افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه و کاهش تخلخل ذرات پودر آلومینیوم پوشش می‌شود. اما به دلیل برخورد ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به یکدیگر و شکستن آن‌ها و اتصال ضعیف ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به ذرات آلومینیوم باعث افزایش تخلخل در اطراف ذرات تقویت‌کننده می‌شود که خود سبب افزایش تخلخل نهایی در پوشش می‌گردد. در پژوهش دیگری [2] پوشش آلومینیوم - آلومینا با استفاده از دستگاه پاشش سرد کم‌فشار بر روی سطح Al-7075 ایجاد شد نتایج نشان می‌دهد پوشش دارای میکروتورک و تخلخل می‌باشد.

با توجه به این‌که فرآیند ساچمه‌زنی عملیات کار سرد است و ذرات ریز ساچمه مانند یک چکش کوچک عمل می‌کند و باعث تغییر شکل پلاستیک در ماده می‌شود [16]. در صورتی که بتوان با فرآیند ساچمه‌زنی تغییر شکل پلاستیک مضاعف در پوشش پاشش سرد ایجاد کرد این تغییر شکل پلاستیک مضاعف سبب افزایش سختی و متراکم کردن پوشش می‌شود [8]. امروزه تحقیقات مختلفی جهت بهبود کیفیت پوشش با استفاده از فرآیند ساچمه‌زنی صورت گرفته است، یاو و همکاران [17] به بررسی اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر روی پوشش آلومینیوم ایجاد شده توسط پاشش سرد کم‌فشار پرداختند، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد فرآیند ساچمه‌زنی سبب کاهش تخلخل، ریزدانه شدن پوشش و افزایش مقاومت به خوردگی می‌گردد. در پژوهش دیگر [18] اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر پوشش روی باعث کاهش تخلخل و افزایش سختی شده است.



**Fig. 1** (a) SEM image and (b) particle size distribution of pure Al powder, (c) SEM image and (d) particle size distribution of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder  
 شکل 1 (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و (ب) نمودار توزیع اندازه ذرات پودر آلومینیوم خالص، (ج) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و (د) نمودار توزیع اندازه ذرات پودر اکسید آلومینیوم.

<sup>1</sup>Sand Blast

## 3- نتایج و بحث

## 3-1- سختی

نتایج حاصل از ریز سختی پوشش در شکل 3 آورده شده است. مقادیر سختی پوشش برای آلومینیوم خالص، کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  بدون ساچمه‌زنی و پوشش کامپوزیت ساچمه‌زنی شده به ترتیب برابر با 53، 75 و 83 ویکرز رسید، با توجه به این که سختی پوشش آلومینیوم خالص کمتر است این افزایش سختی در پوشش کامپوزیت به علت وجود ذرات سخت  $Al_2O_3$  و ریزدانه شدن ساختار میکروسکوپی پوشش است [20، 19]. از سوی دیگر ذرات پوشش به سطح برخورد می‌کنند و باعث تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شوند و برخورد دوباره ساچمه‌ها به سطح بعد از فرآیند ساچمه‌زنی باعث تغییر شکل ذرات تغییر شکل یافته می‌شود که سبب اعمال تغییر پلاستیک بیشتر و افزایش کار سختی در آن می‌شود [21]، این عوامل در مجموع باعث افزایش سختی نهایی پوشش بعد از فرآیند ساچمه‌زنی می‌شود. باید توجه داشت که در فرآیند پاشش سرد در حین اعمال پوشش هر یک از ذرات مانند یک چکش کوچک عمل می‌کنند که برخورد آن‌ها به ذرات دیگر حالت چکش کاری در سطح پوشش را ایجاد می‌کند که سبب ایجاد تراکم و افزایش سختی پوشش می‌شود اما در لایه‌های سطحی پوشش عمل چکش کاری کمتر انجام می‌شود، بنابراین لایه‌های سطحی دارای سختی کمتری نسبت به لایه‌های زیرین می‌باشند [22]. با اعمال فرآیند ساچمه‌زنی به دلیل ایجاد چکش کاری در سطح نمونه سختی افزایش می‌یابد.

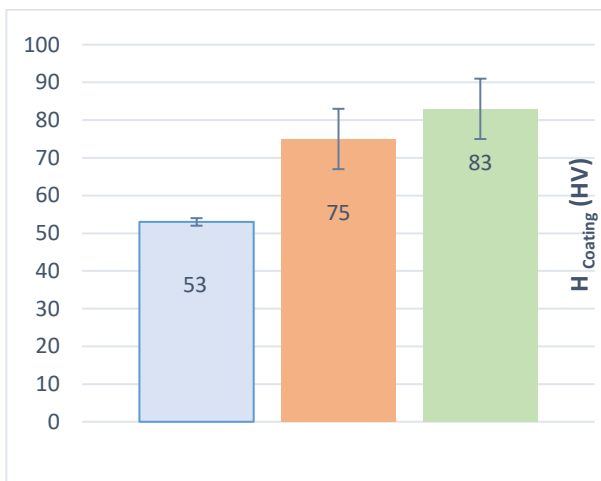


Fig. 3 Microhardness values of coatings

شکل 3 مقادیر ریز سختی پوشش‌ها

## 3-2- تخلخل

نتایج حاصل از تخلخل پوشش در شکل 4 آورده شده است. تخلخل پوشش آلومینیوم خالص برابر با 0.48 درصد، کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  بدون ساچمه‌زنی برابر با 1.1 و تخلخل پوشش ساچمه‌زنی شده برابر با 0.2 گزارش شده است، که وجود ذرات سرامیکی باعث تغییر شکل مضاعف ذرات نرم پوشش شده و باعث افت تخلخل در زمینه پوشش می‌شود [24، 23]. در عین حال باید توجه داشت تخلخل پوشش به دلیل وجود تخلخل در خود ذرات  $Al_2O_3$  و شکستن و خرد شدن این ذرات است. همچنین 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 و بنابراین درصد تخلخل نهایی پوشش‌ها، بیشتر می‌شود [15]. می‌توان به این نکته اشاره کرد که فرآیند ساچمه‌زنی باعث

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم 1050 برحسب درصد وزنی

Table 1 Chemical composition of Al-1050 plate (in wt. %)

| Other  | Zn   | Si   | Fe   | Mg   | Mn   | V    | AL      |
|--------|------|------|------|------|------|------|---------|
| 0.01 > | 0.03 | 0.07 | 0.25 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | Balance |

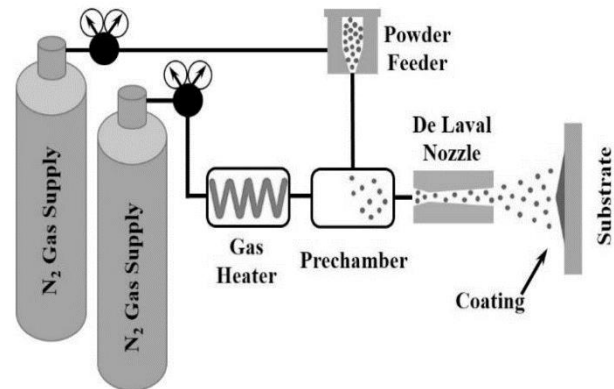


Fig. 2 Schematic of cold spray process

شکل 2 طرح‌واره‌ای از فرآیند پاشش سرد [15]

جدول 2 پارامترهای پوشش ایجادشده به پاشش سرد بر روی بستر Al-1050

Table 2 Parameters of coating created by cold spraying on Al-1050 substrate

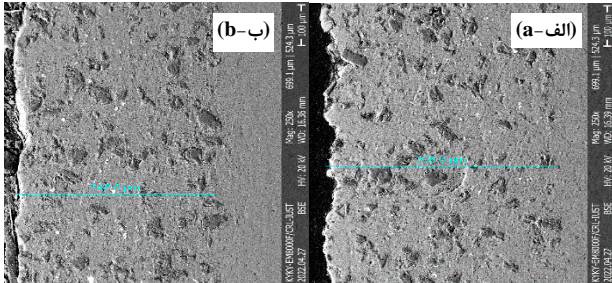
| فاصله‌ی نازل و زیرلایه | فشار گاز | دمای گاز | نوع گاز |
|------------------------|----------|----------|---------|
| 20 mm                  | 30 bar   | 300 (°C) | هیدروژن |

پس از ایجاد پوشش کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  جهت بررسی تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر روی پوشش، نمونه با استفاده از دستگاه ساچمه‌زنی سانتریفیوژی با سرعت 3000 دور بر دقیقه و اندازه ساچمه 0.5-0.7 میلی‌متر به مدت زمان 3 دقیقه ساچمه‌زنی شد، جنس ساچمه مورد استفاده فولادی با سختی 30 راکول C می‌باشد.

بعد از فرآیند ساچمه‌زنی نمونه‌ها، مقطع زنی و مانع سرد انجام شد. سنباده‌زنی نمونه‌ها با استفاده از سنباده با شماره‌های 80 تا 5000 سنباده‌زنی و سپس پرداخت کاری شدند. ساختار پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه مقدار تخلخل نمونه‌ها 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی 500X گرفته شد و سپس اندازه‌گیری مقدار تخلخل پوشش با نرم‌افزار آنالیز تصویر Clemex نسخه 3.5.025 انجام شد. سختی پوشش‌ها با استفاده از دستگاه ریز سختی سنجی و با نیروی 100grf و زمان تأخیر 15 ثانیه اندازه‌گیری شد، به منظور کاهش خطا برای هر نمونه 15 آزمون ریزسختی گرفته شد. با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی تصاویر از سطح نمونه گرفته شد و سپس اندازه‌گیری مقدار زبری سطح با نرم‌افزار Nanoscope انجام شد.

لازم به ذکر است نمونه‌ی آلومینیوم خالص دارای چسبندگی مطلوب به زیرلایه نمی‌باشد و در این پژوهش پس از آن که نمونه آلومینیوم خالص را مورد فرآیند ساچمه‌زنی قرار دادیم پوشش از سطح زیرلایه جدا شد و قادر به تعیین اثر فرآیند ساچمه‌زنی بر آلومینیوم خالص نمی‌باشیم.

کاهش ضخامت در نمونه شده است، با توجه به این که فرایند ساچمه‌زنی سبب جداسازی ذرات دارای اتصال ضعیف از سطح شده [25] و از سوی دیگر فرآیند ساچمه‌زنی باعث متراکم کردن پوشش می‌شود. پس می‌توان کاهش ضخامت را به دلیل متراکم شدن و فرسایش<sup>1</sup> پوشش دانست.



**Fig. 6** SEM images of the cross section of the coating (a) Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS composite coating with thickness (395 μm), (b) Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS-SP shot Peening coating with thickness (345 μm)

شکل 6 تصاویر SEM از سطح مقطع پوشش (الف) پوشش کامپوزیت Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS با ضخامت (395μm)، (ب) پوشش ساچمه‌زنی شده Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS-SP با ضخامت (345μm)

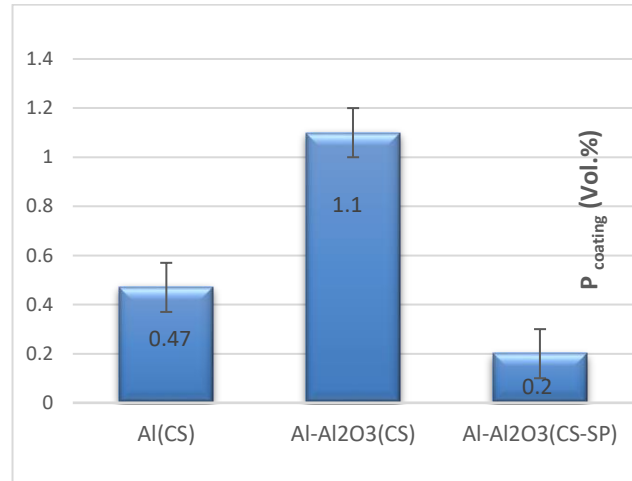
#### 4- نتیجه‌گیری

- وجود ذرات سخت آلومینا در پوشش سبب افزایش سختی پوشش کامپوزیت Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> می‌شود، از سویی دیگر برخورد ذرات سخت آلومینا در پوشش سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیک مضاعف در ذرات تغییر شکل یافته می‌شود. این تغییر شکل پلاستیک بیشتر و افزایش کار سختی سبب افزایش سختی پوشش می‌شود.
- در فرآیند ساچمه‌زنی به دلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتر و افزایش کار سختی مقدار سختی پوشش کامپوزیت افزایش یافت.
- برخورد ذرات سخت آلومینا باعث کاهش تخلخل در زمینه نرم آلومینیوم می‌شود، اما به دلیل خرد شدن و شکستن ذرات آلومینا در برخورد با یکدیگر و اتصال ضعیف ذرات آلومینا با زمینه نرم پوشش تخلخل در اطراف ذرات آلومینا افزایش می‌یابد، در نتیجه سبب افزایش تخلخل نهایی پوشش می‌شود. در فرآیند ساچمه‌زنی برخورد ساچمه‌ها به سطح سبب ایجاد چکش کاری در سطح می‌شود که این امر سبب متراکم شدن پوشش و در نتیجه کاهش تخلخل در آن می‌شود.
- بر اثر برخورد ساچمه به سطح پوشش منافذ سطحی پوشش بسته می‌شوند. همچنین فرآیند ساچمه‌زنی سبب افزایش زبری سطح در نمونه می‌شود.
- بر اثر برخورد مداوم ساچمه به سطح پوشش کاهش ضخامت رخ می‌دهد که این کاهش ضخامت به دلیل فرسایش و متراکم شدن پوشش می‌باشد.

#### 5- مراجع

- [1] Bakshi, S. R., Wang, D., Price, T., Zhang, D., Keshri, A. K., Chen, Y., McCartney, D. G., Shipway, P. H. and Agarwal, A., "Microstructure and Wear Properties of Aluminum/Aluminum-Silicon Composite Coatings Prepared by Cold Spraying" Surface and Coatings Technology, Vol. 204, No. 4, pp. 503-510, 2009.

تغییر شکل مضاعف ذرات تغییر شکل یافته و متراکم شدن پوشش می‌شود، که خود باعث کاهش تخلخل در پوشش می‌گردد. مقادیر تخلخل پوشش‌ها با یکدیگر مقایسه شد، نتایج نشان می‌دهد که پوشش کامپوزیت بدون ساچمه‌زنی نسبت به آلومینیوم خالص 57 درصد افزایش تخلخل و پوشش ساچمه‌زنی شده نسبت به کامپوزیت 80 درصد کاهش تخلخل را دارا می‌باشد.

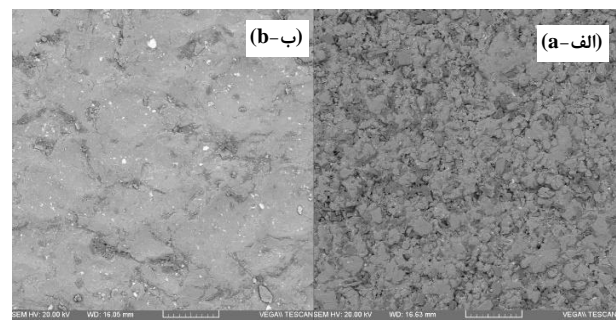


**Fig. 4** Porosity values of coatings

شکل 4 مقادیر تخلخل پوشش‌ها

#### 3-3- سطح پوشش

تصاویر حاصل از تصویربرداری SEM از سطح پوشش در شکل 5 آورده شده است، فرآیند ساچمه‌زنی در سطح پوشش سبب بستن منافذ سطحی پوشش می‌شود و در ادامه ذرات آلومینا در سطح پوشش ساچمه‌زنی شده، به صورت قابل توجهی نسبت به پوشش بدون ساچمه‌زنی کاهش یافته است، که بر اثر برخورد ساچمه به سطح پوشش به علت اتصال ضعیف از سطح جدا یا خرد شده باشند. نتایج حاصل از تحلیل تصاویر آزمون AFM نشان می‌دهد، برخورد ذرات ساچمه به سطح پوشش سبب ایجاد ناهمواری در سطح پوشش شده و در نهایت فرآیند ساچمه‌زنی سبب افزایش زبری سطح در پوشش می‌گردد.



**Fig. 5** SEM images of the coating surface (a) composite coating (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS), (b) shot Peening coating (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS-SP)

شکل 5 تصاویر SEM از سطح پوشش (الف) پوشش کامپوزیت (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS)، (ب) پوشش ساچمه‌زنی شده (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CS-SP)

#### 4-3- ضخامت پوشش

تصاویر SEM دو نمونه‌ی کامپوزیت و کامپوزیت ساچمه‌زنی شده در شکل 6 نشان داده شده است. بررسی تصاویر نشان می‌دهد فرآیند ساچمه‌زنی سبب

<sup>1</sup> Erosion



- [20] Ahmadifard, S., Shahin, N., Kazemi, S., Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/Sic Surface Composite by Friction Stir Processing and Its Characterization" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016.
- [21] Nikbakht, S., Eftekhari, M. and Faraji, G., "Study of Microstructure and Mechanical Properties of Pure Commercial Titanium Via Combination of Equal Channel Angular Pressing and Extrusion" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 453-461, 2017.
- [22] Stoltenhoff, T., Borchers, C., Gärtner, F. and Kreye, H., "Microstructures and Key Properties of Cold-Sprayed and Thermally Sprayed Copper Coatings" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, No. 16-17, pp. 4947-4960, 2006.
- [23] 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.
- [24] Leyman, P. and Champagne, V. K., "Cold Spray Process Development for the Reclamation of the Apache Helicopter Mast Support", *Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Weapons and Materials Research ...*, pp. 2009.
- [25] Zhang, L., Zhang, Y., Wu, H., Yang, S. and Jie, X., "Structure and Corrosion Behavior of Cold-Sprayed Cu/Ni Composite Coating Post-Treated by Ultrasonic Shot Peening" *SN Applied Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-14, 2020.
- [2] Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. and Kreye, H., "Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying" *Acta materialia*, Vol. 51, No. 15, pp. 4379-4394, 2003.
- [3] Peat, T., Galloway, A., Toumpis, A., McNutt, P. and Iqbal, N., "The Erosion Performance of Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings Produced by Co-Deposition Cold Gas Dynamic Spraying" *Applied Surface Science*, Vol. 396, pp. 1623-1634, 2017.
- [4] Stoltenhoff, T., Kreye, H. and Richter, H., "An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings" *Journal of Thermal spray technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 542-550, 2002.
- [5] Liang, Y., Wang, Z., Zhang, J., Zhang, J. and Lu, K., "Enhanced Bonding Property of Cold-Sprayed Zn-Al Coating on Interstitial-Free Steel Substrate with a Nanostructured Surface Layer" *Applied Surface Science*, Vol. 385, pp. 341-348, 2016.
- [6] Triantou, K. I., Pantelis, D. I., Guipont, V. and Jeandin, M., "Microstructure and Tribological Behavior of Copper and Composite Copper+ Alumina Cold Sprayed Coatings for Various Alumina Contents" *Wear*, Vol. 336, pp. 96-107, 2015.
- [7] Cong, D., Li, Z., He, Q., Chen, H., Zhao, Z., Zhang, L. and Wu, H., "Wear Behavior of Corroded Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings Prepared by Cold Spray" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 326, pp. 247-254, 2017.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Suhonen, T., Varis, T., Dosta, S., Torrell, M. and Guilemany, J., "Residual Stress Development in Cold Sprayed Al, Cu and Ti Coatings" *Acta Materialia*, Vol. 61, No. 17, pp. 6329-6337, 2013.
- [11] Price, T., Shipway, P., McCartney, D., Calla, E. and Zhang, D., "A Method for Characterizing the Degree of Inter-Particle Bond Formation in Cold Sprayed Coatings" *Journal of thermal spray technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 566-570, 2007.
- [12] Irissou, E., Legoux, J.-G., Arsenault, B. and Moreau, C., "Investigation of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cold Spray Coating Formation and Properties" *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 16, No. 5, pp. 661-668, 2007.
- [13] Spencer, K., Fabijanic, D. and Zhang, M.-X., "The Use of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cold Spray Coatings to Improve the Surface Properties of Magnesium Alloys" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 3, pp. 336-344, 2009.
- [14] Miguel, J., Guilemany, J. and Dosta, S., "Effect of the Spraying Process on the Microstructure and Tribological Properties of Bronze-Alumina Composite Coatings" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 7, pp. 2184-2190, 2010.
- [15] Ziaei, H., Abdollah-zadeh, A., Eyvazi, Z., Seraj, R. and Kargar, F., "The Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles on the Microstructure and Hardness of Cold Sprayed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coating" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 473-480, 2019.
- [16] Modi, C., "Shot Peening of Automobile Parts," *Indian Foundry Journal*, Vol. 61, No. 2, pp. 38-42, 2015.
- [17] Yao, H. L., Hu, X. Z., Yi, Z. H., Xia, J., Tu, X. Y., Li, S. B., Yu, B., Zhang, M. X., Bai, X. B. and Chen, Q. Y., "Microstructure and Improved Anti-Corrosion Properties of Cold-Sprayed Zn Coatings Fabricated by Post Shot-Peening Process" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 422, pp. 127557, 2021.
- [18] Lu, F. F., Ma, K., Li, C. X., Yasir, M., Luo, X. T. and Li, C. J., "Enhanced Corrosion Resistance of Cold-Sprayed and Shot-Peened Aluminum Coatings on La43m Magnesium Alloy" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 394, pp. 125865, 2020.
- [19] [www.nanoindustry.ir](http://www.nanoindustry.ir)  
<https://nanoindustry.ir/report/4203/%D9%81%D8%B1%D8%A7%DB%8C%D9%86%D8%AF%D9%BE%D8%A7%D8%B4%D8%B4-%D8%B3%D8%B1%D8%AF>