

دانشجویان : زهرا دوبران و نرگس رضائی عزیزی

استاد راهنما: دکتر روح الله مهدی نواز اقدم

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد ، دانشکدگان فنی ، دانشگاه تهران



مقدمه

فولادهای ضدزنگ سری ۳۰۰، به‌ویژه نوع ۳۱۶، به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، زیست‌سازگاری و پایداری حرارتی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع پزشکی، غذایی، پتروشیمی و دریایی دارند. با این حال، سختی سطحی پایین و مقاومت ناکافی در برابر سایش و اصطکاک، عملکرد این آلیاژ را در شرایط کاری سخت محدود می‌کند. پوشش‌های کربن شبه‌الماسی (DLC) به دلیل سختی بالا، ضریب اصطکاک پایین و مقاومت مناسب در برابر خوردگی و سایش، گزینه‌ای مؤثر برای بهبود خواص سطحی فلزات محسوب می‌شوند، اما چسبندگی ضعیف آنها به زیرلایه‌های فلزی، به‌ویژه استیل ۳۱۶، محدودیت ایجاد می‌کند. استفاده از لایه میانی تیتانیوم می‌تواند چسبندگی پوشش DLC را بهبود بخشد و مانع جداشدگی زود هنگام آن شود. در این پژوهش، پوشش DLC به روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار به تکنیک arc-PVD بر روی استیل ۳۱۶ اعمال و نقش لایه میانی Ti در بهبود خواص سطحی از جمله سختی، مقاومت به خوردگی، چسبندگی و زیست‌سازگاری بررسی شده است، با هدف ارائه روشی بهینه برای افزایش دوام و کارایی این آلیاژ در کاربردهای حساس صنعتی.

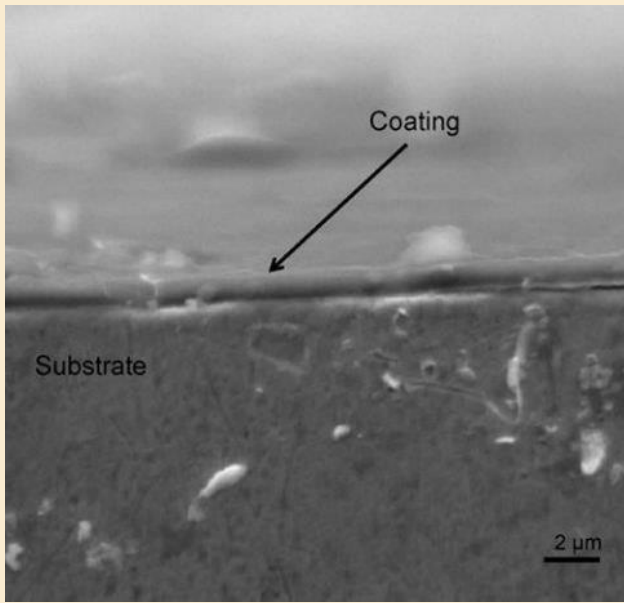
چکیده

در این پژوهش به منظور بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به خستگی فولاد ضدزنگ ۳۱۶، از پوشش کربن شبه‌الماسی (DLC) به روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار (Arc-PVD) استفاده شد. برای افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، یک لایه میانی از تیتانیوم پیش از رسوب‌دهی اصلی اعمال گردید. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که پوشش دارای ساختار یکنواخت و متراکم بوده و مرز پوشش با زیرلایه فاقد ترک و تخلخل است. در مجموع، نتایج نشان داد که پوشش IDLC ایجاد شده به روش Arc-PVD با لایه میانی تیتانیوم، راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی و مقاومت به خوردگی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ محسوب می‌شود.

نتایج و بحث

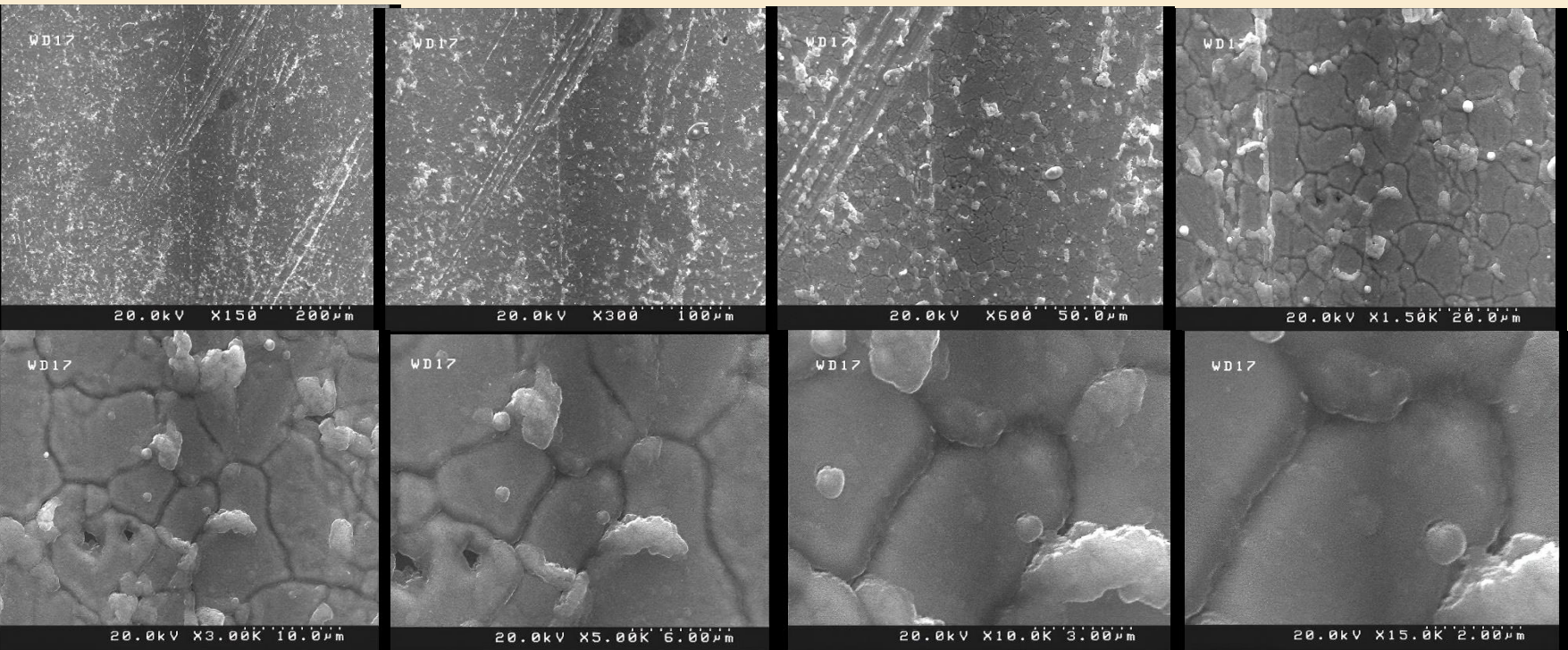
تست SEM

پوشش دارای ساختار یکنواخت و متراکم است. در سطح پوشش، ذرات به صورت خوشه‌های همگن دیده می‌شوند که موجب افزایش پیوستگی و چسبندگی پوشش به زیرلایه شده‌اند. همچنین در تصاویر، عیوبی مانند ترک‌های مویرگی و قطرات قوسی پراکنده مشاهده شد که با وجود لایه میانی تیتانیوم، از گسترش ترک‌ها جلوگیری شده و یکپارچگی پوشش حفظ گردیده است.

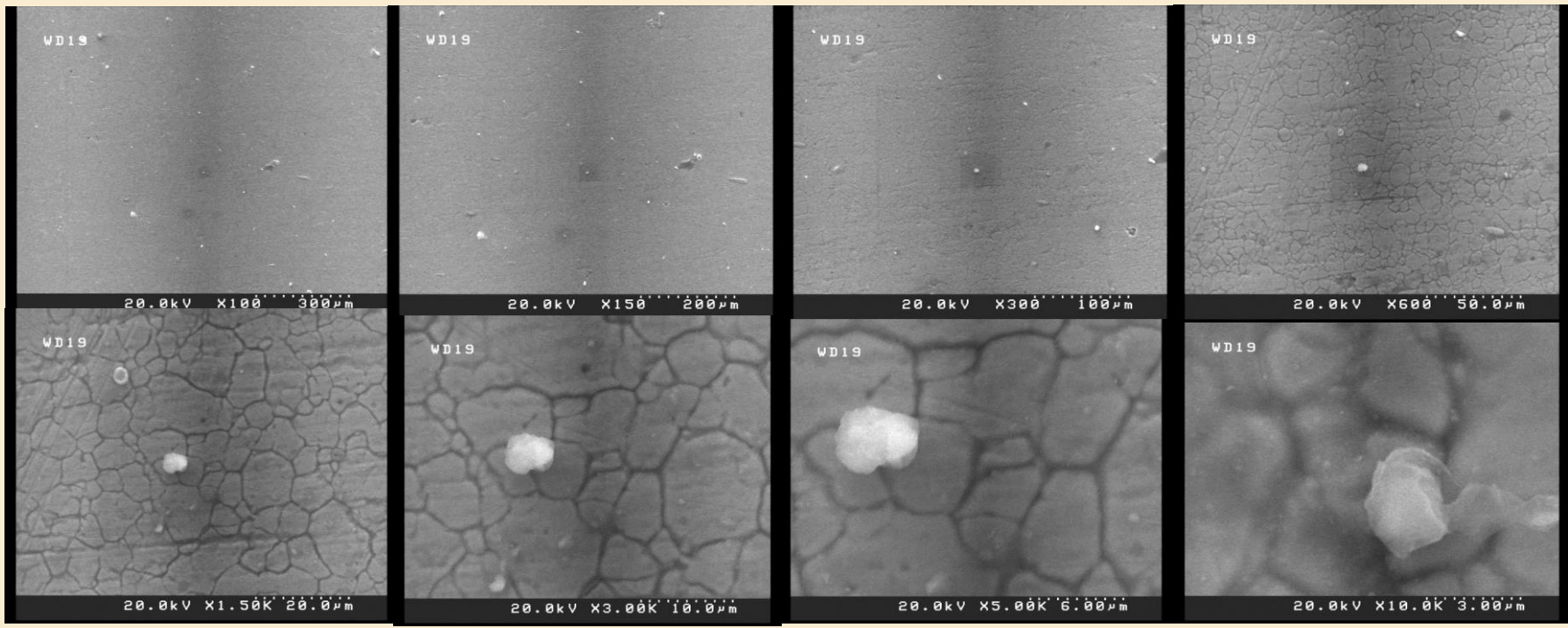


شکل ۵- نمای مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده

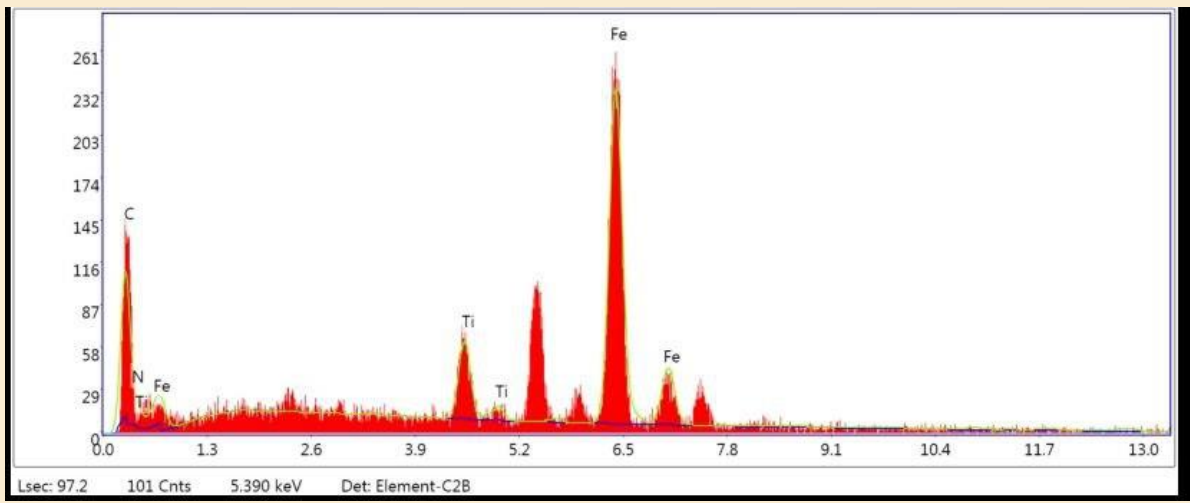
تست EDS



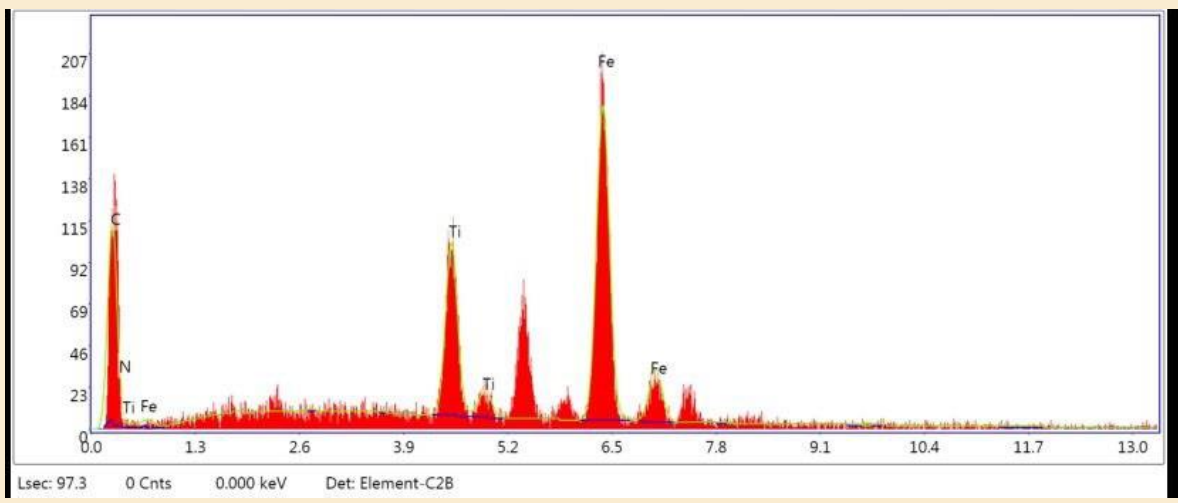
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح فولاد ضدزنگ ۳۱۶ پس از پوشش دهی نمونه ۱



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح فولاد ضدزنگ ۳۱۶ پس از پوشش دهی نمونه ۲



شکل ۷- طیف EDS از نواحی انتخابی سطح پوشش DLC نمونه ۲

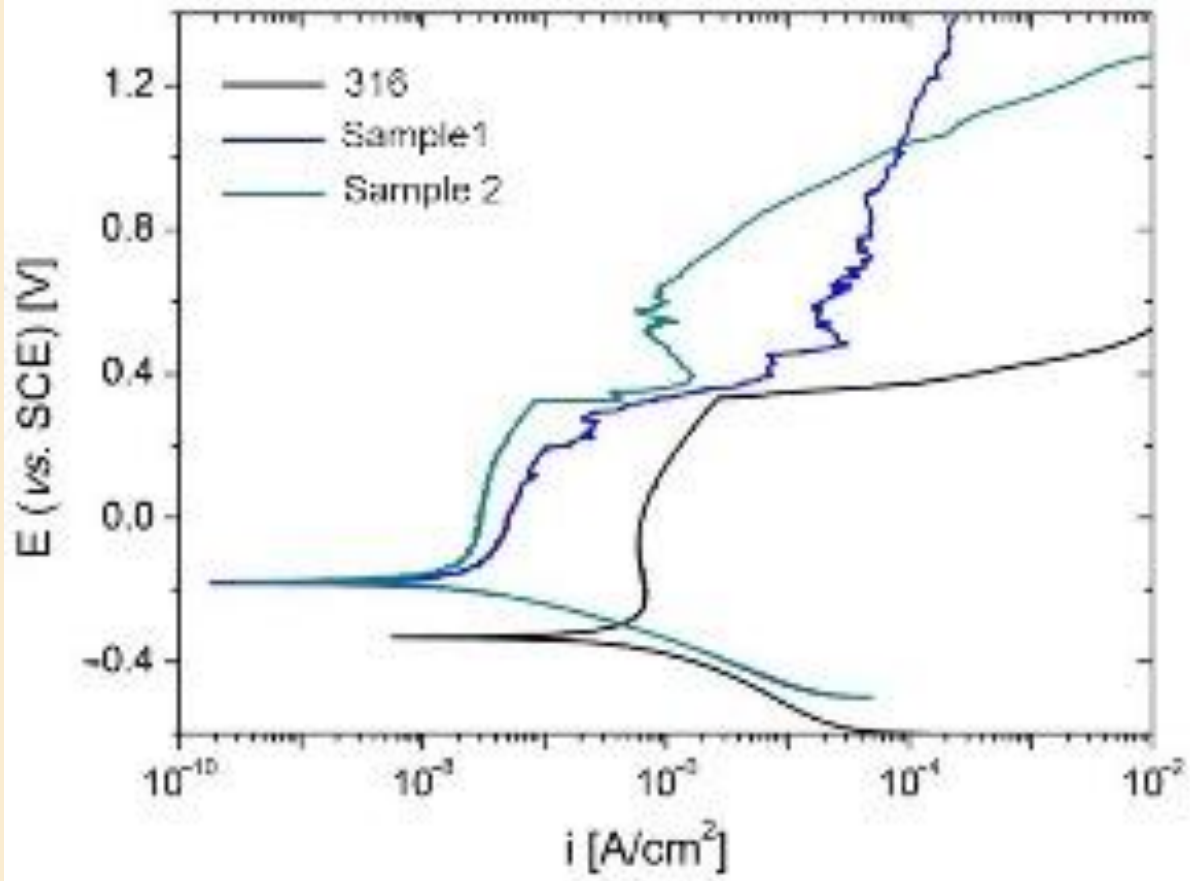


شکل ۶- طیف EDS از نواحی انتخابی سطح پوشش DLC نمونه ۱

تحلیل EDS تایید کرد که پوشش DLC به احتمال زیاد موفقیت‌آمیز روی زیرلایه فلزی ایجاد شده است، به طوری که درصد وزنی کربن بالاست و عناصر آهن و تیتانیوم نیز در عمق پوشش دیده می‌شوند که به ضخامت محدود پوشش و نفوذ پرتو الکترونی مربوط است.

تست خوردگی

آزمایش‌های الکتروشیمیایی نشان دادند که نمونه‌های پوشش‌دار با DLC نسبت به نمونه بدون پوشش، دارای پتانسیل خوردگی مثبت‌تر و جریان خوردگی پایین‌تر بوده و در نتیجه مقاومت به خوردگی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، همچنین ضخامت و درصد کربن بیشتر پوشش موجب بهبود پایداری و مقاومت شده است.



شکل ۸- نمودار پلاریزاسیون تاغل برای فولاد ضدزنگ ۳۱۶. نمودار سیاه مربوط به نمونه بدون پوشش، نمودار آبی نشان‌دهنده نمونه ۱ (با پوشش DLC با درصد کربن کمتر) و نمودار سبز بیانگر مونه ۲ (با پوشش DLC با درصد کربن بیشتر)

بدینوسیله مراتب قدردانی و تشکر صمیمانه خود را از همکاری و حمایت شرکت نانوسیلیکون آتین در انجام این پروژه اعلام می‌داریم.

روش تحقیق

نمونه‌هایی از فولاد ضدزنگ ۳۱۶ به صورت ورق به عنوان زیرلایه تهیه شده و سپس پرداخت سطحی شدند. فرایند پوشش دهی در دستگاه با استفاده از روش قوس کاتدی (Arc_PVD) انجام گرفت. پیش از اعمال پوشش، سطح نمونه‌ها با استفاده از پلاسمای یونی در زمان ۵ دقیقه تمیز شد. سپس یک لایه میانی تیتانیوم به روش قوس کاتدی و با گاز آرگون به عنوان گاز کاری در مدت زمان ۳ دقیقه اعمال گردید.

پس از آن، لایه اصلی DLC بر سطح نمونه‌ها رسوب داده شد. این مرحله با استفاده از تارگت گرافیت جامد با در صد خلوص بالا، منبع پالس DC، ولتاژ بایاس ۱۳۰ ولت و حدود ۲۰-۳۰ آمپر در مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام شد. دمای زیرلایه در طول فرایند کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی گراد نگه داشته شد تا از بروز تغییرات ساختاری ناخواسته در زیرلایه جلوگیری گردد. برای ارزیابی ساختار پوشش و خواص آن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آزمون خوردگی و آنالیز انرژی پراکنده (EDS) استفاده شد.



شکل ۱- تصاویر ۱ و ۲ نمونه‌های پوشش داده شده و تصویر ۳ نمونه بدون پوشش

شکل ۲- نحوه ی قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه Arc-PVD

نتیجه گیری

باتوجه به درصد عناصر موجود در سطح و مقایسه خواص ورق فولاد ضدزنگ ۳۱۶ بدون پوشش با ورق پوشش داده شده این نتیجه حاصل میشود که پوشش DLC به درستی اعمال شده و خواص سطحی زیرلایه را به‌طور چشمگیری بهبود داده است .

حضور لایه میانی تیتانیوم نقش کلیدی در افزایش چسبندگی پوشش و کاهش تنش‌های داخلی داشت، به‌طوری که از جداشدگی و ایجاد ترک‌های مرزی جلوگیری شده و پوششی تقریباً یکنواخت و متراکم ایجاد شد. آزمون سختی نشان داد که نمونه‌های پوشش‌دار دارای سختی سطحی بالاتری نسبت به زیرلایه بدون پوشش هستند. این افزایش سختی ناشی از ساختار متراکم DLC و ترکیب پیوندهای کربن sp^3 و sp^2 است؛ پیوندهای sp^3 باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی می‌شوند، در حالی که پیوندهای sp^2 به یکنواختی و چسبندگی پوشش کمک می‌کنند. همچنین، آزمون خوردگی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محیط کلرید سدیم نشان داد که پوشش‌های DLC، به‌ویژه در حضور لایه Ti، مقاومت به خوردگی فولاد ۳۱۶ را به‌طور چشمگیری ارتقا داده‌اند؛ زیرا لایه DLC به عنوان مانعی برای نفوذ یون‌های کلرید عمل می‌کند و از شروع و انتشار خوردگی جلوگیری می‌کند.

[1] M. Takikawa et al., “Corrosion resistance of DLC film-coated SUS316 steel,” Surface and Interface Analysis, vol. 42, no. 6-7, pp. 612–616, 2020.
[2] F. Ma et al., “Diamond-like carbon coatings for enhanced long-term corrosion resistance of 316 stainless steel in marine environment: Ti/DLC, TiCx/DLC and Ti–TiCx/DLC systems,” Coatings, vol. 13, no. 2, p. 227, 2023.

[3] K. Lee and S. Lee, “Improving corrosion resistance and biocompatibility of 316 stainless steel by incorporating titanium interlayers into DLC films,” Applied Surface Science, vol. 580, p. 152370, 2022.
[4] W. Xu et al., “Titanium-based interlayer incorporated DLC films deposited on 316 stainless steel using filtered cathodic vacuum arc,” Vacuum, vol. 193, p. 110504, 2021.