



Research Article

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

Mohammad Hadi Khanbabaee Saatloo, Amir Abdollah-Zadeh* and Rajab Ali Seraj

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

* Corresponding author, Email: zadeh@modares.ac.ir

(Received: 16 September 2024; Accepted: 4 January 2025; Available online 5 March 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: The properties of coatings deposited by cold spray depend on the parameters of the process. The aim of this research is to investigate the effect of gas pressure and stand-off distance of cold spray process of zinc on a low carbon steel substrate.

Materials and Methods: In this research, 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 using 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.

Results: The results showed that increasing the gas pressure from 20 to 30 bar decreased the porosity and increased the micro-hardness due to further deformation. Also, for a constant pressure, the stand-off distance of 20 mm has the lowest porosity and the highest micro-hardness due to the higher temperature of the particles when impact 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 by 33% compared to the substrate.

Conclusion: In this study, the effect of gas pressure and stand-off distance of cold spray process of zinc on low carbon steel substrate was investigated. The results showed that increasing the gas pressure from 20 to 30 bar and reducing the stand-off distance from 30 to 20 mm improved porosity and increased coatings micro-hardness. The results of this study can be used to optimize the parameters of the cold spraying of zinc for use in various industries such as automotive, power plants and marine infrastructure.

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

<https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1084>

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



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

محمدهادی خانبائی ساعتلو، امیر عبدالله زاده*^{ID} و رجب‌علی سراج

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

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: zadeh@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۶؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵؛ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵)

چکیده

مقدمه و اهداف: خواص پوشش‌های حاصل از پاشش سرد به متغیرهای فرایند وابسته است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر فشار گاز و فاصله پاشش در فرایند پاشش سرد فلز روی بر بستر فولاد کم‌کربن است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، 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.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار باعث کاهش تخلخل و افزایش ریزسختی ناشی از تغییرشکل 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 داد که پوشش نسبت به بستر ماهیت فداشونده دارد و چگالی جریان خوردگی را ۴۸ درصد و نرخ خوردگی را ۳۳ درصد نسبت به بستر کاهش می‌دهد.

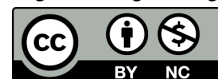
نتیجه‌گیری: در این پژوهش، تأثیر فشار گاز و فاصله پاشش در فرایند پاشش سرد فلز روی بر بستر فولاد کم‌کربن بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش فشار گاز از ۲۰ به ۳۰ بار و کاهش فاصله پاشش از ۳۰ به ۲۰ میلی‌متر باعث بهبود تخلخل و افزایش ریزسختی پوشش‌ها می‌شود. یافته‌های این تحقیق، می‌تواند در بهینه‌سازی متغیرهای فرایند پاشش سرد فلز روی برای استفاده در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، نیروگاهی و زیرساخت‌های دریایی به کار رود.

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

<https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1084>

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:



Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

۱- مقدمه

فولاد به دلیل خواص مناسب مانند سهولت در برشکاری و جوشکاری، توانایی شکل‌پذیری بسیار خوب و قیمت پایین، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلفی از جمله خودروسازی، ساختمان‌سازی، نیروگاهی و تجهیزات نفت و گاز دارد. اما، فولادها در برابر محیط‌های مرطوب و خورنده آسیب‌پذیر هستند و مقاومت به خوردگی^۱ آن‌ها پایین است. یکی از راه‌های حفاظت از تماس سطح قطعات صنعتی با محیط و جلوگیری از خوردگی، استفاده از پوشش فلز روی است. این پوشش، سطح فولاد را می‌پوشاند و به‌عنوان مانعی در برابر رسیدن مواد خورنده به بستر فولادی عمل می‌کند (۱-۳).

روی و پوشش‌های آن به‌طور گسترده در تجهیزات و سازه‌های 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 ماده‌ای با پتانسیل بالاتر جفت می‌شود، پوشش روی به‌عنوان آند فداشونده^۲ عمل می‌کند و باعث جلوگیری از خوردگی بستر می‌شود. علاوه‌براین، محصولات اکسیدی می‌تواند بر پوشش همگن روی ایجاد شود که مانع از خوردگی بیشتر زمانی که پوشش فاقد تخلخل^۳ است، شود (۳-۸).

پاشش سرد^۴ فرایندی با نرخ پوشش‌دهی 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، به‌سمت بستر شتاب می‌گیرند. با وجود پیش‌گرم کردن گاز در این فرآیند، دمای ذرات پودری هنگام برخورد به بستر کمتر از نقطه ذوب آن‌ها است، از این‌رو پاشش سرد به‌عنوان یک فرآیند حالت جامد در نظر گرفته می‌شود. دمای پایین پاشش سرد می‌تواند از اکسیداسیون ذرات پودری جلوگیری کند. سایر چالش‌های مربوط به پوشش‌های معمولی مانند تبلور مجدد، استحاله فازی، تجزیه و رشد دانه را می‌توان با فرآیند پاشش سرد از بین برد یا به حداقل رساند (۹-۱۷). معمولاً پوشش‌های 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. 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 ۲۵۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بهترین دما از لحاظ عملکرد خوردگی طولانی‌مدت 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 کم‌کربن می‌باشد.

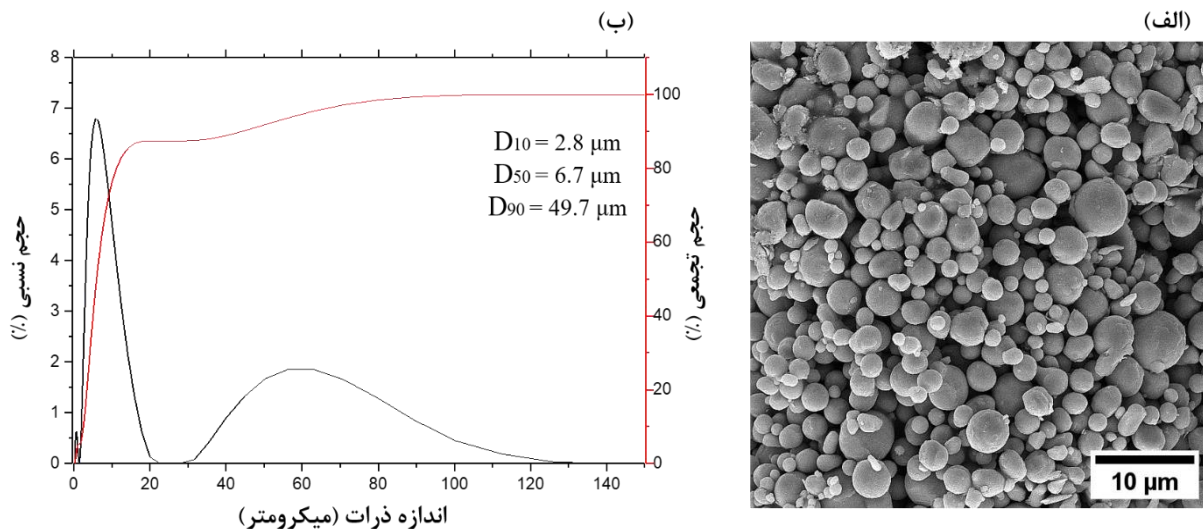
۲- مواد و روش تحقیق

۱-۲- بستر

بستر فولادی مورد استفاده در این پژوهش از نوع فولاد کم‌کربن

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

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



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

پودرها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۶ مدل TESCAN MIRA3 بررسی شد. شکل (۱-الف) تصویر میکروسکوپی 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.

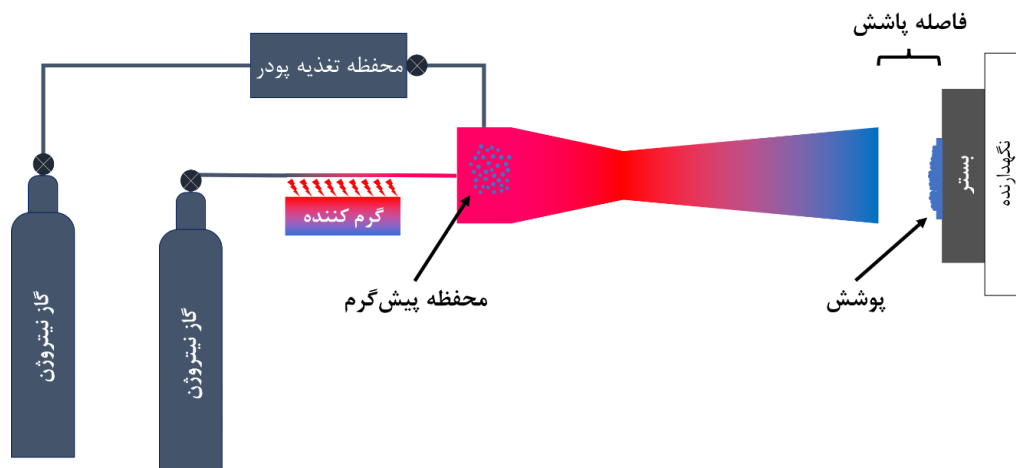
۲-۳- آزمون‌ها

دستگاه پاشش سرد مورد استفاده در پژوهش حاضر، از نوع 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.

است. ترکیب شیمیایی به‌دست آمده با طیف‌سنجی جرقه‌ای این فولاد (برحسب درصد وزنی) در جدول (۱) آمده است. به‌منظور تهیه بسترها، ورق فولادی با ضخامت سه 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 SiO₂ با اندازه ذرات ۵۰ میکرومتر با هوای فشرده ماسه‌پاشی شدند. سپس، بسترها به مدت ۳۰ ثانیه در حمام اولتراسونیک استون به‌منظور تمیزکاری سطحی قرار گرفتند.

۲-۲- پودر

پودر فلز روی تجاری با درصد خلوص ۹۹ درصد با اندازه ذرات زیر ۴۵ میکرومتر تهیه شد. از آزمون سنجش اندازه ذرات لیزری^۵ با دستگاه Mastersizer 2000، به‌منظور بررسی توزیع اندازه ذرات پودرها استفاده شد. علاوه بر این، مورفولوژی



شکل ۲- طرحواره دستگاه پاشش سرد پر فشار.

پلاریزاسیون ۵/۰ 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.

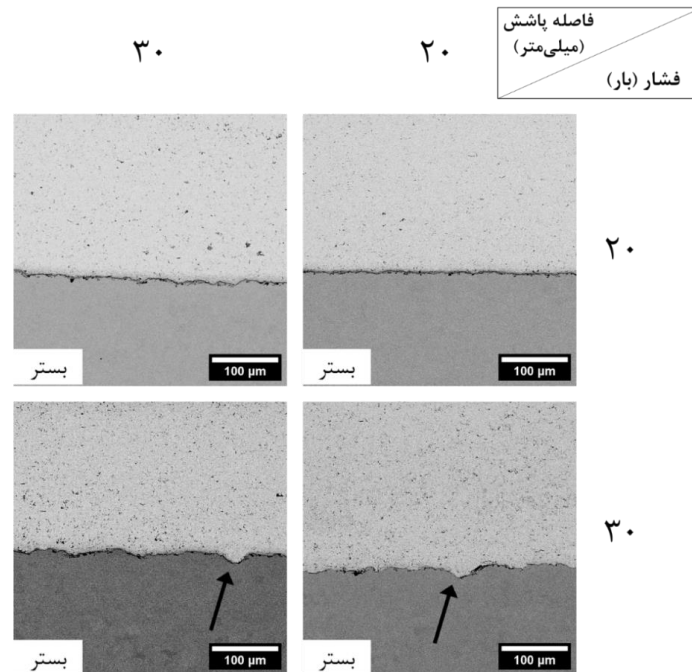
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

ریزساختار سطح مقطع پوشش های 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 فرورفتگی های بیش تری قابل مشاهده است. تمامی پوشش ها کیفیت خوبی از لحاظ تخلخل دارند و هیچ گونه ترکی در فصل مشترک پوشش و بستر مشاهده نمی شود. پستی و بلندی های قابل توجهی در فصل مشترک پوشش و بستر دیده می شود که نشان از قفل شدگی مکانیکی^۸ ذرات به بستر دارد (۲۳ و ۲۴). نمونه ها در فشار ۳۰ بار ساختار متراکم تری را نشان می دهند که می تواند به علت افزایش تغییر شکل ذرات با افزایش فشار گاز و در نتیجه کاهش تخلخل باشد.

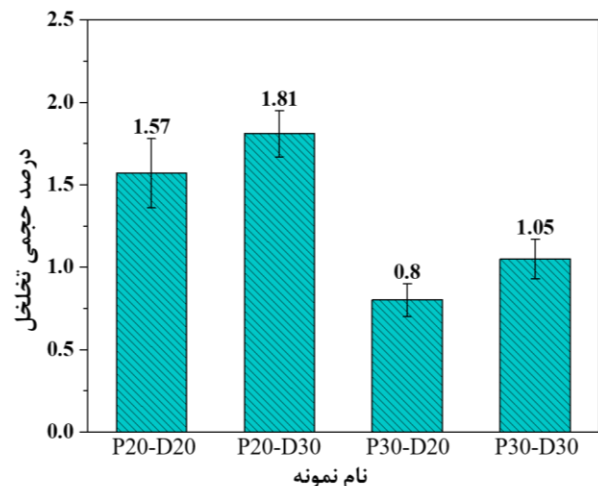
درصد حجمی تخلخل موجود در پوشش های فلز روی در

به منظور بررسی ریزساختار پوشش ها پس از انجام فرایند پاشش سرد، نمونه ها مقطع زنی و مانت شدند. سپس سنباده زنی نمونه ها تا سنباده ۳۰۰۰ انجام شد. پس از آن پرداخت کاری نمونه ها 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 پنج ثانیه استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل TESCAN MIRA3 جهت بررسی سطح مقطع پوشش ها استفاده شد. برای محاسبه میزان تخلخل موجود در پوشش، از سه تصویر میکروسکوپی نوری در نواحی مختلف یک پوشش، در مقیاس ۱۰۰ برابر استفاده شد. آزمون ریزسختی پوشش های 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 عدد ریزسختی به صورت میانگین ۱۰ نقطه گزارش شد. به منظور بررسی رفتار خوردگی بستر و پوشش آزمون خوردگی پلاریزاسیون Tafel^۷ با دستگاه پتانسیواستات biologic-VSP300 انجام شد. آزمون خوردگی در محلول ۳/۵ درصد 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



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.

افزایش تغییرشکل ذرات با افزایش فشار گاز باشد که در نتیجه باعث بهبود اتصال ذرات می‌شود (۲۵). علاوه بر این، افزایش 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، اداچی و همکاران (۲۸)، با پاشش سرد پودر فولاد زنگ‌نزن 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 درصد باعث کاهش تخلخل شود. با افزایش فاصله پاشش، سرعت ذرات افزایش و دمای آن‌ها کاهش می‌یابد (۳۰ و ۳۱). در فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر،



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).

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

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 می‌شود، دلیل احتمالی چنین سختی بالایی در پوشش آن‌ها است. مشاهده می‌شود که سختی پوشش‌ها، به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از ورق روی آنیل شده (۳۰ ویکرز) است که نشان‌دهنده اثر کرنش سختی^۹ در هنگام پاشش سرد است (۲۱). در پژوهش‌های مختلف، ریزسختی پوشش‌های روی سنجیده شده است (۳، ۴ و ۳۴). ریزسختی پوشش‌های روی پاشش سرد شده در پژوهش‌های پیشین در بازه ۵۷-۳۵ ویکرز محاسبه شده است که با نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، مطابقت دارد. مالدی و همکاران (۳)، مشاهده کردند که تغییر فاصله پاشش، اثر قابل‌توجهی 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 قابل‌توجهی از اثرات سخت‌شدن کافی است.

۳-۳- بررسی عملکرد خوردگی

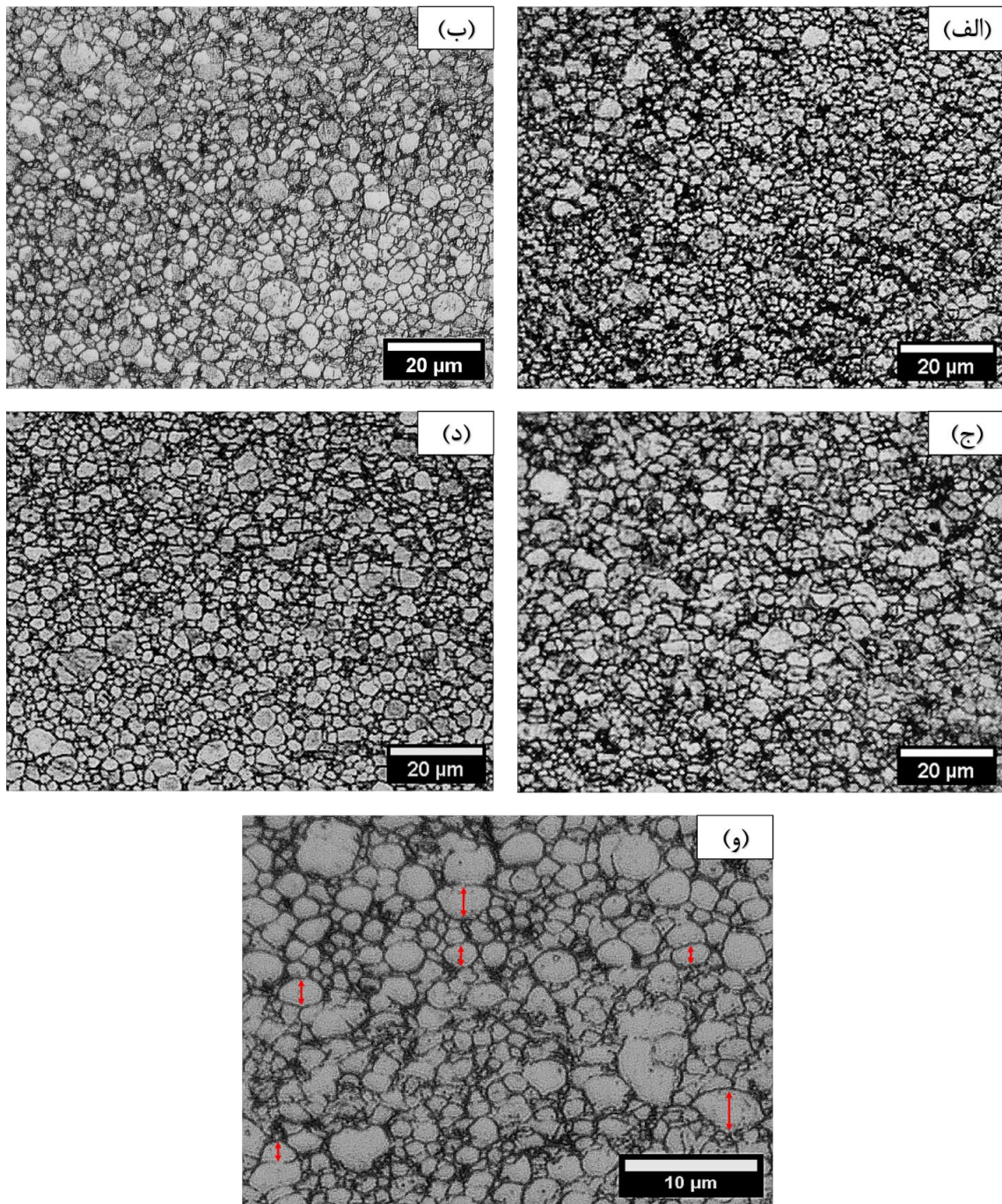
به‌طور کلی، مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های پاشش سرد عمدتاً به استحکام اتصال بین ذرات، مقدار کارسرد و تخلخل مرتبط است (۴). به همین دلیل پوشش فلز روی با فشار ۳۰ بار و فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر با کم‌ترین تخلخل و بیش‌ترین ریزسختی به‌عنوان پوشش بهینه در این پژوهش به‌منظور انجام آزمون خوردگی انتخاب شد. شکل (۷) رفتار الکتروشیمیایی بستر و پوشش را تحت آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول ۳/۵ درصد 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

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 درصد باعث کاهش تخلخل شود.

شکل (۵)، تصویر میکروسکوپی نوری حکاکی شده از سطح مقطع پوشش‌های روی را نشان می‌دهد. ریزساختار، پوشش‌های متراکم 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 پهن‌شده 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 پهن‌شدن 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

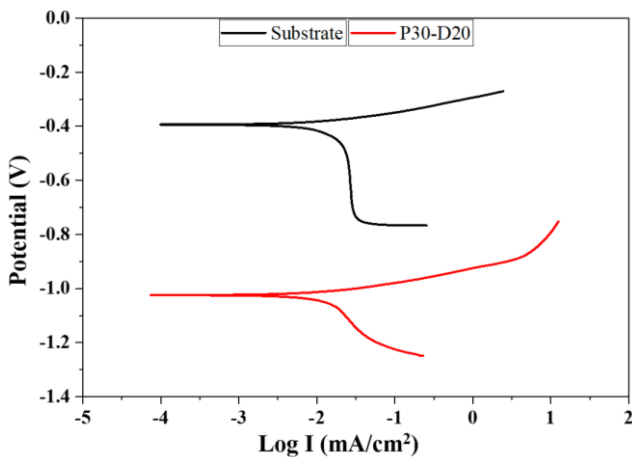


شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نوری حکاکی شده از سطح مقطع پوشش

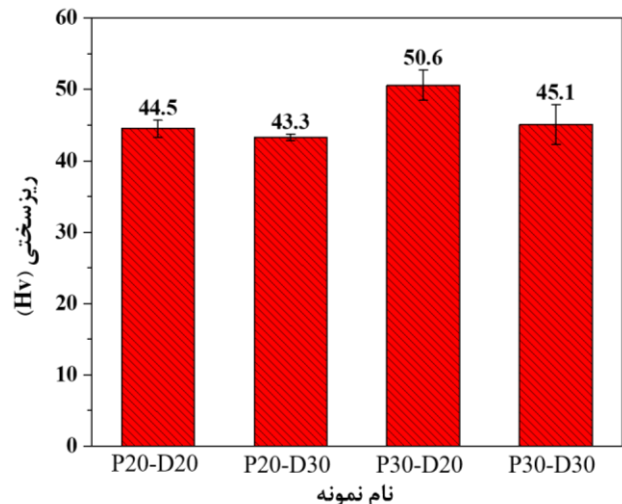
الف) P20-D20، ب) P20-D30، ج) P30-D20، د) P30-D30 و ه) سطح مقطع پوشش P30-D20 در بزرگنمایی بالاتر.

چگالی جریان خوردگی (I_{corr})، شیب شاخه آندی (β_a) و کاتدی (β_c)، مقاومت پلاریزاسیون (R_p) و نرخ خوردگی^۱ را نشان می‌دهد. نرخ خوردگی بر حسب MPY (میلی اینچ در

پتانسیل بستر است که حاکی از ماهیت فداشونده پوشش فلز روی برای بستر فولادی است. جدول (۲)، نتایج استخراج شده از آزمون پلاریزاسیون تافل، شامل پتانسیل خوردگی (E_{corr} ،



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



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).

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

Corrosion rate (Mpy)	R _p (Ω.cm ²)	β _c (mV)	β _a (mV)	I _{corr} (μA/cm ²)	E _{corr} (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

۴- نتیجه‌گیری

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

۱. سطح مقطع تمامی پوشش‌ها متراکم بودند و هیچ‌گونه ترکی مشاهده نشد. فشار ۳۰ بار، کم‌ترین درصد تخلخل و بیش‌ترین 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 میلی‌متر، از لحاظ تخلخل و ریزسختی، بهترین عملکرد را از خود نشان داد. با افزایش فاصله پاشش از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، به دلیل کاهش دمای ذرات هنگام برخورد به بستر، تخلخل پوشش افزایش و

گزارش شده است. مقادیر مقاومت پلاریزاسیون، با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شدند. جریان خوردگی پوشش ۴۸ درصد کمتر از جریان خوردگی بستر می‌باشد. علاوه‌براین، پوشش تا ۳۳ درصد نرخ خوردگی را نسبت به بستر فولادی کاهش می‌دهد. لاپوش‌کینا و همکاران (۶)، چگالی جریان خوردگی پوشش روی را $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ محاسبه کردند. همچنین، زای و همکاران (۲۲)، چگالی جریان خوردگی پوشش روی خالص را $321 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ محاسبه کردند. مقایسه چگالی جریان خوردگی پوشش روی در پژوهش حاضر ($9/38 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) با پژوهش‌های دیگر، حاکی از عملکرد خوردگی مناسب پوشش روی در این پژوهش است (۶ و ۲۲).

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

تشکر و سپاسگزاری

از مساعدت جناب آقای مهندس فیروز کارگر که زحمت انجام آزمون‌های پاشش سرد را در دانشگاه تربیت مدرس به عهده داشتند، تشکر می‌کنم.

تضاد منافع

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

سهم نویسندگان

محمد هادی خانباتائی ساعتلو: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. امیر عبداله زاده: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه، مدیریت منابع. رجب‌علی سراج: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، اعتبارسنجی نتایج، راهنمایی پروژه.

ریزسختی آن کاهش یافت.

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

۳. در این پژوهش، بهترین پوشش از لحاظ تخلخل و ریزسختی، پوشش ایجاد شده در فشار ۳۰ بار و فاصله پاشش ۲۰ میلی‌متر (تخلخل ۰/۸ درصد 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 میلی‌متر است. علاوه بر این، پوشش فلز روی، نرخ خوردگی را ۳۳ درصد و چگالی جریان خوردگی را ۴۸ درصد نسبت به بستر فولادی کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده عملکرد خوردگی مناسب پوشش نسبت به بستر است.

واژه‌نامه

1. corrosion resistance
2. sacrificial anode
3. porosity
4. cold spray
5. laser particles size analyzer (LPSA)

6. field emission scanning electron microscopy (FESEM)
7. Tafel polarization corrosion test
8. mechanical interlocking
9. strain-hardening effect
10. corrosion rate

مراجع

1. 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. <https://doi.org/10.1039/C6RA25094G>
2. Marder AR. The metallurgy of zinc-coated steel. *Prog Mater Sci.* 2000; 45(3): 191–271. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00006-1)
3. 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. *Surf Coat Technol.* 2017;318:106–13. <https://doi.org/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. *Surf Coat Technol.* 2022;438 (March): 128392. <https://doi.org/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. *Mater Chem Phys.* 2016;183: 263–72. <https://doi.org/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. *Surf Coat Technol.* 2020; 400(July): 126193. <https://doi.org/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. *Mater Tehnol.* 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. *J Therm Spray Technol.* 2013; 22(4): 463–70. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9893-z>
9. Assadi H, Kreye H, Gärtner F, Klassen T. Cold spraying – A materials perspective. *Acta Mater.* 2016;116:382–407. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>
 10. Goyal T, Walia RS, Sidhu TS. Effect of parameters on coating density for cold spray process. *Mater Manuf Process.* 2012;27(2):193–200. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.566906>
 11. Srikanth A, Basha GMT, Venkateshwarlu B. A brief review on cold spray coating process. *Mater Today Proc.* 2020; 22: 1390–7. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2017; 26:1308–55. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0575-0>
 13. Singh H, Sidhu TS, Kalsi SBS. Cold spray technology: Future of coating deposition processes. *Frat Integrita Strutt.* 2012;22:69–84. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.22.08>
 14. Assadi H, Gärtner F, Stoltenhoff T, Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Mater.* 2003;51 (15):4379–94. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/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. *Model Simul Mater Sci Eng.* 2010; 18(6). <http://dx.doi.org/10.1088/0965-0393/18/6/065011>
 16. Champagne V, Helfritsch D. The unique abilities of cold spray deposition. *Int Mater Rev.* 2016;61(7): 437–55. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1194948>
 17. Schmidt T, Gärtner F, Assadi H, Kreye H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Mater.* 2006;54(3):729–42. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2015;24:410–22. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01585-3>
 19. Li CJ, Li WY, Wang YY. Formation of metastable phases in cold-sprayed soft metallic deposit. *Surf Coat Technol.* 2005;198(1-3):469–73. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2007;16(5–6):619–26. <https://doi.org/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. *Appl Surf Sci.* 2010;257(5): 1516–23. <https://doi.org/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. *Surf Coat Technol.* 2019;374:797–806. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2009;18:364–79. <https://doi.org/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. *Surf Coat Technol.* 2019;372:299–311. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2007;16:425–34. <https://doi.org/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. *J Alloys Compd.* 2015;622: 995–9. <https://doi.org/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–Al₂O₃ coatings deposited on AZ31 alloy substrate. *Results Eng.* 2023;20:101594. <https://doi.org/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. *Coatings* 2017; 7(7): 87. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2006;15:422–30. <https://doi.org/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). *Surf Coat Technol.* 2012;206(8–9): 2125–32. <https://doi.org/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. *Mater Des.* 2008;29(2): 297–304. <https://doi.org/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. *Coatings* 2024;14(7):822. <https://doi.org/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. *J Therm Spray Technol.* 2018;27(7):1153–64. <https://doi.org/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. *Surf Coat Technol.* 2021;416: 127155. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127155>