# بررسی رفتار خوردگی روکشهای فولاد ۴PH-۱۷-و استلایت ۶ ایجادشده با فرایند رسوبنشانی مستقیم لیزری روی زیرلایه فولاد ۴PH-۱۷

محمد رضا برهانی\*'، سیدرضا شجاع رضوی'، فرید کرمانی'، محمد عرفان منش"، سید مسعود برکت" 'کارشناسی ارشد، 'استاد، "استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت \* نویسنده مسئول: moh\_borhani@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۶/۱۸۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

## چکیدہ

با توجه به نوع کارایی فولاد PPH–۱۷ در توربین گازی و در تماس ذرات خارجی مانند گردوخاک و اشیا خارجی، رسوب اجرامی نظیر بخارهای روغن حین کار دچار تر کخوردگی، سایش و خوردگی شیمیایی می شوند و از چرخه استفاده خارج می شوند. جایگزینی قطعه به دلیل هزینه بالای مواد مقرون به صرفه نیست. در این پژوهش مقاومت به خوردگی روکش فولاد PPH–۱۷ و استلایت ۶ روی زیرلایه فولاد PPH–۱۷ توسط آزمون پلاریز اسیون تافل بررسی شد؛ در منحنی پلاریز اسیون سیکلی برای فولاد PH+۱۷-۴۱، چگالی جریان روبش مستقیم کمتر از روبش معکوس است و هیسترزیس مثبت در منحنی پلاریز اسیون سیکلی دیده می شود، همچنین لایه پسیو تشکیل شده جزئی، ناپایدار و شکننده است. در پوشش PPH–۱۷ چگالی جریان روبش مستقیم کمتر از روبش معکوس است و هیسترزیس مثبت در منحنی پلاریز اسیون مشاهده می شود، همچنین لایه پسیو تشکیل شده مقاوم در برابر تشکیل حفرات جدید است. در پوشش استلایت۶ مطابق شکل این پوشش از مقاومت به خوردگی حفرهای بالایی نیز در این محلول برخوردار است؛ منحنی هیسترزیس منفی تشکیل داده و منحنی معکوس آن در چگالی جریان های بالایی نیز در این محلول برخوردار است؛ منحنی هیسترزیس منفی تشکیل داده و منحنی معکوس آن در چگالی جریان های بیو تشکیل شدور پوشش های معلول است و هیسترزیس منبت در منحنی پلاریز اسیون مشاهده می شود، همچنین لایه پسیو تشکیل شده مقاوم در برابر پرخوردار است؛ منحنی هیسترزیس منفی تشکیل داده و منحنی معکوس آن در چگالی جریان های کمتری نسبت به منحنی مستقیم پوش های استلایت ۶ و فولاد زنگنزن در مقایسه با زیرلایه ۹۱ و ۵۰ درصد کاهش یافته است.

**کلیدواژه:** فولاد ۴PH–۱۷، استلایت ۶، مقاومت خوردگی، پلاریزاسیون تافل، رسوبنشانی مستقیم لیزری.

# Investigating the Corrosion Behavior of 17-4PH and Stellite 6 Steel Claddings Created by Direct Laser Deposition Process on 17-4PH Steel Substrate

# M. Borhani<sup>1\*</sup>, R. Shoja Razavi<sup>2</sup>, F. Kermani<sup>1</sup>, M. Erfanmanesh<sup>3</sup>, M. Barekat<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ms.c, <sup>2</sup> professor, <sup>3</sup> assistant professor, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology

\* Corresponding Author: moh\_borhani@mut.ac.ir

Submission: 2022, 12, 17 Acceptance: 2023, 05, 09

#### Abstract

Due to the efficiency of 17-4PH steel in gas turbines and contact with external particles such as dust and foreign objects, physical deposits such as oil vapors will undergo cracks, wear, and chemical corrosion during operation and will be removed from the cycle of use. Part replacement is not cost-effective due to the high cost of raw materials. In this research, the corrosion resistance of 17-4PH steel cladding and stellite6 on 17-4PH steel substrate was investigated by the Tafel polarization test; In the cyclic polarization curve for 17-4PH steel, the direct scan current density is lower than the reverse scan, and positive hysteresis is seen in the cyclic polarization curve. Also the partially formed passive layer is unstable and fragile. In the 17-4PH cladding, the direct scan current density is lower than the reverse scan, and positive hysteresis is observed in the polarization curve. Also the formed passive layer is resistant to the formation of new holes. In the cover of stellite6, according to the shape of this cover, it has high pitting corrosion resistance in this solution; It forms a negative hysteresis curve and its inverse curve is located in a lower current density than the straight curve; Therefore, the corroded areas can repair themselves by forming a passive layer. By examining the results, it was found that the corrosion rate of stellite6 and stainless steel claddings has decreased by 91% and 50% compared to the substrate.

Keywords: Steel 17-4PH, Stellite 6, Corrosion resistance, Toefl polarization, Direct laser deposition.

## ۱\_ مقدمه

فولاد زنگنزن AISI 630) مزء فولادهای زنگنزن رسوب سختشونده از نوع مارتنزیتی است و دارای ترکیبی از استحکام بالا و مقاومت به خوردگی مناسب است [۳-۱]. از طرف دیگر گرانتر بودن ساخت این فولاد نسبت به سایر فولادهای زنگنزن باعث شده است تا در صورت معیوب شدن قطعه، هزینه تعمیر آن مقرون به صرفه تر از جایگزینی باشد. استلایت ۶ یک آلیاژ پایه کبالت مقاوم به سایش و خوردگی است و در ترکیب شیمیایی اسمی آن عناصر کروم تنگستن، کربن و مقادیری از عناصر نیکل، آهن و سیلیسیم وجود دارد. مقاومت خوردگی استلایت ۶ را با تشکیل فاز اکسید کروم افزایش داده و از سوی دیگر سهم قابل توجهی در استحکام بخشی این آلیاژ با تشکیل کاربید کروم ایفا می کند استحکام بخشی این آلیاژ با تشکیل کاربید کروم ایفا می کند

ساخت افزایشی فرآیند ساخت قطعات از دادههای مدل سهبعدی است. در این روش معمولاً قطعات به صورت لایه به لایه به روش تفریق کننده ساخته می شوند. تعداد زیادی از تجهیزات متنوع ساخت افزایشی به صورت تجاری در دسترس هستند و تعداد آنها روزبهروز در حال افزایش است [۶]. یکی از روش های اصلی در ساخت و روکش کاری قطعات فلزی روش رسوبنشانی مستقیم لیزری '(DMD) است؛ در این روش پودر فلزی همزمان با تابش اشعه لیزر تزریق می شود و ساخت قطعه صورت می گیرد [۷].

شو<sup>۲</sup>و همکاران [۸] محتوای بالایی از فاز آمورف را در لایه روکش آلیاژ آنتروپی بالا COCrNiSiBFe بر روی یک بستر فولادی کمکربن را گزارش کردند؛ در این پژوهش عملکرد عالی لایه در برابر خوردگی و مقاومت سایشی عالی در دمای بالا به وجود CO در پوشش نسبت دادهشده است. همچنین در پژوهشی ژائو و همکاران [۹] خواص ریزساختاری

و مکانیکی پوشش های آلیاژی مبتنی بر Co تهیه شده از طریق روکش لیزری و جوش قوس پلاسما را مقایسه کردند. مشخص شد عملکرد لایه روکش بهتر از پوشش جوش قوس پلاسما است و عمدتاً از یک فاز آمورف و یک محلول جامد با مقاومت در برابر سایش در دمای بالا تشکیل شده است.

نی <sup>۶</sup>و همکاران [۱۰] در پژوهشی به بررسی خواص خوردگی روکش فولاد زنگ نون ۴PH-۱۷ روی زیر لایسه E355DD توسط روکش لیزری پرداختند. در این پژوهش تأثیر توان لیزر بر ریزساختار، ویژگیهای بافت و مقاومت به خوردگی نمونه به طور کامل بررسی شد. با استفاده از توان لیزر نرد گی نمونه به طور کامل بررسی شد. با استفاده از توان لیزر متابع وات (چگالی جریان 2*m*/*A*<sup>70</sup> 80.2) مقاومت به خوردگی بهتر و با عیوب کمتر حاصل شد. در این پژوهش با افزایش توان لیزر، شدت بافت نمونه ها به ترتیب متوسط دانه ها به تدریج با افزایش قدرت لیزر از ۲۵۹۹ به ۲۸۱ میکرومتر افزایش یافت، نمونه ساخته شده با توان ۲۲۰۰ وات، ناحیه پسیو واضح تر و پایدارتری دارد.

ربانی خواه و همکاران [۱۱] مقاومت به خوردگی پوشش لیزری استلایت را با زیرلایه فولادی آن مقایسه کردند. در این پژوهش مقدار پتانسیل خوردگی (Ecorr) برای نمونه باروکش استلایت در مقایسه با زیرلایه به جهت مثبت حرکت کرده است. همچنین مقدار جریان خوردگی (Icor) و درنتیجه نرخ خوردگی در حالت روکش لیزری شده بسیار کمتر از زیرلایه بدون روکش است. همانگونه که در نمودار تافل مواد رویین همواره یک مرحله عمودی مشاهده می شود، در نتایج آزمون خوردگی برای نمونه پوشش شده نیز، حضور یک مرحله نزدیک به عمود نقونه پوشش دار ممکن است به علت قابلیت ایجاد فیلم رویین نمونه پوشش دار ممکن است به علت قابلیت ایجاد فیلم رویین اکسید کروم باشد. ربیکا<sup>ه</sup> و همکاران [۱۲] در پژوهشی رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن ۴PH-۱۷ ساخت افزایشی شده را

<sup>1 -</sup> Direct metal Deposition

<sup>2 -</sup> Shu

<sup>3 -</sup> Zhao 4 - M.H. Nie

<sup>5 -</sup> Rebecca F. Schaller

تحت غوطهوری کامل در محلول NaCl و آب مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که حضور منافذ روی سطح نمونه به طور مستقیم بر نوع خوردگی تأثیر می گذارد و خوردگی فعال منافذ بزرگ تر از ۵۰ میکرومتر وجود دارد. بار تکوسکی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] مقاومت به خوردگی پوشش استلایت ۶ را با اضافه نمودن مقادیری از کاربید تنگستن در محلول ۵ درصد نمک طعام بررسی کردند. در این پژوهش جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی اندازه گیری شد؛ کمترین جریان خوردگی مربوط به پوشش استلایت ۶ بدون ماده افزودنی برابر با ۲۰۰ mA/cm<sup>2</sup> بوده و بیانگر مقاومت به خوردگی بالای پوشش اود. در اثر اضافه کردن کاربید تنگستن مقاومت به خوردگی کاهش یافته و بیشترین جریان خوردگی مربوط به پوشش استلایت ۶ به همراه ۶۰ درصد کاربید تنگستن بوده و مقدار آن برابر با

کوستل ۲و همکاران [۱۴] به بررسی مقاومت به خوردگی پوشش استلایت ۶ پرداختند؛ نتایج نشان داد لایه محافظ استلایت۶ بهبود قابل توجهی در مقاومت در برابر فرسایش کاویتاسیون و خوردگی در مقایسه با لایه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی را تضمین می کند. استلایت۶ مقاومت بسیار بالاتری نسبت به فولاد زنگنزن را در برابر فرسایش کاویتاسیون در حین آزمایش توسط روش اولتراسونیک مستقیم از خود نشان داد، مقاومت به خوردگی، اگر چه بهتر از زیرلایه مارتنزیتی است، اما باید به دلیل حمله حفرهزایی نامطلوب بررسی بیشتری شود. چن ۳و همکاران [۱۵] در پژوهشی به بررسی خوردگی روکش استلایت ۶ روی زیرلایه Mo40 ایجادشده توسط روش

جریان خوردگی پوشش استلایت ۶ بسیار کمتر از فولاد Mo40 است و برابر با mA/cm2 ۵–۱۰× ۵/۱۵ است. میزان بالای عنصر کروم در پوشش استلایت ۶، باعث ایجاد اثر محافظتی در روکش می شود. همچنین نتایج حاکی از ایجاد لایه پسیو روکش می شود. همچنین نتایج حاکی از ایجاد لایه پسیو اوکش می شود. محیح استلایت ۶ است؛ ایجاد فیلم پسیو باعث افزایش مقاومت قابل توجه در برابر خوردگی در محیط کلر شده است. ایجاد دانهبندی ریز شرایط عالی جهت رشد فیلم روئین را فراهم ساخته است.

لیو۴و همکاران [۱۶] به بررسی خواص خوردگی با مکانیزم خوردگی در آلومینیوم مذاب در دمای بالا با پوشش آلیاژی استلایت۶ مبتنی بر ایجاد پوشش توسط روکش لیزری روی زیر فولاد H13 پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش عمدتاً از دندریت Co و ذرات M23C6 تشکیل شدهاست. میانگین سختی در لایه روکش برابر با ۷۳۲ ویکرز است که۳/۵۵ برابر بیشتر از فولاد H13 است. نتایج ثابت کرد پس از ۲۴ ساعت خوردگی استاتیکی، پوشش آلیاژی مبتنی بر Co همچنان می تواند یکیارچگی خود را برای محافظت از بستر حفظ کند. در این مطالعه، یک پوشش آلیاژی بدون ترک، همگن و متراکم استلایت ۶ با اتصال متالورژیکی خوب به یک بستر فولادی H13 با موفقیت از طریق فرآیند روکش لیزری با پارامترهای بهینه تهیه شد. منحنی جنبشی خوردگی نشان داد ضخامت IMC ها بهصورت تصاعدی افزایش یافته است که نشان میدهد با افزایش زمان غوطهوری، سرعت خوردگی بەتدرىج كاھش مىيابد.

هدف پژوهش حاضر بررسی روکش کاری لیزری پودرهای استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۴PH–۱۷ روی زیرلایه فولاد زنگنزن ۴PH–۱۷ بهمنظور بررسی مقاومت به خوردگی بهصورت پلاریزاسیون سیکلی نمونهها در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام با رویکرد بازسازی فولاد زنگنزن ۴PH–۱۷ است.

3 - Chen cui

<sup>1 -</sup> Bartkowski

<sup>2 -</sup> Costel-Relu Ciubotariu

<sup>4 -</sup> Liu

۲ ـ مواد و روش تحقيق

در این پژوهش از فولاد زنگنزن ۴PH–۱۷ به عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد با استفاده از آنالیز طیفسنجی جرقهای مشخص و در جدول ۱ بیان شده است. از استوانه فولاد با قطر ۵ سانتی متر و ضخامت ۶ میلی متر در شرایط انحلالی برای فرایند روکش کاری لیزری استفاده شد. قبل از فرایند روکش کاری لیزری سطح زیرلایه تا سنباده ۸۰۰ تحت عملیات سنباده زنی قرار گرفت و هیچ گونه عملیات زبرسازی

سطح (مانند ماسه پاشی) روی آنها انجام نشد. در این پژوهش، از پودرهای تجاری استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۲۹۲–۱۷ ساخته شده به روش اتمیزاسیون گازی با متوسط اندازه دانه ۶۰ تا ۱۴۰ میکرون مطابق شکل ۱ استفاده شد ترکیب شیمیایی این پودرها با توجه به آنالیز طیفسنجی پراش انرژی صورت گرفته در جدول ۲ آورده شده است. لازم بهذکر است پوشش استلایت۶ و فولاد ۲۹۲–۱۷ به صورت جداگانه پوشش دهی شدهاند و در نهایت نتایج مشخص شده است.

(wt)) فولاد زنگنزن ۴PH–۱۷	۔ ترکیب شیمیایی (	جدول ۱.
---------------------------	-------------------	---------

C	Мо	Nb	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Fe	آلياژ
<•/1	• / ٢	• /٣٧	• /۵۳	•/99	۲/۹	4/9	۱۵/۸	Bal.	فولاد 17-4PH

С	Mn	Nb	Si	W	Мо	Cu	Ni	Cr	Co	Fe	پودر آلياژ
١	-	-	١/۵	۴	١	-	٣	۲۸	Bal.	٣	استلايت ۶
<•/•Y	•/•٨٢	• /۳۵	<•/۵	-	-	۳/۹۸	4/00	17/08	-	Bal.	فولاد 17-4PH

جدول ۲ ـ ترکیب شیمیایی (wt%) پودر استلایت ۶ مورداستفاده در این پژوهش

1- Spark Emission Spectroscopy

2 - Energy Dispersive Spectroscopy



شکل ۱ ـ الف ـ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر استلایت ۶، ب ـ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر فولاد زنگ نزن ۴PH-۱۷-

سطح، نمونهها با آب مقطر شسته شدند. سپس برای چربی زدایی و پاک کردن آلودگیها با استفاده از استون تمیز شدند. برای ارزیابی رفتار مقاومت به خوردگی یکنواخت و حفرهای پوشش های لیزری و زیرلایه از محلول ۳٫۵ درصد وزنی NaCl استفاده شد [۱۳]. آزمونهای خوردگی پلاریزاسیون تافل و سیکلی با دستگاه پتانسیواستات/ گالوانواستات EG&G مدل A273 انجام گرفت. آزمون در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد، با محدوده پتانسیل 2v± و محدوده اندازه گیری جریان 20mA± انجام شد؛ نحوه انجام کار به این صورت بود که الکترود نمونه، الکترود مرجع و الکترود کمکی در سل استاندارد که جهت کاهش خطاهای مربوط به آزمون طراحی شده است، قرارگرفتند و پس از اطمینان پیدا کردن از سیستم آببندی و گذراندن زمان تعادل، آزمون انجام گرفت. نوع الکترود مرجع مورداستفاده در این پژوهش الکترود کالومل استاندارد SCE<sup>۳</sup> است. همچنین تجزیه و تحلیل اطلاعات به کمک نرمافزار PowerSuite انجام گرفت.

جهت ساخت نمونهها در این تحقیق از روش رسوبنشانی مستقيم ليزرى استفادهشد. روكش كارى ليزرى بهصورت تکمرحلهای و پاشش هممحور داخل پرتو لیزر انجام شد. روکش کاری لیزری فولاد ۴PH–۱۷ روی زیرلایه با استفاده از توان ۱۰۰ وات، نرخ پاشش پودر ۱۸۰ میلی گرم بر ثانیه و سرعت روبش ۲ میلیمتر بر ثانیه با همپوشانی عرضی ۳۰ درصد انجام شد [١٧]؛ ارتفاع روکش بهدست آمده ۱۹۰ میکرون است. همچنین روکش کاری پودر استلایت با توان ۲۵۰ وات، نرخ پاشش پودر ۴۰۰ میلی گرم بر ثانیه و سرعت روبش ۳ میلیمتر بر ثانیه با همپوشانی عرضی ۴۵ درصد انجام شد [۱۷] ؛ ارتفاع روکش بهدست آمده ۲۲۶ میکرون است. نمونههای روکش لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۱۷-۴PH به همراه فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ جهت آزمون خوردگی به صورت الکتروشیمیایی، ابتدا با دستگاه برش سیم به ابعاد مساوی ۳×۱۰×۱۵ میلیمتر بریده شده و سپس برای رسیدن به صافی سطح مناسب و عدم تأثیر ناهمواریها و آلودگیهای سطحی بر نتایج آزمون با استفاده از سنبادهزنی آمادهسازی شدند. در این مرحله پس از اطمینان از صافی

٩.

<sup>1 -</sup> MUT-DLD-C5

<sup>2 -</sup> Flat Cell

<sup>3-</sup> Sandard Calumel Electrod

چـگـالى جريـان خـوردگـى در آن بيشتـر و بـرابـر با ۲×<sup>۶–</sup>۱۰۸/cm<sup>2</sup> است. در مورد خوردگی یکنواخت زیرلایه می توان گفت که این فولاد در محلول ازنظر ترمودینامیکی پایدار بوده اما در صورت شروع خوردگی در مقایسه با پوششهای لیزری از سرعت خوردگی بیشتری برخوردار است. نرخ خوردگی فولاد ۴PH-۱۷ بدون يوشش برابر با ۳٫۷ mpy محاسبه شد. این فولاد در مقایسه با پوشش های لیزری از نرخ خوردگی بیشتری برخوردار است. با توجه به شکل منحنی پلاریزاسیون سیکلی برای فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ بدون يوشش را نشان مى دهد، چگالى جريان روبش مستقيم كمتر از روبش معكوس است؛ بنابراين هیسترزیس مثبت در منحنی پلاریزاسیون سیکلی دیدهمیشود. پتانسیل آزاد خوردگی در انتهای روبش معكوس بالاتر از پتانسيل OCP است. از آنجايي كه پسماند مثبت عموماً نشاندهنده عدم ترميم لايه پسيو است، مي توان گفت که خوردگی حفرهای در سطح فولاد بهصورت پیوسته ادامه مي يابد. لايه يسيو تشكيل شده جزئي، نايايدار و شكننده است. حفرات جدیدی نیز ممکن است تشکیل شوند. این رفتار بهدلیل ترکیب ناهمگن از فازهای مختلف مارتنزیت و فريت دلتا در زيرلايه بوده كه اين فولاد را مستعد به خوردگي حفرهای در محیط های حاوی کلر کرده است. فاز فریت دلتا نسبت به فاز مارتنزیت از کروم بیشتری برخوردار است. درنتيجه بهدليل اختلاف كروم در اين دو فاز در فصل مشتر ك مارتنزیت- فریت دلتا خوردگی حفرهای می تواند تشکیل شود و این حفره ها به سمت فاز زمینه که فاز مارتنزیت بوده، رشد مي کنند.

# ۳ ـ نتایج و بحث ۳ ـ ۱ ـ نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل

جدول ۳ نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل را نشان می دهد چگالی جریان و پتانسیل خوردگی با استفاده از روش برونیابی تافل از منحنیهای پلاریزاسیون تعیین شد. برای بهدست آوردن سرعتهای خوردگی (mpy) از معادله ۱ استفادشد. واحد چگالی جریان خوردگی (mpy) از معادله ۱ است. اکیوالان وزنی (Ew) برحسب گرم بوده و مقدار آن برای استلایت ۶ و فولاد زنگنزن به ترتیب g ۲۶٬۵۳ و برای استلایت ۶ و فولاد زنگنزن به ترتیب g ۲۶٬۵۳ و آزمون بوده که این مقدار برای هر سه نمونه یکسان و برابر با آزمون بود. d چگالی ماده خورده شده که مقدار آن برای استلایت ۶ و فولاد زنگنزن HTH به ترتیب برابر با استلایت ۶ و فولاد زنگار HTHH

$$C.R = \frac{0.13 \times \text{Icorr} \times \text{Ew}}{\text{A} \times \text{d}} \tag{1}$$

شکل ۲ منحنی پلاریزاسیون سیکلی حاصل از خوردگی الکتروشیمیایی فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش را نشان میدهد. فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش نسبت به فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ با پوشش های لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ از پتانسیل خوردگی بیشتر و برابر کره و فولاد زنگنزن ۲PH-۱۷ از پتانسیل خورد گی بیشتر و برابر ترمودینامیکی به خوردگی فولاد زنگنزن بدون پوشش نسبت به پوشش های لیزری کمتر است. اما ازلحاظ سینتیکی

91

C.R	ОСР	Ecorr	Icorr	βc	βa	
(mpy)	( <b>V</b> )	(V)	(A/cm2)	(V/decade)	(V/decade)	نمونه
						فولاد ۴PH–۱۷
۳/۷	-•/١٧۵	-•/\9	Y×9-1•	-•/\۵	•/•۵	بدون پوشش
		, <b>U</b> L / L	A			پوشش فولاد زنگنزن
1/70	-•/1٧۵	-•/1٧۵	1×7-1•	-•/• <b>v</b> ۵	•/•0	۱۷-۴PH
• /٣٣	_•/Y	_•/Y	۲×۷–۱۰	-•/180	•/•V۵	پوشش استلايت ۶

جدول ۳ ـ نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل برای پوشش های لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ و زیرلایه فولاد زنگنزن ۲/۵ در صد ۲/۵ در محلول نمک طعام ۳/۵ درصد



شکل ۲ ـ منحنی پلاریزاسیون سیکلی فولاد زنگنزن ۱۷-۴PH در محلول NaCl %3.5

مثبت در منحنی پلاریزاسیون مشاهده میشود. درنتیجه می توان گفت حفره تشکیل شده و در ادامه جریان معکوس شاخه آندی را قطع کرده است و باعث ایجاد پتانسیل حفاظت و روئین شدن مجدد شده است؛ بنابراین خوردگی حفرهای متوقف شده است. پتانسیل آزاد خوردگی در انتهای روبش معکوس بالاتر از پتانسیل OCP است. همچنین لایه پسیو تشکیل شده مقاوم در برابر تشکیل حفرات جدید است. در حین عملیات پیوسته روکش کاری لیزری که باعث تمپر شدن پاس های قبلی می شود و با توجه به مقدار بیشتر عنصر مس در شکل گرفته وجود داشته و به عنوان فاز تقویت کننده باعث به زیرلایه شده است. محققین دیگر فاز رسوبی مس را افزایش مقاومت به خوردگی حفره ی پوشش فولادی نسبت معنوان فاز بازدارنده و فازی که باعث ایجاد لایه پسیو شده، معرفی کرده اند. منحنی پلاریزاسیون سیکلی حاصل از خوردگی الکتروشیمیایی پوشش فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ در شکل ۳ نشان داده شده است. پوشش لیزری فولاد زنگنزن برخوردار بوده و پتانسیل آن منفی تر و برابر با VSCE ۷۵/۲-است اما ازنظر سینتیکی نسبت به زیرلایه از چگالی جریان کمتری برخوردار و برابر با ۲۰۸/۲<sup>-۹</sup>×۱ بوده و باوجود تمایل بیشتر به شروع خوردگی در صورت انجام این پدیده سرعت آن کمتر است. نرخ خوردگی در پوشش لیزری برابر بوده و نشان می دهد که مقاومت به خوردگی یکنواخت پوشش لیزری فولاد زنگنزن نسبت به زیرلایه بهتر است. این امر بهدلیل انجماد سریع در حین روکش کاری لیزری و ساختار یکنواخت پوشش است. همچنین چگالی جریان



شكل ۳ ـ منحنى پلاريز اسيون سيكلى پوشش فولاد زنگنزن ۲۹-۱۷ در محلول NaCl %3.5.

در چگالی جریانهای کمتری نسبت به منحنی مستقیم قرار دارد؛ بنابراین نواحی خورده شده قابلیت ترمیم خود را با تشکیل لایه پسیو (احتمالاً اکسید کروم) دارد. مقاومت به خوردگی یکنواخت و حفرهای پوشش لیزری استلایت ۶ به-دلیل برخوردار بودن پوشش استلایت از درصد کروم بالا در فاز زمینه محلول جامد کبالت است. عنصر کروم در حین خوردگی میتواند لایه محافظ دCr2O را تشکیل داده و از خوردگی حفرهای جلوگیری کند. همچنین پوشش لیزری استلایت ۶ از ریزساختار ریزتری برخوردار بوده و کاربیدهای کروم به طور یکنواخت در مرزدانههای بین دندریتی محلول جامد کبالت توزیع شدهاند. همچنین عنصر افزایش مقاومت به خوردگی حفرهای می شود. در شکل ۵ نیز جهت بررسی دقیق تر و امکان مقایسه، کلیهی منحنیها باهم رسم شدهاند.

منحنی پلاریزاسیون سیکلی حاصل از خوردگی الكتروشيميايي پوشش استلايت ۶ در شكل ۴ نشان دادهشده است. پتانسیل خوردگی پوشش استلایت ۶ برابر با VSCE ۰/۲ است که ازلحاظ ترمودینامیکی نسبت به یوشش فولادى پايدارتر بوده اما نسبت به زيرلايه اختلاف اندكى داشته و تمایل بیشتری به شروع خوردگی یکنواخت دارد. چگالی جریان خوردگی نیز در آن برابر با ۱۰۸/cm<sup>2</sup> ×۲ بهدست آمد. این مقدار از چگالی جریان های خوردگی يوشش فولادي و زيرلايه كمتر بوده و نشاندهنده سرعت کمتر خوردگی یکنواخت در پوشش استلایت است. نرخ خوردگی mpy ۰/۳۳ mpy اثبات کننده این موضوع است و نشان میدهد که پوشش لیزری استلایت ۶ از مقاومت خوردگی یکنواختی در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl برخوردار است. همچنین، مطابق شکل این پوشش از مقاومت به خوردگي حفرهاي بالايي نيز در اين محلول برخوردار است؛ منحنی هیسترزیس منفی تشکیل داده و منحنی معکوس آن

94



چگالی جریان (A/cm²)

شكل؟ ـ منحنى پلاريزاسيون سيكلى پوشش استلايت ۶ در محلول 3.5% NaCl.



شکل ۵ ـ منحنیهای پلاریزاسیون سیکلی پوششهای لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷-زیرلایه فولاد زنگنزن ۱۹۴-۱۷ در محلول 3.5% NaCl زیرلایه فولاد زنگنزن

زیرلایه تعداد حفرات کم تر و اندازه حفرات کوچک تر شده است. آنالیز طیفسنجی توزیع انرژی از ناحیه خورده شده پوشش فولاد گرفته شده و یافته های این آزمون در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق این نتایج در نقاطی که خوردگی حفرهای ایجاد شده، درصد وزنی عنصر آهن کاهش یافته اما درصد وزنی عنصر کروم و اکسیژن افزایش یافته است. در حین خوردگی در ابتدا خوردگی حفرهای تشکیل شده که با تشکیل لایه پسیو اکسید کروم در این نقاط از ادامه خوردگی حفرهای جلو گیری شده است.

شکل ۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح رویی پوشش استلایت ۶ که در تماس با محلول ۳/۵ درصد NaCl است را نشان میدهد. مطابق شکل و با توجه به بررسی نموداری در سطح پوشش، حفرهای تشکیل نشده است. ۳ — ۲ — بررسی تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشــی ســطح حاصــل از آزمون خوردگی الکتروشیمیایی

شکل ۶ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از حفرات تشکیل شده روی سطح فولاد زنگنزن را نشان میدهد. در تصویر خوردگی حفرهای قابل مشاهده است. نتایج حاصل از طیفسنجی توزیع انرژی از نقاط مشخص شده در تصویر در جدول ۳ آورده شده است.

این نتایج نشان میدهد که در نقاطی که خوردگی حفرهای ایجاد شده درصد وزنی عناصری مانند آهن و کروم کاهش یافته است. همچنین محصولات خوردگی حاوی درصد بالایی از کربن است. شکل ۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از حفرات

تشکیل شده روی سطح پوشش لیزری فولاد زنگنزن را نشان میدهد. در تیصویر حفراتی مشاهده می شود. در میقایسه با



200 µm

شکل ۶ ـ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فولاد زنگنزن ۲۹۴-۱۷ بدون پوشش پس از آزمون خوردگی.

	درصد وزنی											
Cl	0	Mn	Mo	Nb	Si	С	Ni	Cu	Cr	Fe		
•	•	• /۵	• /9	•/۴	۱/۴	۶/۲	۴/۳	۲/۷	14/9	۶۸/۹	Α	
۱/۵	۴/۰	• /۵	•	۰ /٣	۱/٣	24/2	۲/۷	۲/۰	۱۰/۸	۴۸/۹	В	
۰/٣	٨/١	•/۴	۰/٣	•	۲/۶	۳۸/۵	١/٧	۱/۴	٨/۵	۳۷/۹	С	

جدول ۳ ـ نتایج طیفسنجی توزیع انرژی فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش پس از آزمون خوردگی



میسم معلم شکل ۷ ـ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ پس از آزمون خوردگی.

	نقطه									
Cl	0	Mn	Nb	Si	С	Ni	Cu	Cr	Fe	
•/1	۱/۰	•/1	۰/۲	١/٢	۵/٣	۴/۰	۳/۶	۱۵/۸	۶۸/۸	Α
• / ٢	۲۵/۰	۱/۰	۴/۵	۱۲/۷	۱۹/۹	٠/٩	۰/۵	Y 1/Y	۱۳/۸	В

جدول ۴ ـ نتایج طیفسنجی توزیع انرژی پوشش فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ پس از آزمون خوردگی



شکل ۸ ـ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش استلایت ۶ پس از آزمون خوردگی.

# نتيجه گيري

روکش کاری لیزری با استفاده از لیزر فیبری پیوسته انجام شد. آزمون خوردگی الکتروشیمیایی با استفاده از منحنیهای تافل و سیکلی از زیرلایه

و پوشش های لیزری در محلول NaCl %3.5 انجام شد و منحنی های پلاریزاسیون سیکلی خوردگی الکتروشیمیایی رسم شد. نتایج نشان داد:

- سرعت خوردگی فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش برابر با ۳/۷ mpy است، پوشش لیزری فولاد زنگنزن ۴PH-۱۷-و استلایت۶ به ترتیب برابر با ۱/۸۵mpy و ۱۳۳۳/۰۱ست،
- در روکش فولاد ۴PH-۱۷ چگالی جریان روبش مستقیم کمتر از روبش معکوس است و هیسترزیس مثبت در منحنی پلاریزاسیون مشاهده می شود. در نتیجه حفره تشکیل شده و در ادامه جریان معکوس شاخه آندی را قطع کرده است و باعث ایجاد پتانسیل حفاظت و روئین شدن مجدد شده است؛ پتانسیل آزاد خوردگی در انتهای روبش معکوس بالاتر از پتانسیل OCP است. همچنین لایه پسیو تشکیل شده مقاوم در برابر تشکیل حفرات جدید است.

در روکش استلایت ۶ منحنی هیسترزیس منفی تشکیل داده و منحنی معکوس آن در چگالی جریان های کمتری نسبت به منحنی مستقیم قرار دارد؛ بنابراین نواحی خورده شده قابلیت ترمیم خود را با تشکیل لایه پسیو (احتمالاً اکسید کروم) دارد.
پوشش های لیزری فولاد زنگ نزن ۴PH–۱۷ و استلایت ۶ از مقاومت به خوردگی یکنواخت تری نسبت به فولاد زنگ نزن ۴PH–۱۷ برخوردارند و سرعت خوردگی در مقایسه با زیرلایه به ترتیب ۵۰ و ۹۱ درصد بهبود یافته است.

مراجع

- C. N.Hsiao, C. S. Chiou, & J. R.Yang, Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. Materials Chemistry and Physics, 74(2), 134-142, 2002.
- [2] M.Murayama, K.Hono, & Y.Katayama, Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at 400 C. Metallurgical and Materials Transactions A, 30, 345-353, 1999.
- [3] J.Wang, H.Zou, C.Li, S.Y.Qiu, & B.L.Shen, The effect of microstructural evolution on hardening behavior of type 17-4PH stainless steel in long-term aging at 350 C. Materials Characterization, 57(4-5), 274-280, 2006.
- [4] P. D.Wood, H. E.Evans, & C. B.Ponton, Investigation into the wear behaviour of Stellite 6 during rotation as an unlubricated bearing at 600 C. Tribology International, 44(12), 1589-1597, 2011.
- [5] A.Barroux, J.Delgado, M. E.Orazem, B.Tribollet, L.Laffont, & C.Blanc, Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive film for laser-beam-melted 17-4PH stainless steel. Corrosion Science, 191, 109750, 2021.
- [6] W. E.Frazier, Metal additive manufacturing: a review. Journal of Materials Engineering and performance, 23, 1917-1928, 2014.
- [7] R. Shoja Razavi , additive manufacturing with direct laser deposition, Malek Ashtar University of Technology, 2018.
- [8] F. Y.Shu, L.Wu, Zhao, S. H.Sui, L.Zhou, J.Zhang & B. S.Xu, Microstructure and high-temperature wear mechanism of laser cladded CoCrBFeNiSi high-entropy alloy amorphous coating. Materials Letters, 211, 235-238, 2018.
- [9] J.Zhao, Q.Gao, H.Wang, F.Shu, H.Zhao, W.He, & Z.Yu, Microstructure and mechanical properties of Co-based alloy coatings fabricated by laser cladding and plasma arc spray welding. Journal of Alloys and Compounds, 785, 846-854, 2019.
- [10] M. H., Nie, S.Zhang, Z. Y.Wang, T. Y.Yin, C. H.Zhang, C. L.Wu, & D. X. Zhang, Laser Cladding of 17-4 PH Stainless Steel Coatings: Microstructure, Texture Characterization, and Corrosion Resistance. Journal of Materials Engineering and Performance, 32(12), 5545-5553, 2023.
- [11] M.Rabbanikhah, N.Nabhani & M.Pikri, Investigation of the properties of the satellite 6 coating created by the laser coating method on AISI 420 martensitic stainless steel, Majlisi Materials Engineering Research 4, 41-48, 2008.
- [12] R. F.Schaller, J. M.Taylor, J.Rodelas, & E. J.Schindelholz, Corrosion properties of powder bed fusion additively manufactured 17-4 PH stainless steel. Corrosion, 73(7), 796-807, 2017.
- [13] D.Bartkowski, A.Młynarczak, A.Piasecki, B.Dudziak, M.Goscianski, & A.Bartkowska, Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding. Optics & Laser Technology, 68, 191-201, 2015.
- [14] C. R.Ciubotariu, E.Secosan, G.Marginean, D.Frunzaverde, & V. C.Campian, Experimental study regarding the cavitation and corrosion resistance of Stellite 6 and self-fluxing remelted coatings. Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 62(3), 154-162, 2016.
- [15] C.Cui, M.Wu, R.He, Y.Gong, & X.Miao, Investigation on the columnar-to-equiaxed transition and corrosion behavior in multi-track Stellite-6 coating fabricated by laser cladding. Materials Chemistry and Physics, 291, 126681, 2022.
- [16] R.Liu, M.Zhang, J.Yu, Q.Yang, & S.Gao, Microstructural transformation and high-temperature aluminum corrosion properties of Co-based alloy coating prepared by laser cladding. Coatings, 12(5), 603, 2022.
- [17] M. R.Borhnai, S.R.Shoja-Razavi, F.Kermani, M.Erfanmanesh, S. M.Barekat, Investigating the microstructure and hardness of 17-4PH steel and stellite cladded by direct laser deposition process on 17-4PH steel substrate. Journal of Welding Science and Technology of Iran, 8(2), 69-81, 2023.