

# اثر فشار گاز و فاصله پاشش فرایند پاشش سرد بر خواص پوشش‌های فلز روی بر بستر فولادی

محمدهادی خانابائی ساعتلو، امیر عبدالله‌زاده\* و رجب‌علی سراج

بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده: هدف از این پژوهش، بررسی اثر فشار گاز و فاصله پاشش فرایند پاشش سرد فلز روی بر بستر فولاد کم کربن است. به همین منظور، ابتدا پودر فلز روی در فشارهای ۲۰ و ۳۰ بار و فواصل پاشش ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر پاشش شدند. ریزساختار پوشش‌های ایجادشده با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی بررسی و ریزسختی پوشش‌ها اندازه‌گیری شد. سپس، پوشش منتخب و بستر فولادی تحت آزمون خوردگی پلاریزاسیون تافل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار باعث کاهش تخلخل و افزایش ریزسختی ناشی از تغییر شکل بیشتر می‌شود. همچنین در فشار ثابت، فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر، کم‌ترین تخلخل و بیش‌ترین ریزسختی را به دلیل دمای بالاتر ذرات هنگام برخورد به بستر دارد. نتایج به‌دست آمده از آزمون پلاریزاسیون نشان می‌دهد که پوشش نسبت به بستر ماهیت فداشونده دارد و چگالی جریان خوردگی را ۴۸٪ و نرخ خوردگی را ۳۳٪ نسبت به بستر کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پاشش سرد، فولاد، فلز روی، تخلخل، مقاومت به خوردگی.

# Effect of Gas Pressure and Stand-Off Distance on the Properties of Cold Sprayed Zinc on Steel Substrate

M.H. Khanbabaee Saatloo, A. Abdollah-zadeh\* and R.A Seraj

Department of Materials Engineering, Faculty of Mining and Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

## ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the effect of gas pressure and stand-off distance of cold spray process of zinc on low carbon steel substrate. For this purpose, zinc powder was sprayed at pressures of 20 and 30 bar and stand-off distances of 20 and 30 mm. The microstructure of the coatings was investigated with optical and scanning electron microscope and the micro-hardness of the coatings was measured. Then, the selected coating and steel substrate were subjected to polarization corrosion test. The results showed that increasing the gas pressure from 20 to 30 bar decreases the porosity and increases the micro-hardness due to further deformation. Also, the stand-off distance of 20 mm has lowest porosity and the highest micro-hardness due to the higher temperature of the particles when impacts the substrate. The results obtained from the polarization test show that the coating has a sacrificial nature compared to the substrate and reduces the corrosion current density by 48% and corrosion rate of 33% compared to the substrate.

**Keywords:** Cold spray, Steel, Zinc, Porosity, Corrosion resistance.

## ۱- مقدمه

که مانع از خوردگی بیشتر زمانی که پوشش فاقد تخلخل است، شود (۸-۳).

پاشش سرد فرایندی با نرخ پوشش دهی بالا، برای مهندسی سطح، ترمیم و تعمیر سطح قطعات صنعتی است که در آن ذرات پودری با سرعت مافوق صوت با عبور از یک نازل، به سمت بستر شتاب می گیرند. با وجود پیش گرم کردن گاز در این فرآیند، دمای ذرات پودری هنگام برخورد به بستر کمتر از نقطه ذوب آنها است، از این رو پاشش سرد به عنوان یک فرآیند حالت جامد در نظر گرفته می شود. دمای پایین پاشش سرد می تواند از اکسیداسیون ذرات پودری جلوگیری کند. سایر چالش های مربوط به پوشش های معمولی مانند تبلور مجدد، استحاله فازی، تجزیه و رشد دانه را می توان با فرآیند پاشش سرد از بین برد یا به حداقل رساند (۹-۱۷). معمولاً پوشش های ایجاد شده با پودرهای کروی در مقایسه با پودرهای نامنظم استحکام اتصال بالاتری دارند (۱۸).

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه پاشش سرد روی انجام شده است. لی و همکاران (۱۹)، پوشش روی متراکم را با تغییر شکل شدید ذرات با پاشش سرد بر بستر فولادی ایجاد کردند.

فولاد به دلیل خواص مناسب، سهولت در برشکاری و جوشکاری، توانایی شکل پذیری بسیار خوب و قیمت پایین، کاربرد گسترده ای در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، ساختمان سازی، نیروگاهی و تجهیزات نفت و گاز دارد. اما، فولادها در برابر محیط های مرطوب و خورنده آسیب پذیر هستند و مقاومت به خوردگی آنها پایین است. یکی از راه های حفاظت از تماس سطح قطعات صنعتی با محیط و جلوگیری از خوردگی، استفاده از پوشش روی است. این پوشش، سطح فولاد را می پوشاند و به عنوان مانعی در برابر رسیدن مواد خورنده به بستر فولادی عمل می کند (۳-۱).

روی و پوشش های آن به طور گسترده در تجهیزات و سازه های فولادی برای محافظت از آنها در برابر خوردگی و تخریب سطح استفاده شده است. فلز روی، پتانسیل خوردگی بسیار کمی دارد. هنگامی که روی با ماده ای با پتانسیل بالاتر جفت می شود، پوشش روی به عنوان آند فداشونده عمل می کند و باعث جلوگیری از خوردگی بستر می شود. علاوه بر این، محصولات اکسیدی می تواند بر پوشش همگن روی ایجاد شود

جدول ۱- ترکیب شیمیایی بستر فولادی (برحسب درصد وزنی)

عناصر	Fe	C	Si	Mn	Cr	P	S
ورق فولادی	پایه	۰/۰۵۵	۰/۱۶۷	۰/۷۶۲	۰/۰۷۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹

بستر فولادی مورد استفاده در این پژوهش از نوع فولاد کم کربن است. ترکیب شیمیایی به دست آمده با طیف‌سنجی جرقه‌ای این فولاد (برحسب درصد وزنی) در جدول (۱) آمده است. به منظور تهیه بسترها، ورق فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر با طول و عرض ۵۰ و ۲۲ میلی‌متر برش خورد. برای آماده‌سازی سطح بستر، از سنباده ۶۰ تا ۴۰۰ جهت تمیزکاری و حذف اکسیدهای سطحی استفاده شد. بسترها، برای ایجاد زبری، با استفاده از پودر  $SiO_2$  با اندازه ذرات ۵۰ میکرومتر با هوای فشرده ماسه‌پاشی شدند. سپس، بسترها به مدت ۳۰ ثانیه در حمام اولتراسونیک استون به منظور تمیزکاری سطحی قرار گرفتند.

#### ۲-۲- پودر

پودر فلز روی تجاری با درصد خلوص ۹۹٪ با اندازه ذرات زیر ۴۵ میکرومتر تهیه شد. از آزمون سنجش اندازه ذرات لیزری با دستگاه Mastersizer 2000 به منظور بررسی توزیع اندازه ذرات پودرها استفاده شد. علاوه بر این، مورفولوژی پودرها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل TESCAN MIRA3 بررسی شد. شکل (۱-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر روی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات روی دارای مورفولوژی کروی هستند. شکل (۱-ب) نمودار توزیع اندازه ذرات بر حسب میکرومتر را نشان می‌دهد. میانگین اندازه ذرات فلز روی ۶.۷ میکرومتر است.

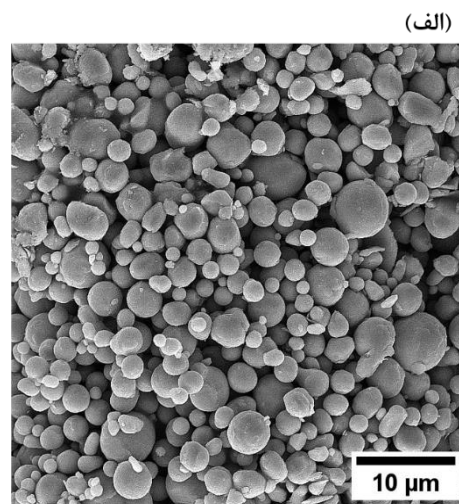
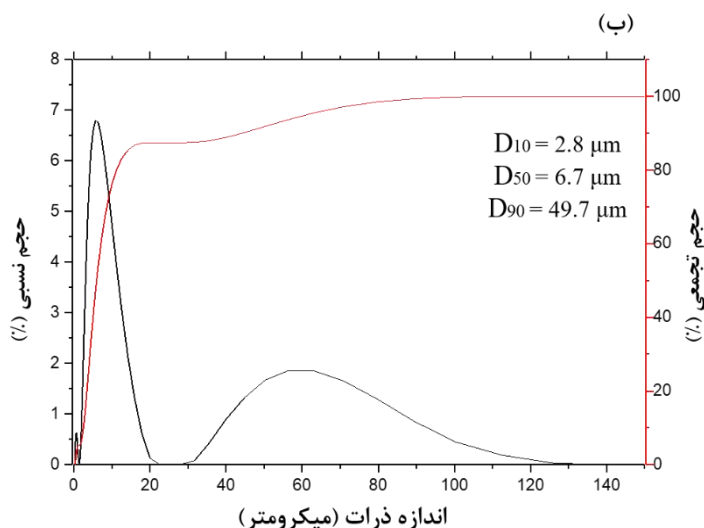
#### ۲-۳- آزمون‌ها

دستگاه پاشش سرد مورد استفاده در پژوهش حاضر، از نوع

لگوکس و همکاران (۲۰)، بازده پوشش‌دهی پوشش‌های روی را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نشان دادند بازده پوشش‌دهی برای فلز روی با افزایش دمای بستر کاهش می‌یابد. وینای و همکاران (۴)، پوشش‌های فلز روی پاشش سرد شده را با فرایندهای پاشش شعله‌ای و پاشش سیم قوسی از لحاظ عملکرد خوردگی مقایسه کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در بازه دمایی ۳۵۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بهترین دما از لحاظ عملکرد خوردگی طولانی مدت برای پوشش‌های پاشش سرد است و پوشش‌های پاشش سرد نرخ خوردگی کمتری نسبت به پوشش‌های پاشش شعله‌ای و قوسی دارند. لی و همکاران (۲۱)، گزارش کردند که با پاشش سرد روی، تغییر شکل پلاستیک شدید ذرات روی اتفاق می‌افتد. همچنین، دانه‌های تغییر شکل یافته دچار تبلور مجدد می‌شوند که باعث تشکیل دانه‌های نانوکریستالی در پوشش روی می‌شود. ژای و همکاران (۲۲)، پوشش فلز روی را بر بستر منیزیمی ایجاد کردند. آن‌ها مشاهده کردند افزایش فشار و دما باعث افزایش ضخامت پوشش‌های ایجاد شده می‌شود. با وجود تحقیقات مختلفی که در زمینه پاشش سرد فلز روی انجام شده است اما به دلیل پراکندگی اطلاعات موجود، دید کلی در رابطه با متغیرهای فشار گاز و فاصله پاشش فلز روی بر بستر فولادی وجود ندارد. هدف از این پژوهش، بررسی اثر متغیرهای فشار (۲۰ و ۳۰ بار) و فاصله پاشش (۲۰ و ۳۰ میلی‌متر) بر خواص پوشش‌های فلز روی پاشش سرد شده بر بستر فولاد کم کربن می‌باشد.

#### ۲- مواد و روش تحقیق

##### ۱-۲- بستر



شکل ۱- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز روی و ب) نمودار توزیع اندازه ذرات فلز روی.

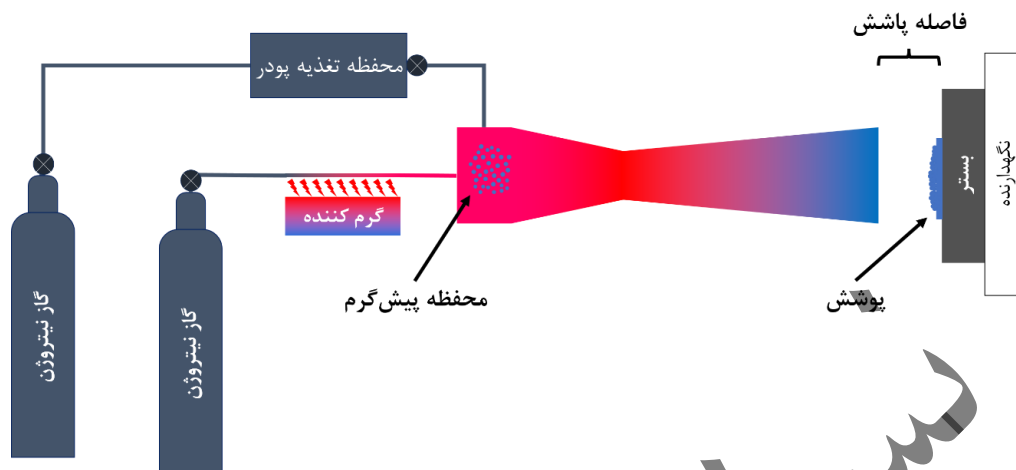
عدد ریزسختی به صورت میانگین ۱۰ نقطه گزارش شد. به منظور بررسی رفتار خوردگی بستر و پوشش آزمون خوردگی پلاریزاسیون تافل با دستگاه پتانسیواستات biologic-VSP300 انجام شد. آزمون خوردگی در محلول ۳/۵٪ وزنی نمک در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد. به منظور رسیدن به حالت پایدار، پوشش و بستر به مدت ۳۰ دقیقه در محلول قرار گرفتند. نرخ روبش برای آزمون پلاریزاسیون ۵٪ میلی ولت بر ثانیه انتخاب شد. پتانسیل در محدوده ۲۵۰ میلی ولت بالاتر و پایین تر از پتانسیل مدار باز توسط نرم افزار EC-Lab مشخص و شیب خطوط آندی و کاتدی محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

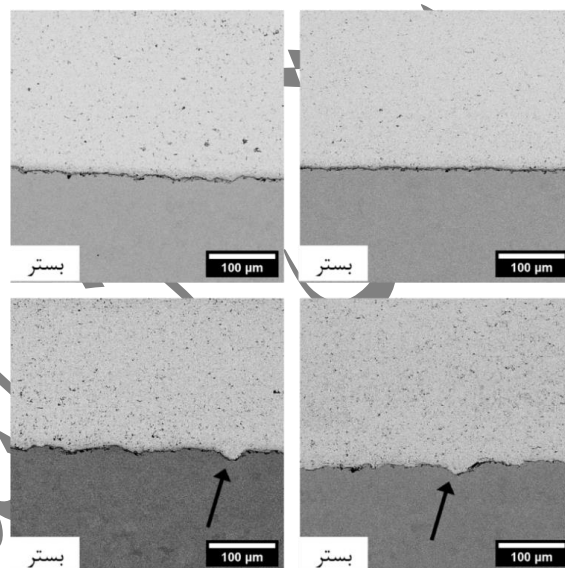
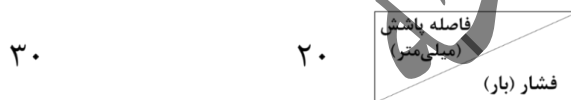
#### ۳-۱- بررسی ریزساختار

ریزساختار سطح مقطع پوشش‌های پاشش سرد شده فلز روی در شکل (۳) نشان داده شده است. در فشار ۲۰ بار، کیفیت اتصال پوشش و بستر در فصل مشترک مناسب است. در فشار ۳۰ بار نیز، کیفیت اتصال پوشش و بستر مناسب است و نسبت به فشار ۲۰ بار فرورفتگی‌های بیش‌تری قابل مشاهده است. تمامی پوشش‌ها کیفیت خوبی از لحاظ تخلخل دارند و هیچ‌گونه ترکی در فصل مشترک پوشش و بستر مشاهده

پاشش سرد پر فشار است که در آن پودر به قسمت همگرای نازل و قبل از نازل وارد می‌شود. طرحواره دستگاه پاشش سرد مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است. پاشش سرد پودر فلز روی در فشارهای ۲۰ و ۳۰ بار و فواصل پاشش ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر با استفاده از گاز نیتروژن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد روی بسترهای فولادی انجام شد. به منظور بررسی ریزساختار پوشش‌ها پس از انجام فرایند پاشش سرد، نمونه‌ها مقطع‌زنی و مانت شدند. سپس سنباده‌زنی نمونه‌ها تا سنباده ۳۰۰۰ انجام شد. پس از آن پرداخت‌کاری نمونه‌ها با محلول حاوی ذرات اکسید آلومینیوم با اندازه ذرات ۰/۳ میکرومتر صورت گرفت. برای حکاکی پوشش از محلول آب و هیدروکسید سدیم به مدت ۵ ثانیه استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل TESCAN MIRA3 جهت بررسی سطح مقطع پوشش‌ها استفاده شد. برای محاسبه میزان تخلخل موجود در پوشش، از تصویر میکروسکوپی نوری در نواحی مختلف یک پوشش، در مقیاس ۱۰۰ برابر استفاده شد. اندازه‌گیری تخلخل توسط نرم‌افزار ImageJ انجام شد. آزمون ریزسختی پوشش‌های روی با استفاده از دستگاه Buehler LTD انجام شد. آزمون ریزسختی با بار اعمالی ۵۰ گرم با زمان توقف ۱۵ ثانیه در ۱۰ نقطه در نواحی مختلف یک پوشش انجام شد و



شکل ۲- طرحواره دستگاه پاشش سرد پر فشار.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های فلز روی در فشار ۲۰ و ۳۰ بار و فواصل پاشش ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر. پیکان‌های سیاه نشان‌دهنده قفل مکانیکی پوشش هستند.

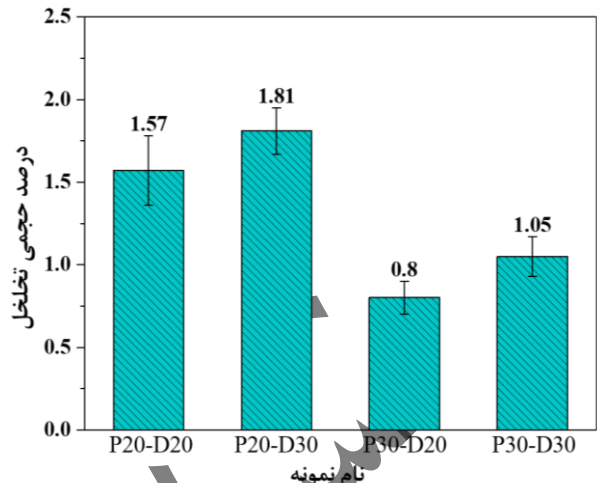
درصد حجمی تخلخل موجود در پوشش‌های فلز روی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار، درصد تخلخل پوشش کاهش می‌یابد که می‌تواند به علت افزایش سرعت ذرات و افزایش تغییر شکل ذرات با افزایش فشار گاز باشد که در نتیجه باعث بهبود اتصال ذرات می‌شود (۲۵). علاوه بر این، افزایش

نمی‌شود. پستی و بلندی‌های قابل توجهی در فصل مشترک پوشش و بستر دیده می‌شود که نشان از قفل‌شدگی مکانیکی ذرات به بستر دارد (۲۳ و ۲۴). نمونه‌ها در فشار ۳۰ بار ساختار متراکم‌تری را نشان می‌دهند که می‌تواند به علت افزایش تغییر شکل ذرات با افزایش فشار گاز و در نتیجه کاهش تخلخل باشد.

شکل (۵) تصویر میکروسکوپی نوری حکاکی شده از سطح مقطع پوشش‌های روی را نشان می‌دهد. ریزساختار، پوشش‌های مترکم و ذرات تغییرشکل یافته روی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پوشش‌هایی که در فشار ۲۰ بار ایجاد شدند پهن‌شدگی کم‌تری نسبت به پوشش‌هایی که در فشار ۳۰ بار ایجاد شدند، دارند. با افزایش فشار از ۲۰ به ۳۰ بار، پهن‌شدگی ذرات روی به دلیل افزایش سرعت ضربه ذرات افزایش یافته است. شکل (۵-و) پوشش P30-D20 (فشار ۳۰ بار و فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر) را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. نشانگر قرمز ذرات پهن شده به شکل پنکیک را نمایش می‌دهد که نشان‌دهنده تغییرشکل شدید ذرات است. به دلیل این‌که تغییرشکل شدید ذرات در اثر ضربه عمدتاً روی فصل مشترک ذرات اثر می‌گذارد و باعث کشیدگی و پهن شدن ذرات می‌شود، رشد اندازه ذرات پس از پاشش سرد نسبت به پودر اولیه مشاهده نمی‌شود (۳۲ و ۳۳).

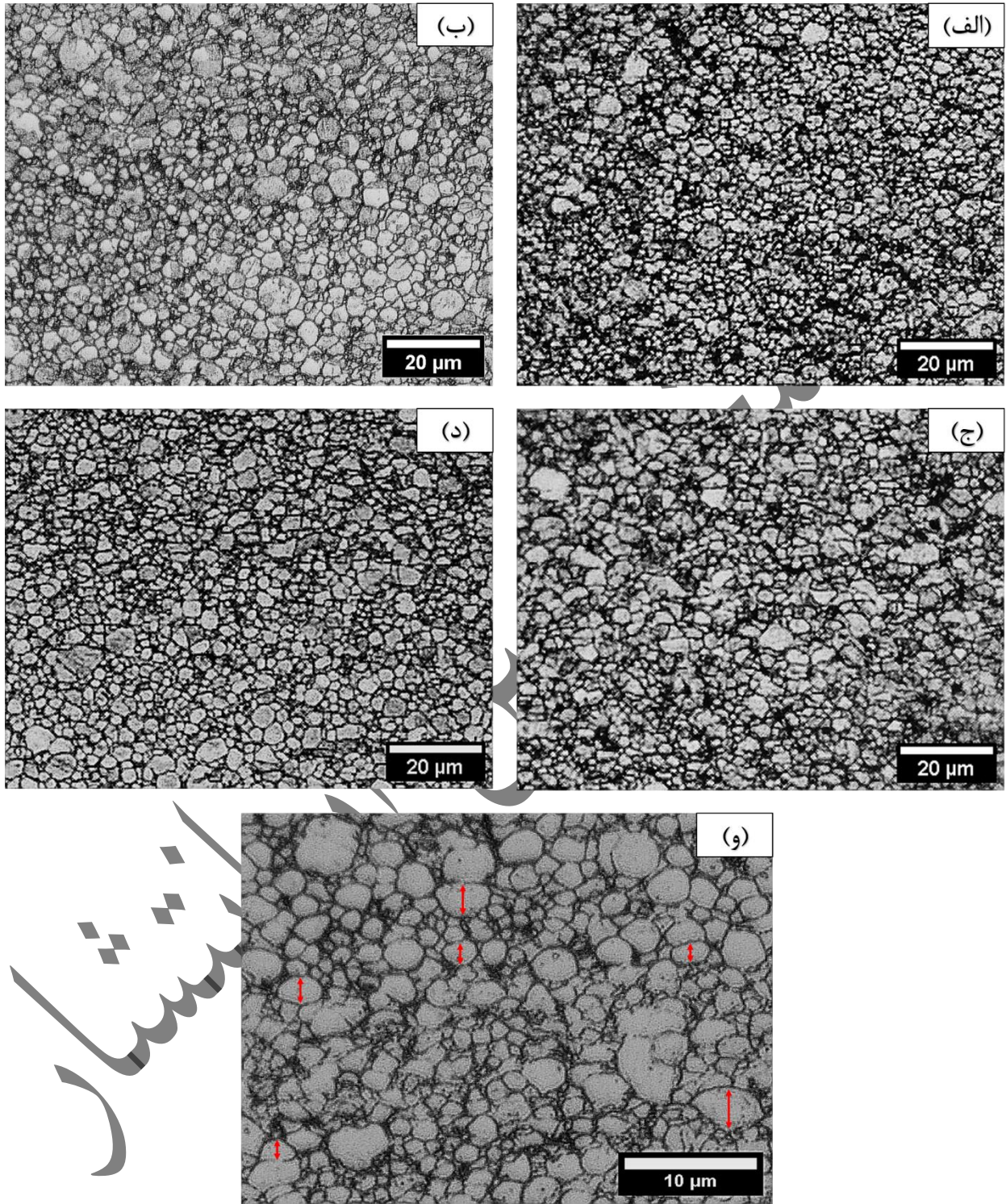
### ۳-۲- ریزسختی سنجی پوشش‌ها

نتایج حاصل از آزمون ریزسختی پوشش‌های فلز روی در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای پوشش‌های فلز روی با افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار ریزسختی افزایش می‌یابد. افزایش فشار باعث افزایش سرعت ذرات و افزایش تغییرشکل می‌شود که منجر به افزایش ریزسختی می‌شود (۲۵). همچنین با افزایش فاصله پاشش از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، ریزسختی کاهش می‌یابد. افزایش فاصله پاشش باعث کاهش دمای ذرات هنگام برخورد به بستر می‌شود که این کاهش دما باعث کاهش ریزسختی می‌شود (۲۶ و ۳۱). به‌طور معمول برای پوشش‌های پاشش سرد افزایش متغیرهای فرآیند باعث افزایش کارسرد انجام شده می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش ریزسختی می‌شود (۴). در میان پژوهش‌های موجود در مورد پوشش‌های روی پاشش سرد شده، لی و همکاران (۲۱)، بالاترین سختی (۷۶ ویکرز) را گزارش کردند. استفاده از گاز هلیوم که منجر به سرعت ذرات بالاتر و اثر آن بر پالایش دانه



شکل ۴- نمودار درصد تخلخل موجود در پوشش‌های فلز روی در فشار و فواصل پاشش مختلف (نمادهای P و D به ترتیب نشان‌دهنده فشار و فاصله پاشش هستند).

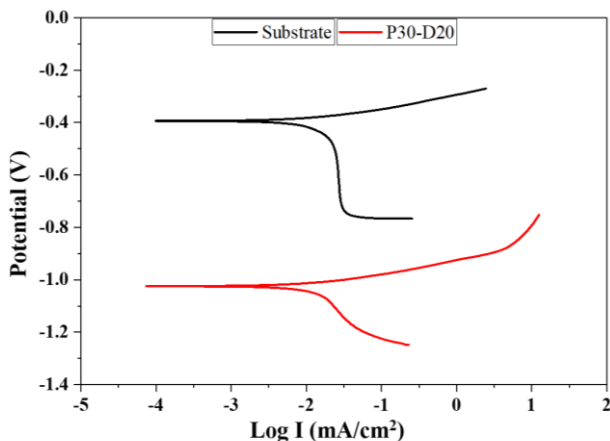
فاصله پاشش از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، به علت کاهش دمای ذرات باعث افزایش تخلخل می‌شود (۲۶). شعبانی و همکاران (۲۷)، با بررسی پوشش مس خالص، مشاهده کردند که افزایش فشار گاز باعث کاهش تخلخل می‌شود. این کاهش به دلیل بهبود اتصال ذرات در اثر برخورد با سرعت‌های بالاتر و افزایش تغییرشکل ذرات است. در مطالعه دیگری، اداجی و همکاران (۲۸)، با پاشش سرد پودر فولاد زنگ نزن مشاهده کردند که افزایش فشار گاز، اثر قابل توجهی در کاهش درصد تخلخل پوشش دارد. افزایش فشار گاز باعث افزایش سرعت و تغییرشکل ذرات می‌شود که این می‌تواند علت کاهش تخلخل با افزایش فشار گاز باشد (۲۹). افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار در این پژوهش، می‌تواند تا ۴۹٪ باعث کاهش تخلخل شود. با افزایش فاصله پاشش، سرعت ذرات افزایش و دمای آن‌ها کاهش می‌یابد (۳۰ و ۳۱). در فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر به دلیل دمای بالای ذرات هنگام برخورد به بستر، تخلخل کاهش پیدا کرده است و در فاصله پاشش ۳۰ میلی‌متر به دلیل کاهش دما تخلخل افزایش پیدا می‌کند و کیفیت پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش فاصله پاشش از ۳۰ به ۲۰ میلی‌متر در این پژوهش، می‌تواند تا ۲۴٪ باعث کاهش تخلخل شود.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نوری حکاکی شده از سطح مقطع پوشش  
 الف) P20-D20، ب) P20-D30، ج) P30-D20، د) P30-D30 و و) سطح مقطع پوشش P30-D20 در بزرگنمایی بالاتر.

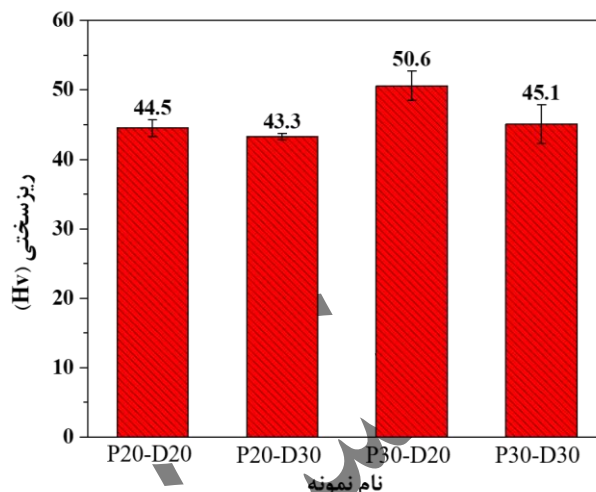
بالاتر از ورق روی آنیل شده (۳۰ ویکرز) است، که نشان‌دهنده اثر کرنش سختی در هنگام پاشش سرد است (۲۱). در

می‌شود، دلیل احتمالی چنین سختی بالایی در پوشش آن‌ها است. مشاهده می‌شود که سختی پوشش‌ها، به‌طور قابل توجهی



شکل ۷- نمودار پلاریزاسیون Tafel پوشش روی و بستر فولادی در محلول ۳/۵٪ نمک.

بستر و پوشش را تحت آزمون پلاریزاسیون Tafel در محلول ۳/۵٪ وزنی نمک را نشان می‌دهد. در آزمون‌های خوردگی، پتانسیل خوردگی بالاتر، نمایانگر تمایل به خوردگی پایین‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پتانسیل پوشش پایین‌تر از پتانسیل بستر است که حاکی از ماهیت فداشونده پوشش فلز روی برای بستر فولادی است. جدول (۲)، نتایج استخراج شده از آزمون پلاریزاسیون Tafel، شامل پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ )، چگالی جریان خوردگی ( $I_{corr}$ )، شیب شاخه آندی ( $\beta_a$ ) و کاتدی ( $\beta_c$ )، مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) و نرخ خوردگی ( $Corrosion Rate$ ) را نشان می‌دهد. نرخ خوردگی بر حسب MPY (میلی اینچ در سال) گزارش شده است. مقادیر مقاومت پلاریزاسیون، با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شدند. جریان خوردگی پوشش ۴۸٪ کمتر از جریان خوردگی بستر می‌باشد. علاوه بر این، پوشش تا ۳۳٪ نرخ خوردگی را نسبت به بستر فولادی کاهش می‌دهد. لاپوشکینا و همکاران (۶)، چگالی جریان خوردگی پوشش روی را  $10 \mu A/cm^2$  محاسبه کردند. همچنین، ژای و همکاران (۲۲)، چگالی جریان خوردگی پوشش روی خالص را  $321 \mu A/cm^2$  محاسبه کردند. مقایسه چگالی جریان خوردگی پوشش روی در پژوهش حاضر ( $9/38 \mu A/cm^2$ ) با پژوهش‌های دیگر (۶ و ۲۲)، حاکی از عملکرد خوردگی مناسب پوشش روی در این پژوهش است.



شکل ۶- ریزسختی پوشش‌های فلز روی در فشارهای ۲۰ و ۳۰ بار و فواصل پاشش ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر. (نمادهای P و D به ترتیب نشان‌دهنده فشار و فاصله پاشش هستند).

پژوهش‌های مختلف (۳، ۴ و ۳۴)، ریزسختی پوشش‌های روی سنجیده شده است. ریزسختی پوشش‌های روی پاشش سرد شده در پژوهش‌های پیشین در بازه ۳۵-۵۷ ویکرز محاسبه شده است که با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، مطابقت دارد. مالدی و همکاران (۳)، مشاهده کردند که تغییر فاصله پاشش اثر قابل توجهی بر ریزسختی ندارد. همچنین، وینای و همکاران (۴)، نیز دریافتند که ریزسختی پوشش‌های روی در متغیرهای مختلف به اشباع می‌رسد و دلیل آن می‌تواند دمای تبلور مجدد پایین روی باشد که برای از بین بردن بخش قابل توجهی از اثرات سخت شدن کافی است.

### ۳-۳- بررسی عملکرد خوردگی

به طور کلی، مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های پاشش سرد عمدتاً به استحکام اتصال بین ذرات، مقدار کارسرد و تخلخل مرتبط است (۴). به همین دلیل پوشش فلز روی با فشار ۳۰ بار و فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر با کم‌ترین تخلخل و بیش‌ترین ریزسختی به عنوان پوشش بهینه در این پژوهش به منظور انجام آزمون خوردگی انتخاب شد. شکل (۷) رفتار الکتروشیمیایی



جدول ۲- نتایج استخراج شده از آزمون پلاریزاسیون تافل بستر و پوشش روی.

Corrosion rate (Mpy)	R <sub>p</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	β <sub>c</sub> (mV)	β <sub>a</sub> (mV)	I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	E <sub>corr</sub> (mV)	نمونه
۸/۳۶	۱۳۲۴/۴۲	۱۰۱۹/۷	۵۸/۴	۱۸/۱۳	-۳۹۵/۷۴	بستر
۵/۶۲	۱۶۲۷/۸	۱۶۱/۲	۴۴/۹	۹/۳۸	-۱۰۲۵/۲۷	پوشش

۳. در این پژوهش، بهترین پوشش از لحاظ تخلخل و ریزسختی، پوشش ایجاد شده در فشار ۳۰ بار و فاصله پاشش ۲۰ میلی متر (تخلخل ۰/۸٪ و ریزسختی ۵۰/۶ ویکرز) است که این تخلخل پایین و ریزسختی بالا به دلیل افزایش سرعت ذرات ناشی از فشار ۳۰ بار و دمای بالای ذرات هنگام برخورد به بستر ناشی از فاصله پاشش ۲۰ میلی متر است. علاوه بر این، پوشش فلز روی، نرخ خوردگی را ۳۳٪ و چگالی جریان خوردگی را ۴۸٪ نسبت به بستر فولادی کاهش می دهد که نشان دهنده عملکرد خوردگی مناسب پوشش نسبت به بستر است.

#### تشکر و سپاسگزاری

از مساعدت جناب آقای مهندس فیروز کارگر که زحمت انجام آزمون های پاشش سرد را در دانشگاه تربیت مدرس به عهده داشتند، تشکر می کنم.

#### تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

$$R_p = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3 \times I_{corr} \times (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، پاشش سرد فلز روی بر بستر فولاد کم کربن با هدف بررسی اثر متغیرهای فشار گاز و فاصله پاشش در فشارهای ۲۰ و ۳۰ بار و فواصل پاشش ۲۰ و ۳۰ میلی متر انجام شد. خلاصه ای از نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. سطح مقطع تمامی پوشش ها متراکم بودند و هیچ گونه ترکی مشاهده نشد. فشار ۳۰ بار کم ترین درصد تخلخل و بیش ترین ریزسختی را دارد. با افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار، درصد تخلخل به دلیل افزایش سرعت ذرات و تغییر شکل بیشتر ذرات کاهش و ریزسختی افزایش یافت. فاصله پاشش ۲۰ میلی متر از لحاظ تخلخل و ریزسختی بهترین عملکرد را از خود نشان داد. با افزایش فاصله پاشش از ۲۰ به ۳۰ میلی متر، به دلیل کاهش دمای ذرات هنگام برخورد به بستر تخلخل پوشش افزایش و ریزسختی آن کاهش یافت.

۲. آزمون خوردگی پلاریزاسیون تافل نشان می دهد پوشش فلز روی به دلیل پتانسیل پایین تر نسبت به بستر فولادی، ماهیت فداشونده و حفاظت کاتدی برای بستر فولادی دارد.

#### واژه نامه

1. ??

#### مراجع

- Dwivedi D, Lepková K, Becker T. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. J RSC Advances 2017;7(8):4580–610. doi:10.1039/c6ra25094g.
- Marder AR. The metallurgy of zinc-coated steel. J Progress in materials science 2000;45(3):191–271. doi:10.1016/S0079-6425(98)00006-1.
- Maledi NB, Oladijo OP, Botef I, Ntsoane TP,

- Madiseng A, Moloisane L. Influence of cold spray parameters on the microstructures and residual stress of Zn coatings sprayed on mild steel. *J Surface and Coatings Technology* 2017;318:106–13. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.03.062.
4. Vinay G, Chavan NM, Kumar S, Jyothirmayi A, Bodapati BR. Improved microstructure and properties of cold sprayed zinc coatings in the as sprayed condition. *J Surface and Coatings Technology* 2022;438(March):128392. doi:10.1016/j.surfcoat.2022.128392.
  5. Tafreshi M, Allahkaram SR, Farhangi H. Comparative study on structure, corrosion properties and tribological behavior of pure Zn and different Zn-Ni alloy coatings. *J Materials Chemistry and Physics* 2016;183:263–72. doi:10.1016/j.matchemphys.2016.08.026.
  6. Lapushkina E, Yuan S, Mary N, Adrien J, Ogawa K, Normand B. Contribution in optimization of Zn Cold-sprayed coating dedicated to corrosion applications. *J Surface and Coatings Technology* 2020;400(July):126193. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126193.
  7. Güleç A, Cevher Ö, Türk A, Ustel F, Yılmaz F. Accelerated corrosion behaviors of Zn, Al and Zn/15Al coatings on a steel surface. *J Materiali in Tehnologije* 2011;45.5:477-482.
  8. Chavan NM, Kiran B, Jyothirmayi A, Phani PS, Sundararajan G. The corrosion behavior of cold sprayed zinc coatings on mild steel substrate. *Journal of Thermal Spray Technology* 2013;22(4):463–70. doi: 10.1007/s11666-013-9893-z.
  9. Assadi H, Kreye H, Gärtner F, Klassen T. Cold spraying – A materials perspective. *J Acta Materialia* 2016;116:382–407. doi:10.1016/j.actamat.2016.06.034.
  10. Goyal T, Walia RS, Sidhu TS. Effect of parameters on coating density for cold spray process. *J Materials and Manufacturing Processes* 2012;27(2):193–200. doi:10.1080/10426914.2011.566906.
  11. Srikanth A, Basha GMT, Venkateshwarlu B. A brief review on cold spray coating process. *J Materials Today: Proceedings* 2020;22:1390–7. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.482.
  12. Rokni MR, Nutt SR, Widener CA, Champagne VK, Hrabe RH. Review of relationship between particle deformation, coating microstructure, and properties in high-pressure cold spray. *Journal of thermal spray technology* 2017;26:1308–55. doi:10.1007/s11666-017-0575-0.
  13. Singh H, Sidhu TS, Kalsi SBS. Cold spray technology: Future of coating deposition processes. *J Frattura ed Integrita Strutturale* 2012;22:69–84. doi:10.3221/IGF-ESIS.22.08.
  14. Assadi H, Gärtner F, Stoltenhoff T, Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *J Acta Materialia* 2003;51(15):4379–94. doi:10.1016/S1359-6454(03)00274-X.
  15. Champagne VK, Helfritsch DJ, Trexler MD, Gabriel BM. The effect of cold spray impact velocity on deposit hardness. *J Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 2010;18(6). doi:10.1088/0965-0393/18/6/065011.
  16. Champagne V, Helfritsch D. The unique abilities of cold spray deposition. *J International Materials Reviews* 2016;61(7):437–55. doi:10.1080/09506608.2016.1194948.
  17. Schmidt T, Gärtner F, Assadi H, Kreye H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *J Acta Materialia* 2006;54(3):729–42. doi:10.1016/j.actamat.2005.10.005.
  18. Sharma MM, Eden TJ, Golesich BT. Effect of surface preparation on the microstructure, adhesion, and tensile properties of cold-sprayed aluminum coatings on AA2024 substrates. *Journal of Thermal Spray Technology* 2015;24:410–22. doi:10.1007/s11666-014-0175-1.
  19. Li CJ, Li WY, Wang YY. Formation of metastable phases in cold-sprayed soft metallic deposit. *J Surface and Coatings Technology* 2005;198(1-3 SPEC. ISS.):469–73. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.10.063.
  20. Legoux JG, Irissou E, Moreau C. Effect of substrate temperature on the formation mechanism of cold-sprayed aluminum, zinc and tin coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* 2007;16(5–6):619–26. doi:10.1007/s11666-007-9091-y.
  21. Li WY, Li CJ, Yang GJ. Effect of impact-induced melting on interface microstructure and bonding of cold-sprayed zinc coating. *J Applied Surface Science* 2010;257(5):1516–23. doi:10.1016/j.apsusc.2010.08.089.
  22. Xie C, Li H, Zhou X, Sun C. Corrosion behavior of cold sprayed pure zinc coating on magnesium. *J Surface and Coatings Technology* 2019;374:797–806. doi:10.1016/j.surfcoat.2019.06.068.
  23. Hussain T, McCartney DG, Shipway PH, Zhang D. Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components. Vol. 18, *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. p. 364–79. doi:10.1007/s11666-009-9298-1.
  24. Seraj RA, Abdollah-zadeh A, Dosta S, Assadi H, Cano IG. Comparison of Stellite coatings on low carbon steel produced by CGS and HVOF spraying. *J Surface and Coatings Technology* 2019;372:299–311. doi:10.1016/j.surfcoat.2019.05.022.
  25. Sudharshan Phani P, Srinivasa Rao D, Joshi S V., Sundararajan G. Effect of process parameters and heat treatments on properties of cold sprayed copper coatings. Vol. 16, *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. p. 425–34. doi:10.1007/s11666-007-9048-1.

26. Henao J, Concustell A, Cano IG, Cinca N, Dosta S, Guilemany JM. Influence of Cold Gas Spray process conditions on the microstructure of Fe-based amorphous coatings. *Journal of Alloys and Compounds* 2015;622:995–9. doi:10.1016/j.jallcom.2014.11.037.
27. Chafjiri ZS, Abdollah-zadeh A, Seraj RA, Azarniya A. Effect of cold spray processing parameters on the microstructure, wear, and corrosion behavior of Cu and Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings deposited on AZ31 alloy substrate. *J Results in Engineering* 2023;20:101594. doi:10.1016/j.rineng.2023.101594.
28. Adachi S, Ueda N. Effect of cold-spray conditions using a nitrogen propellant gas on AISI 316L stainless steel-coating microstructures. *J Coatings* 2017;7(7):87. doi:10.3390/coatings7070087.
29. Zahiri SH, Fraser D, Gulizia S, Jahedi M. Effect of processing conditions on porosity formation in cold gas dynamic spraying of copper. Vol. 15, *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006. p. 422–30. doi:10.1361/105996306X124437.
30. Chun DM, Choi JO, Lee CS, Ahn SH. Effect of stand-off distance for cold gas spraying of fine ceramic particles (< 5 μm) under low vacuum and room temperature using nano-particle deposition system (NPDS). *J Surface and Coatings Technology* 2012;206(8–9):2125–32. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.09.043.
31. Li WY, Zhang C, Guo XP, Zhang G, Liao HL, Li CJ, et al. Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying. *J Materials & design* 2008;29(2):297–304. doi:10.1016/j.matdes.2007.02.005.
32. Dai S, Cui M, Li J, Zhang M. Cold Spray Technology and Its Application in the Manufacturing of Metal Matrix Composite Materials with Carbon-Based Reinforcements. *J Coatings* 2024;14(7):822. doi:10.3390/coatings14070822.
33. Tang J, Saha GC, Richter P, Kondás J, Colella A, Matteazzi P. Effects of Post-spray Heat Treatment on Hardness and Wear Properties of Ti-WC High-Pressure Cold Spray Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* 2018;27(7):1153–64. doi:10.1007/s11666-018-0762-7.
34. Marzbanrad B, Toyserkani E, Jahed H. Characterization of single- and multilayer cold-spray coating of Zn on AZ31B. *J Surface and Coatings Technology* 2021;416:127155. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127155.