E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 2, 2024



Evaluation of tribological behaviors of Inconel 625 cladding on same substrate cladded by direct laser deposition process

M.R. Borhani[1], M. Rajabi[1]*, R. Shoja Razavi[2], R. Jamaati[1]

1- Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Avenue, Babol, Iran.
2- Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Received 12 May 2023 ; Accepted 22 June 2023

Abstract

Reconstruction of parts using direct laser deposition can create a combination of high wear resistance properties, good toughness, and corrosion resistance. In this research, the wear properties of Inconel 625 powder cladding on the same substrate have been investigated; For this purpose, room temperature and high temperature wear tests have been used. Mass reduction, friction coefficient, width and depth of wear penetration have been measured. Also, a scanning electron microscope with an energy disspersive spectroscopy system was used to evaluate the cladding surface. The results showed that the mass reduction due to wear at Inconel 625 cladding compared to Inconel 625 substrate has decreased by 7% and 52%, respectively, at temperatures of 25°C and 620°C. Also, the wear mechanism of the room temperature of the cladding is mainly scratchy, and the wear mechanism of high temperature is mainly sticky.

Keywords:Direct Laser Deposition, Inconel 625, Wear properties, Friction coefficient.

Corresponding Author: m.rajabi@nit.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402



ارزیابی رفتار تریبولوژیکی روکش اینکونل 625 روی زیرلایه هم‌جنس روکش‌کاری شده توسط فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری

محمدرضا برهانی[1]، محمد رجبی[1*]، سید رضا شجاع رضوی[2]، روح الله جماعتی[1]

1-دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی صنایع و مواد

2-دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

دریافت مقاله: 1402/02/22 ؛ پذیرش مقاله: 1402/04/01

چکیده

بازسازی قطعات به‌وسیله رسوب‌نشانی مستقیم لیزری می‌تواند تلفیقی از خواص مقاومت به سایش بالا، چقرمگی مناسب و مقاومت مطلوب در برابر خوردگی را ایجاد نماید. در این پژوهش خواص سایشی روکش پودر اینکونل 625 روی زیرلایه هم‌جنس بررسی شد؛ بدین منظور از آزمون سایش دمای محیط و دمای بالا استفاده و کاهش‌جرم، ضریب اصطکاک، عرض و عمق نفوذ سایش اندازه‌گیری شد. جهت ارزیابی سطح سایش‌یافته از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم طیف سنجی پراش انرژی استفاده شد. نتایج نشان داد؛ کاهش جرم ناشی از سایش روکش اینکونل 625 در مقایسه با زیرلایه اینکونل 625 به ترتیب 7 و 52 درصد در سایش دمای 25 و 620 درجه سانتیگراد کاهش یافت. مکانیزم سایش دمای محیط پوشش عمدتاً خراشان و مکانیزم سایش دما بالای آن عمدتاً چسبان است.

کلمات کلیدی: رسوب‌نشانی مستقیم لیزری، اینکونل 625، خواص سایشی، ضریب اصطکاک.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.rajabi@nit.ac.ir

1- مقدمه

اینکونل 625 یک آلیاژ پایه نیکل-کروم- مولیبدن است. عنصر مولیبدن در این آلیاژ باعث افزایش سختی بدون اعمال عملیات حرارتی می‌شود. این آلیاژ به شدت مقاوم به خوردگی، خستگی خوردگی، حفره‌زایی و سایش است[1]. نتایج حاصل از بررسی مقاومت به سایش و سختی اینکونل 625 نشان داد وجود فاز زمینه گاما و وجود ذرات کاربید کروم، تنگستن و نیوبیم منجر به افزایش سختی و بهبود مقاومت به سایش می‌شود. از طرفی انتخاب پارامتر مناسب در رسوب‌نشانی مستقیم لیزری منجر به ایجاد ساختار ظریف و بهبود مقاومت به سایش و افزایش سختی می‌شود[4-2]. سایش به‌عنوان یکی از عوامل تخریب قطعات صنعتی است و زمانی اتفاق می‌افتد که دو سطح در تماس با یکدیگر و یا تحت تأثیر نیروی مکانیکی نسبت به هم حرکت لغزشی داشته باشند[5]. خواجوی و همکاران [6] تشکیل اکسید کروم و اکسید نیکل را در سطح شکست پره از جنس اینکونل 625 مشاهده کردند. نتایج نشان داد خوردگی داغ همراه با سایش باعث شکسته شدن پره می‌شود.

هنگام بازسای قطعه فرسوده، انتظار می‌رود طول عمر سایشی قطعه نسبت به قطعه جدید بالاتر باشد. در مواردی با روکش‌کاری ماده با خواص سایشی بالاتر این مورد حاصل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

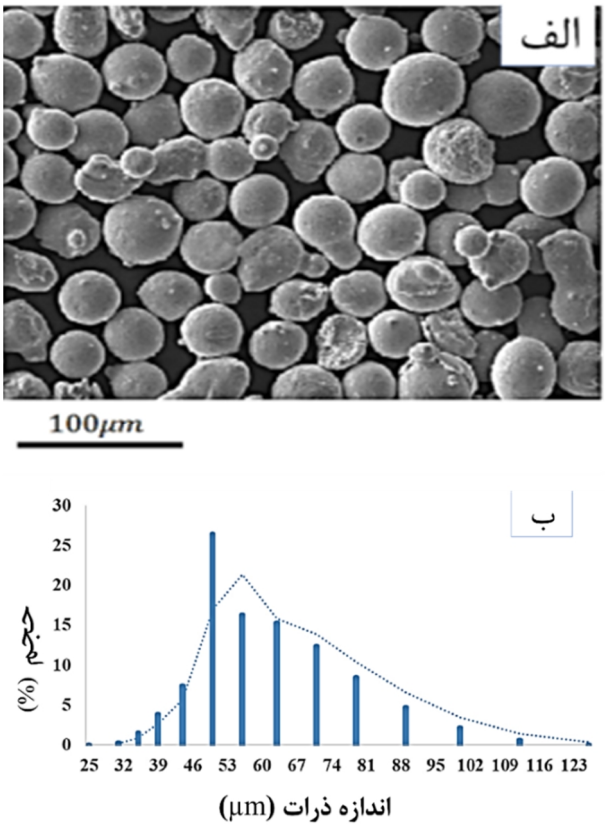
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

می‌شود. در مواردی به‌دلیل حساسیت ساختاری قطعه مجاز به استفاده از مواد غیرمشابه نیستیم. همچنین استفاده از روش‌های متداول مانند پاشش حرارتی (بدون پیوند متالورژیکی) و جوشکاری (ناحیه متأثر از حرارت بالا و ایجاد تغییرات ساختاری و ترک) خواص مورد نظر را تامین نمی‌نماید[8-7]. استفاده از روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری، فرصت جدیدی برای تعمیر قطعاتی که قبلاً به‌وسیله روش‌های رایج قابل تعمیر نبودند. در این روش با روکش‌کاری مواد هم‌جنس، علاوه‌بر ثبات ساختاری می‌توان به خواص بالاتر از ماده پایه رسید [10-9]. در پژوهشی خواص سایشی روکش لیزری فولاد 17-4PH روی زیرلایه هم‌جنس مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد کاهش جرم ناشی از سایش روکش نسبت به زیرلایه در بارگذاری 54 نیوتن، به میزان 22 درصد کاهش یافته است [11]. کوا و همکاران [12] در پژوهشی خواص سختی و سایش پوشش اینکونل 625 و کولومنوی6 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد برای پوشش اینکونل 625 مکانیزم سایش چسبان و کولومنوی6 به‌دلیل حضور ذرات سخت مکانیزم سایش خراشان رخ داده است. پوشش اینکونل 625 دارای فاز نرم گاما و کولومنوی 6 دارای ترکیبات بین فلزی و فاز لاوه است. علت اصلی تفاوت خواص سایشی در این دوآلیاژ میزان فاز لاوه گزارش شده‌است؛ افزایش سختی و کاهش ضریب اصطکاک در پوشش کولومونوی 6 به علت افزایش درصدی فاز لاوه است.

به‌رغم اهمیت بالای خواص سایشی در عمر نهایی قطعه تحقیقات محدودی در زمینه بررسی خواص سایشی روکش لیزری هم‌جنس انجام شده‌است. هدف پژوهش حاضر بررسی خواص سایشی (دما محیط و دما بالا) روکش اینکونل 625 روی زیرلایه هم‌جنس، با هدف افزایش خواص سایشی و به‌عنوان معیار پذیرش قطعه بازسازی شده، است.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، پودر اینکونل 625 تولیدشده به روش اتمیزاسیون گازی ساخت شرکت هورای با توزیع اندازه دانه 60 الی 90 میکرومتر مطابق شکل(1-الف) توسط فرایند رسوب‌نشانی مستقیم فلزی روی زیرلایه هم جنس لایه نشانی شد؛ شکل(1-ب) نمودار توزیع اندازه دانه پودر را نشان می‌دهد. از سیستم رسوب‌نشانی مستقیم لیزری مجهز به لیزر فیبری پیوسته با حداکثر توان یک کیلووات برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. نتایج طیف‌سنجی تفکیک انرژی پودر و زیرلایه نیز در جدول(1) آمده است.



شکل1- الف- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودر اینکونل 625 و ب- توزیع اندازه ذرات پودر.

جهت نمونه‌سازی از توان لیزر 225 وات، نرخ روبش 10 میلی‌متر بر ثانیه و نرخ تغذیه پودر 150 میلی‌گرم بر ثانیه با همپوشانی عرضی 45 درصد استفاده گردید[13]. ارتفاع و آمیختگی (رقت) پوشش حاصل به‌ترتیب برابر با 380 میکرومتر و 10 درصد می‌باشد [13]. به‌جهت حفظ ساختار انجمادی از الگوی حرکتی یک‌جهت استفاده شد؛ در این حالت بافت اصلی تشکیل شده مولفه‌های مکعبی و گوس می‌باشد و در تحقیقات بافت انجمادی با شدت بالا در این حالت توسط روش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

جدول1- آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی پودر و زیرلایه.

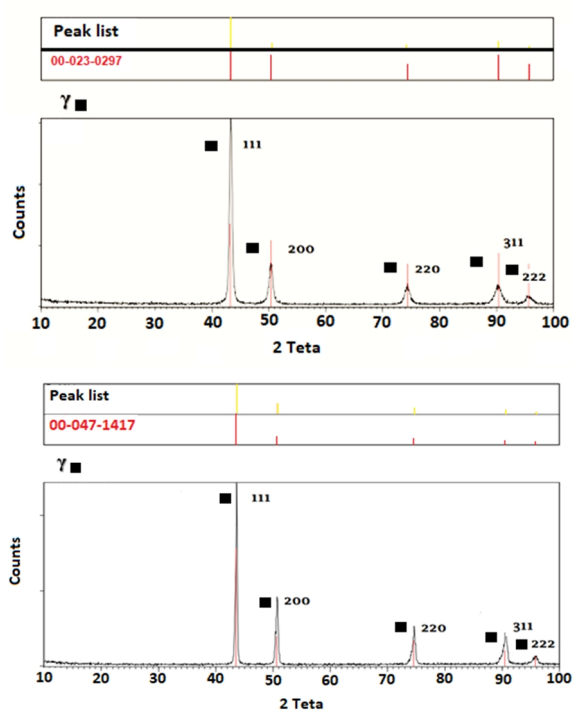
عنصر		نیکل	کروم	آهن	نایوبیوم	مولیبدن	تیتانیم	آلومینیم	منگنز	سیلیسیم	سایر
زیرلایه	درصد وزنی	پایه	۲۲٫۲	۴٫۵	۲٫۹	۷٫۵	۰٫۲	–	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۲
پودر		پایه	۲۲٫۴	۲	۳٫۵	۸٫۸	۰٫۲	۰٫۸	۰٫۲	۰٫۵	۰٫۲

رسوب‌نشانی مستقیم لیزری به‌دست می‌آید؛ بنابراین در این پژوهش ضمن حفظ خواص بافت (با بهینه‌سازی فرایندی و استفاده از پوشش هم‌جنس) هدف افزایش خواص سایشی نیز دنبال شده‌است [16-14].

اندازه‌گیری کاهش وزن آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال مدل سارتوریوس آنالیتیک با دقت 0/0001g انجام شد. جهت تعیین ضریب اصطکاک در حین فرایند سایش، نمودارهای ضریب اصطکاک توسط نرم‌افزار مربوط به دستگاه سایش رسم شده و مقدار ضریب اصطکاک تعیین شد. از ساینده آلومینا با سختی 78 راکول سی جهت آزمون استفاده و جهت زدایش آلودگی‌گلوله‌های آلومینا به‌مدت 30 دقیقه در اتانول به‌صورت التراسونیک تمیزکاری و سپس به‌مدت 1 ساعت در یک آون در دمای 90 درجه سانتیگراد خشک شد. در نهایت از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) تسکن مدل MIRA3 مجهز به طیف‌سنج توزیع انرژی جهت بررسی سطح سایش استفاده شد.

3- نتایج و بحث

شکل(2-الف و 2-ب) به ترتیب نتایج آنالیز پراش پرتوی ایکس زیرلایه و نمونه تولیدی در راستای عمود برجهت روبش لیزر را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل هم زیرلایه و هم پوشش عمدتاً شامل فاز آستنیتی پایه نیکل fcc (فازγ) است. تنها پیک‌های (111)، (200)، (220)، (311) و (222) در الگوی پراش شناسایی شده است. اولین دلیل عدم حضور پیک‌های تفرق فازهای لاوه، γ' و کاربیدها در الگوی تفرق پراش را می‌توان به کسر حجمی کم این فازها مربوط دانست. از طرفی با توجه به نرخ سردشدن بالای فرایندهای لیزری و انباشت حرارت کم و همچنین دیاگرام TTT اینکونل 625 زمان کافی برای تشکیل رسوب γ' و γ'' وجود ندارد.(یا توسط این روش قابل شناسایی نیست.)



شکل 2- نتایج آنالیز پراش پرتوی ایکس الف- زیرلایه و ب- پوشش ایجاد شده به روش رسوب نشانی مستقیم لیزری.

جدول(3) میزان کاهش وزن نمونه برای سایش دمای محیط و دمای 620 درجه سانتیگراد را نمایش می‌دهد. با توجه به انتظار قبلی کاهش وزن نمونه روکش‌کاری شده نسبت به زیرلایه در حالت سایش دمای 25 و دمای 620 درجه سانتیگراد به‌ترتیب 52 و 6 درصد کاهش داشته‌است. شکل(3) نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها را نشان می‌دهد ضریب اصطکاک برای پوشش اینکونل625 در مقایسه با زیرلایه در هر 2 حالت دمای 25 و 620 درجه سانتیگراد پایین‌تر است. با توجه به نتایج کاهش جرم و ضریب اصطکاک به‌نظر می‌رسد روکش اینکونل 625 از مقاومت سایشی بالاتری برخوردار است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

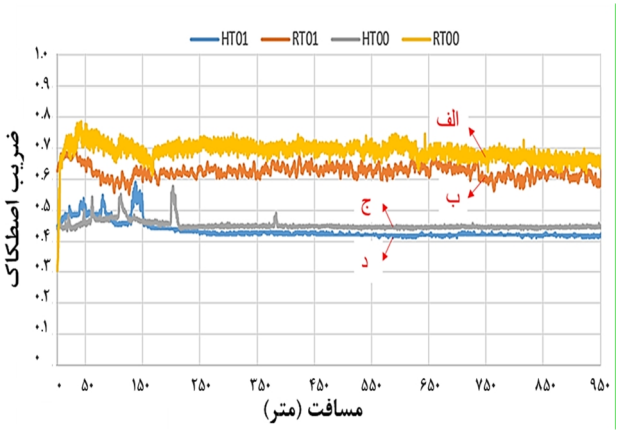
جدول2- شرایط و متغیرهای آزمون سایش.

شماره نمونه	نیرو (نیوتن)	دما (درجه سانتیگراد)	اتمسفر	سرعت خطی (متر بر ثانیه)	مسافت (متر)
HT00 زیرلایه	۵۰	۶۲۰	محیط	۰/۰۵	۱۰۰۰
HT01 روکش					
RT00 زیرلایه		۲۵			
RT01 روکش					

جدول3- وزن اولیه، نهایی و کاهش وزن نمونه‌ها در آزمون سایش دما بالا و دما پایین.

شماره نمونه	نیرو (نیوتن)	دما (درجه سانتیگراد)	وزن اولیه نمونه (گرم)	وزن نهایی نمونه (گرم)	کاهش وزن (گرم)
HT00	۵۰	۶۲۰	۳۲٫۱۷۰۰	۳۲٫۱۳۶۴	۰٫۰۳۳۶
HT01	۵۰	۶۲۰	۳۲٫۹۳۲۴	۳۲٫۹۱۶۴	۰٫۰۱۶۰
RT00	۵۰	۲۵	۳۲٫۵۶۸۵	۳۲٫۴۷۲۲	۰٫۰۹۶۳
RT01	۵۰	۲۵	۳۳٫۰۲۲۱	۳۲٫۹۳۲۴	۰٫۰۸۹۷

در پژوهش‌های مربوطه [19-18] فرض می‌شود که نیروی اصطکاک از دو منبع نیروی چسبندگی(حاصل از مناطق حاوی تماس واقعی) و نیروی تغییر شکل لازم جهت خیش زدن سطوح نرم‌تر توسط ناهمگونی‌های سطوح سخت‌تر می‌باشد. به‌نحوی‌که ضریب اصطکاک (μ) برابر با مجموع دو ضریب اصطکاک مربوط به چسبندگی (μ_{adh}) و ضریب اصطکاک مربوط به تغییر شکل (μ_{def}) می‌باشد. با توجه به جنس پین که از آلومینا تهیه‌شده، در حین آزمون سایش μ_{adh} افزایش‌یافته است؛ بنابراین، زیرلایه اینکونل 625 اصطکاک بیشتری نسبت به روکش دارد؛ در مقالات مشابه امکان کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک ناشی از ایجاد و کنده‌شدن لایه اکسیدی گزارش شده‌است. در این پژوهش نمودار ضریب اصطکاک در هر دو حالت به‌صورت خطی و تقریباً ثابت می‌باشد. در دمای 625 درجه سانتیگراد در زیرلایه و نمونه روکش چند مورد تغییرات ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود؛ این تغییرات برای نمونه روکش پس از 150 متر وجود ندارد ولی برای زیرلایه تا 400 متر مشاهده‌شده است. به نظر می‌رسد در شروع آزمون سایش تماس مستقیم پین با فلز بیشتر بوده و مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب اصطکاک نزدیک به مقادیر سایش دمای محیط است. با ادامه فرایند سایشی با توجه به افزایش دمای موضعی به نظر می‌رسد که لایه اکسیدی روی سطح تماس مستقیم پین با فلز شده است. درنتیجه ضریب اصطکاک به یک حالت پایداری می‌رسد.



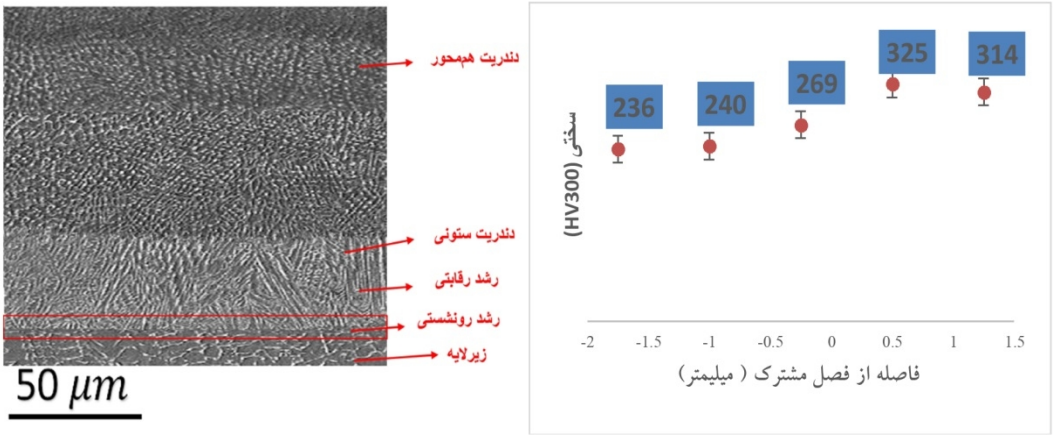
شکل3- نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها حین آزمون سایش
الف- دما پایین روکش،
ب-دما پایین زیرلایه، ج- دما بالای روکش و د-دما بالای زیرلایه.

تشکیل‌شده و باعث کاهش با توجه به معادله $Q=\frac{KW}{H}$ (رابطه آرچارد) حجم کل ماده ساییده شده در واحد مسافت لغزش (Q) با بار عمودی اعمالی (W) رابطه مستقیم و با سختی ماده نرم‌تر (H) نسبت عکس دارد. K در این رابطه ضریب سایش نام دارد و بدون بعد و همواره کوچک‌تر از یک است. مقاومت در برابر سایش به عواملی دیگر ازجمله مدول الاستیسیته، ریزساختار ازجمله اندازه و توزیع ذرات سخت در آلیاژ، اندازه و سختی ذرات ساینده و مسیر سایش بستگی دارد[20].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

جدول4- سختی سطح زیرلایه و روکش اینکونل 625.

نمونه	سختی (HV300)
زیرلایه	۲۵۶±۳
روکش	۳۱۷±۷

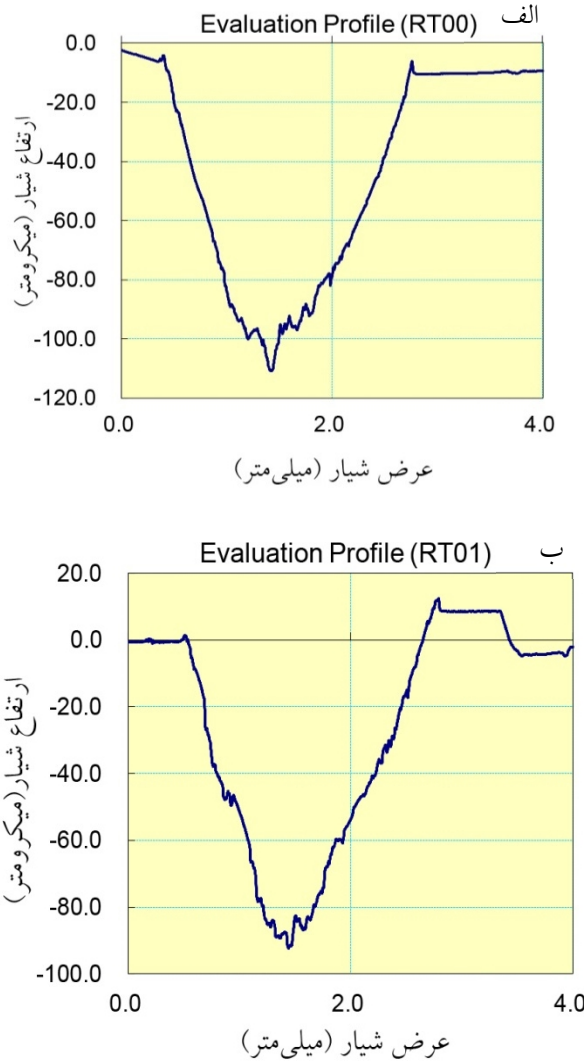


شکل 4- الف- تغییرات سختی نمونه بر اساس فاصله از فصل مشترک
و ب- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار مقطع عرضی نمونه.

بنابراین کمتر بودن کاهش جرم اینکونل 625 روکش‌کاری لیزری نسبت به زیرلایه می‌تواند رابطه مستقیمی با سختی آن دارد. برای بررسی بیشتر سختی سطح نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول 4) و این فرضیه تایید شد؛ اگر چه سختی حداکثر تغییرات سختی 25 درصد می‌باشد؛ اما در زمینه کاهش جرم نمونه تغییرات 52 درصدی در دمای620 درجه سانتیگراد شد. به نظر می‌رسد با افزایش لایه‌های نمونه سختی افزایش می‌یابد؛ بدین منظور سختی‌سنجی در مقطع نمونه انجام شد و نتایج سختی سنجی در شکل(4-الف) آورده شده‌است. (هر داده سختی از میانگین 3 داده سختی به‌دست آمده‌است.) با توجه به سختی‌سنجی انجام شده و همچنین نتایج سایر تحقیقات [16و22-21] فرضیه مورد نظر تایید می‌شود؛ با توجه به شکل(4-ب) (از به‌هم پیوستن چهار تصویر) در حین روکش‌کاری، حرارت از زیرلایه پس‌زده می‌شود و در جهت عمود بر سطح زیرلایه جریان دمایی وجود دارد. در این مناطق رشد به‌صورت رقابتی است و دندریت‌های ستونی جهت‌دار به وجود می‌آیند. در سایر مناطق نیز رشد به‌صورت سلولی می‌باشد. در این روش روکش‌کاری، نرخ انتقال حرارت فصل مشترک از سطح بیشتر است. لذا فاصله بازوهای بین دندریتی از فصل مشترک به سمت سطح کاهش می‌یابد. این مسأله روی ساختار و خواص قطعه تأثیرگذار است. در فواصل نزدیک فصل مشترک رشد به‌صورت رونشستی اما در فواصل دورتر، مکانیزم حاکم انجماد با توجه به گرادیان دمایی و جهت مناسب کریستالوگرافی در فلز تعیین می‌شود. در سایر مطالعات[24-23] نیز به این شکل بررسی پروفیل ناحیه سایش‌یافته اطلاعات مهمی درباره عمق و عرض ناحیه سایش نشان می‌دهد. همچنین، پستی‌بلندی‌های سطح سایش یافته را بعد از فرایند سایش نشان می‌دهد. بررسی پروفایل‌های سایش نشان می‌دهد نمونه روکش‌کاری شده لیزری همان طور که در شکل(5 و 6) مشاهده می‌شود، دارای عرض و عمق ناحیه سایش پایین‌تری نسب به زیرلایه در هر هر دو دمای 25 و 620 درجه سانتیگراد می‌باشد. در دمای 25 درجه سانتیگراد عمق و عرض روکش به‌ترتیب برابر با 92 میکرومترو 2/06 سانتی‌متر می‌باشد که نسبت به زیرلایه به‌ترتیب 54 درصد و 2 درصد کاهش یافته است. در دمای 620 درجه سانتیگراد عمق و عرض روکش به‌ترتیب برابر با 44 میکرومتر و 1/30 سانتی‌متر می‌باشد که نسبت به زیرلایه به‌ترتیب 54 درصد و 46 درصد کاهش یافته‌است. به‌منظور ارزیابی دلایل بهبود مقاومت سایشی پوشش

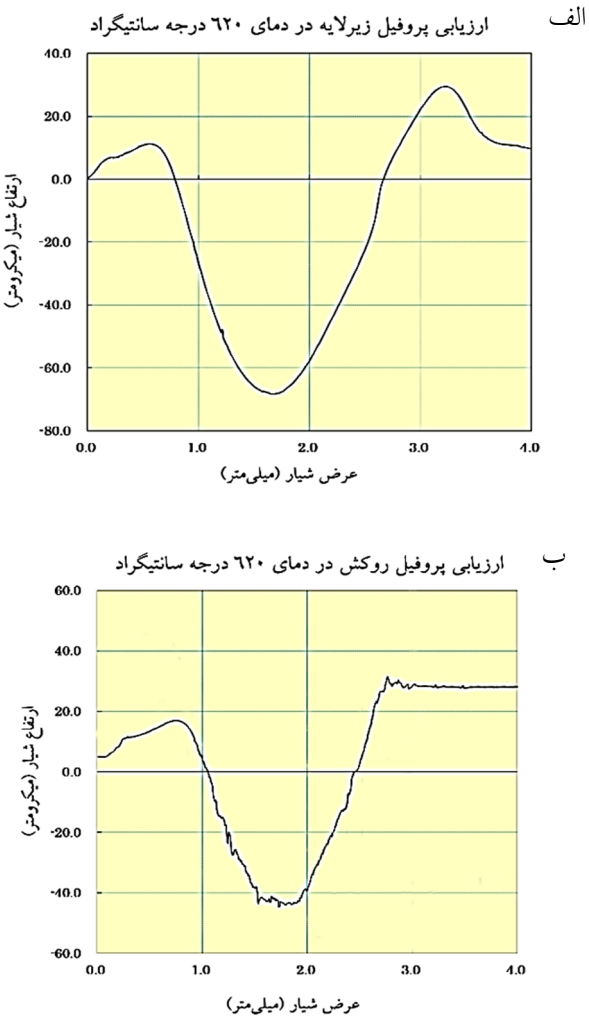
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

لیزری اینکونل 625 نسبت به زیرلایه سطوح سایش به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج توزیع انرژی موردمطالعه قرار گرفت.



شکل 5- عمق نفوذ و عرض ناحیه سایش یافته زیرلایه و روکش در دمای 25 درجه سانتیگراد.

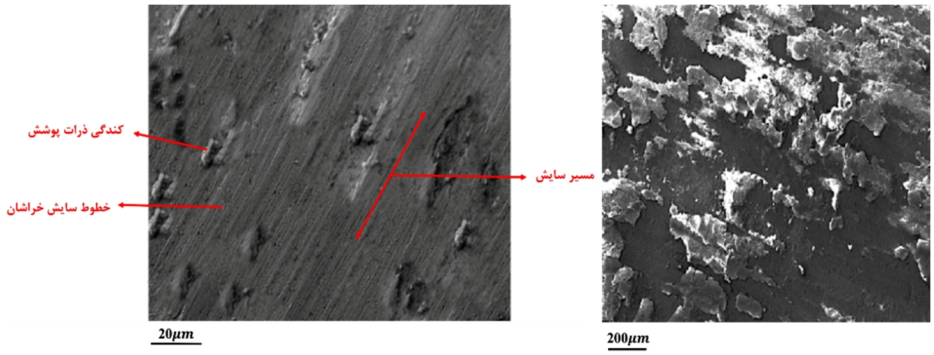
شکل(7) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش زیرلایه در دمای محیط را نشان می‌دهد. مسیر سایش دارای شیارهای موازی است. این شیارها مربوط به سایش خراشان است. با توجه به سختی بالای آلومینا می‌تواند در اینکونل 625 سایش خراشان ایجاد کند. نسبت Ha/Hs تعیین‌کننده سایش خراشان می‌باشد (Ha سختی پین و Hs سختی نمونه است). اگر نسبت Ha/Hs بیشتر از 1/2 احتمال کارسختی در مسیر سایش زیرلایه وجود داشته و سختی به‌صورت موضعی به مقادیر بالاتری افزایش یافته است. ولی همچنان اختلاف سختی بین پین و نمونه زیاد بوده و سایش خراشان پایدار می‌باشد.



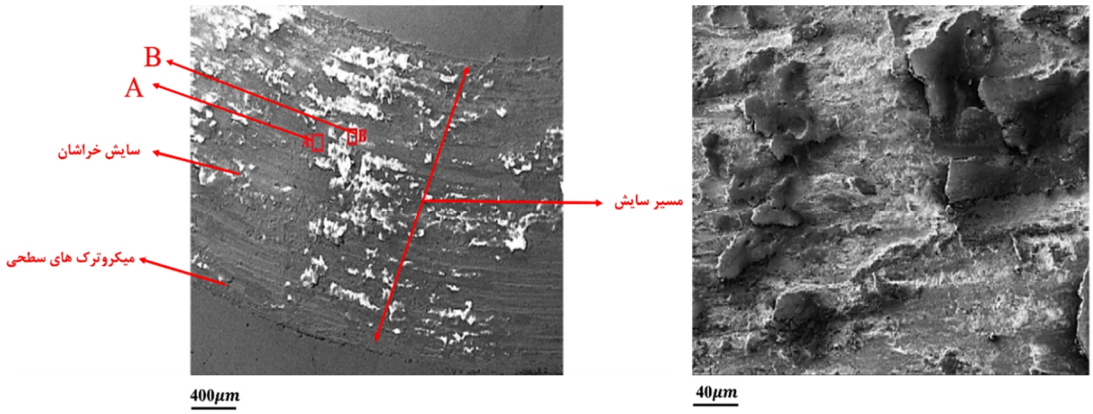
شکل 6- عمق نفوذ و عرض ناحیه سایش زیرلایه و روکش در دمای 620 درجه سانتیگراد.

افزایش سختی موضعی در مسیر سایش باعث می‌شود که سایش خراشان ایجادشده به حالت خیش‌زدگی باشد. شکل(8) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش روکش لیزری در دمای محیط را نشان می‌دهد. در این تصویر علاوه بر شیارهای موازی ناشی از سایش خراشان، لهیدگی‌هایی در مسیر سایش مشاهده شد. این لهیدگی‌ها نشان‌دهنده سایش چسبان می‌باشد و با توجه به نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی مطابق جدول(5) مشخص می‌شود که این ناپیوستگی‌هم‌جنس با زیرلایه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]



شکل 7- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش زیرلایه در دمای محیط.



شکل 8- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش روکش در دمای محیط.

بوده است. در مکانیزم سایش چسبان روکش لیزری حین سایش بر اثر تغییر شکل پلاستیک و سایش خراشان ذرات سایشی از روکش لیزری جداشده و در مسیر سایش و در تماس با پین قرارگرفته‌اند و در اثر حرکت رفت و برگشتی پین روی سطح سایشی له شده و سایش چسبان ایجاد می‌کند. علاوه بر این احتمال کارسختی در این ناپیوستگی‌ها وجود داشته و این نقاط از استحکام بیشتری نسبت به نمونه دارند. در ادامه سایش، جدا شدن ذرات دیگر از سطح سایشی وجود داشته و این ذرات می‌توانند به ناپیوستگی‌های قبلی متصل شده و روی ناپیوستگی‌های قبلی ناپیوستگی‌های جدیدی تشکیل شود. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که پیوند بین ناپیوستگی‌ها با سطح زیرین در اثر اعمال بار متناوب و تکراری در حرکت رفت و برگشتی پین روی سطح سایش به‌طور موضعی تضعیف شود. ریزبودن ذرات سایشی دلیل دیگر بر سایش خراشان از نوع خیش ریز می‌باشد. همچنین ذرات سایشی از اندازه و شکل یکنواختی برخوردار بوده و بیانگر یکسان بودن نرخ سایش است. خش‌های سطح روکش توسط دو مکانیزم قابل بررسی است؛ مانند سایش زیرلایه توسط پین با سختی بالاتر ایجاد شده‌اند و خطوط ایجاد شده‌است و در ادامه کنده شدن ذرات سخت و قرار گرفتن بین پین و نمونه در حین سایش می‌تواند عامل ایجاد این خش‌ها باشد. سایش خراشان در منحنی ضریب اصطکاک به صورت منطقه‌ای با نوسانات کم با توجه به شکل دیده می‌شود. که منطقه شروع در نمودار شکل(2) تایید کننده این مطلب است. بعد از این منطقه نوسانات شدیدی مشاهده می‌شوده این نوسانات با توجه به پژوهش‌های مشابه به سایش چسبان روی پین با سختی بالاتر نسبت داده می‌شود[26-25].

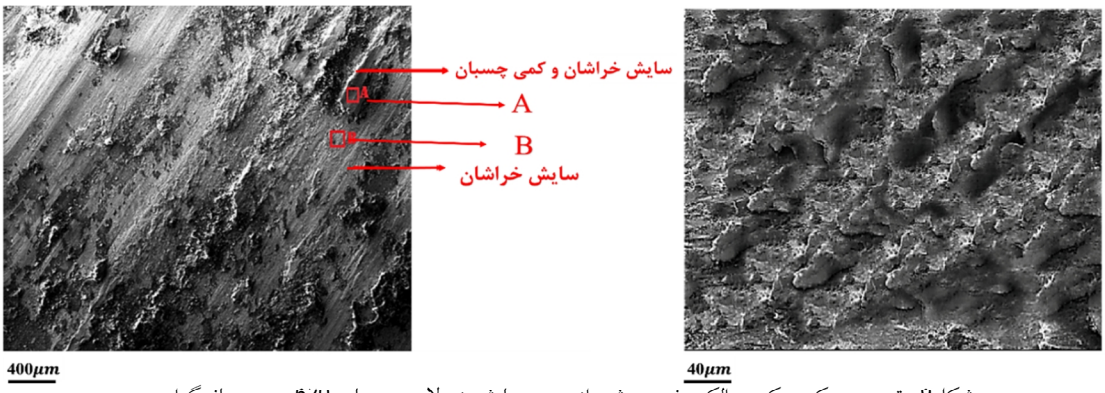
همچنین در اثر افزایش دمای موضعی به‌دلیل وجود اصطکاک بین پین و نمونه احتمال اکسیداسیون در مسیر سایش وجود داشته است. با توجه به پایدار بودن اکسید Fe_2O_3 و یا Cr_2O_3 به‌احتمال زیاد این اکسید در مسیر سایشی تشکیل‌شده است.

شکل‌های(9 و 10) به‌ترتیب تصویر ناحیه سایش یافته در دما بالای سطح زیرلایه و روکش در حضور پین آلومینا در دمای 620 درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. شیارهایی روی منطقه تحت سایش مشاهده می‌شود. محل خراش‌هایی که پین روی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

جدول5- نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از مسیر سایش در دمای محیط.

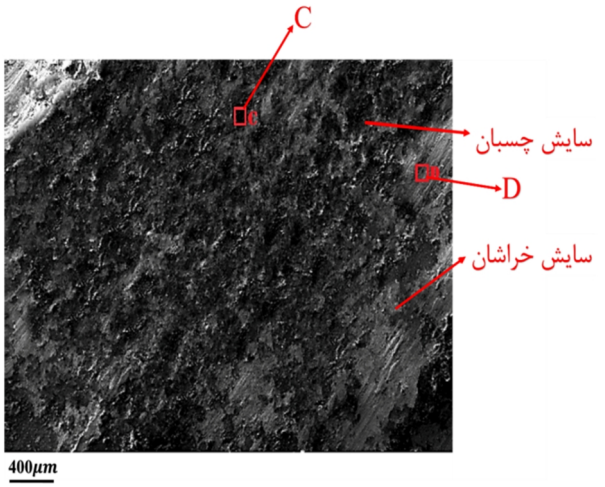
ناحیه / عنصر	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	O	Ti	Mn
A	۳۷٫۷	۲۳	۸٫۷	۳٫۵	۳٫۵	۲۳	۰٫۲	۰٫۴
B	۴۰٫۱	۲۲٫۵	۷٫۵	۴٫۹	۲٫۵	۲۲	۰٫۲	۰٫۳



شکل9- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش زیرلایه در دمای 620 درجه سانتیگراد.

سطح نمونه ایجاد کرده همه به‌صورت موازی و در یک جهت بود. نواحی سایش به رنگ خاکستری تیره می‌باشد و در برخی نواحی کمی رنگ روشن‌تر به چشم می‌خورد. شیار ایجاد شده در اثر حرکت پین بر روی سطح سایش را نشان می‌دهد که بیانگر سایش از نوع خراشان می‌باشد. سطح سایش پیوسته بوده و خراش‌های ریز و کمی روی سطح ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل(8) مشخص است همانند ذرات درشت و ورقه‌ای حاصل از سایش چسبان و ورقه‌ای و ذرات ریز حاصل از سایش خراشان قابل مشاهده است.

در شکل(9) بر خلاف شکل(8) عموماً ذرات درشت حاصل از سایش چسبان مشاهده می‌شود. آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی مربوط به مسیر سایش در نقاط D,C,B,A گرفته شده است. همانطور که در جدول(6) مشاهده می‌شود ترکیب میزان اکسیژن در نقاط نشان‌دهنده تشکیل لایه اکسیدی در مسیر سایش می‌باشد که دلیل آن قرارگیری نمونه در دمای بالا و واکنش سطح سایش با محیط مجاور می‌باشد. تشکیل این لایه اکسیدی باعث بهبود مقاومت به سایش می‌شود. با توجه به نمودار ضریب اصطکاک وضعیت زیرلایه و روکش در یک سطح بسیار نزدیک قرار دارد؛ همچنین جدول(5) نشان دهنده میزان اکسیژن تغییرات قابل ملاحظه‌ای در زیرلایه و روکش نشان نمی‌دهد. با توجه به تصاویر و همچنین جدول(2) (میزان کاهش جرم) به نظر می‌رسد لایه اکسیدی تشکیل شده روی روکش بسیار پایدارتر از زیرلایه می‌باشد؛ به همین دلیل است که کاهش جرم روکش در دما ی بالا 52 درصد کمتر بوده‌است.



شکل10- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش روکش در دمای 620 درجه سانتیگراد.

همچنین حضور عنصر آلومینیم جدا شده از پین و افزایش قابل توجه اکسیژن در آنالیز نشان دهنده کنده شدن عناصر تشکیل‌دهنده پین و مکانیزم سایش چسبان است. حضور عناصر مختلف در لایه سایشی که به‌صورت غیرپیوسته در سطح مشاهده می‌شود با استفاده از مکانیزم چسبان از زیرلایه و پین آلومینایی به این لایه منتقل شده است. انتقال آلومنیوم به سطح در مورد روکش لیزری بالاتر است که این مورد نیز نشان‌دهنده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

جدول6- نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از مسیر سایش روکش در دمای بالا.

ناحیه / عنصر	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	O	Al
A	۸٫۶	۲۹	۸٫۲	۳٫۲	۳٫۵	۴۶	۲٫۶
B	۱۸٫۲	۲۳٫۵	۷٫۵	۴٫۷	۲٫۵	۴۱	–
C	۵	۲۸٫۵	۵٫۹	۲٫۹	۲٫۵	۴۹٫۵	۶٫۷
D	۱۲٫۵	۲۱	۶٫۴	۴٫۵	۲٫۹	۴۶	–

سایش چسبان بیشتر نسبت به زیرلایه در این دمای 620 درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین برخلاف سایش دمای محیط که مکانیزم حاکم، سایش خراشان است، در دمای بالا علاوه بر سایش خراشان، سایش چسبان نیز به‌طور قابل توجه وجود دارد؛ علت اصلی این مورد تشکیل اکسید کروم و نیکل است؛ با توجه به تصاویر لایه اکسیدی در روکش بسیار پایدارتر است. نتایج پژوهش‌های مشابه در زمینه ساخت افزایشی و اینکونل 625 تایید کننده این ادعا است [27-26].

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص سایشی دما محیط و دما بالای پوشش اینکونل 625 ایجادشده توسط روکش‌کاری لیزری بررسی شد؛ بدین منظور کاهش‌جرم، ضریب اصطکاک، عرض و عمق نفوذ سایش اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد؛

- کاهش جرم ناشی از سایش روکش اینکونل 625 در مقایسه با زیرلایه اینکونل 625 به ترتیب 6 و 52 درصد در سایش دمای 25 و 620 درجه سانتیگراد کاهش یافته‌است.

- زیرلایه اینکونل 625 در هر دو دمای 25 و 620 درجه سانتیگراد ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به پوشش دارد. همچنین عمق نفوذ و عرض شیار آن در حدود 25 و 50 درصد در دمای 25 و 620 افزایش یافته‌است.

- مکانیزم سایش دمای محیط در زیرلایه به‌صورت کاملاً خراشان و در پوشش عمدتاً خراشان است؛ همچنین مکانیزم سایش دما بالای زیرلایه به‌صورت ترکیب سایش چسبان و خراشان و در مورد پوشش به‌صورت عمدتاً چسبان است و دلیل عمده آن مشاهده اکسید کروم پایدار روی سطح است.

منابع

1-Karmuhilan, M., & Kumanan, S. (2021). A review on additive manufacturing processes of inconel 625. Journal of Materials Engineering and Performance, 1-10.

2-Zafar, F., Emadinia, O., Conceição, J., Vieira, M., & Reis, A. (2023). A Review on Direct Laser Deposition of Inconel 625 and Inconel 625-Based Composites—Challenges and Prospects. Metals, 13(4), 787.

3-Anil, P. M., & Naiju, C. D. (2019). Sliding Wear Reliability Studies of Inconel 625 Components Manufactured by Direct Metal Deposition (DMD). Procedia Manufacturing, 30, 581-587.

4-Ravi, G., Murugan, N., & Arulmani, R. (2020). Microstructure and mechanical properties of Inconel-625 slab component fabricated by wire arc additive manufacturing. Materials Science and Technology, 36(16), 1785-1795.

5-Yan, X., Gao, S., Chang, C., Huang, J., Khanlari, K., Dong, D., ... & Liu, M. (2021). Effect of building directions on the surface roughness, microstructure, and tribological properties of selective laser melted Inconel 625. Journal of Materials Processing Technology, 288, 116878.

6-Khajavi, M. R., & Shariat, M. H. (2004). Failure of first stage gas turbine blades. Engineering Failure Analysis, 11(4), 589-597.

7-Vanaee M, Ardestani M, Abbasi A. Gas tungsten arc welding of direct quenched wear resistant steel to plain carbon steel and evaluation of its microstructure and wear properties. Journal of Welding Science and Technology of Iran. 2019 Jan 10;4(2):13-22.

8-Jafari MM, Afsari A, Behgozin SA, Heidari S. The effect of filler metal on the mechanical and tribological properties of AISI 1.6959 steel joint using TIG welding process. Journal of Welding Science and Technology of Iran. 2023 Jan 10;8(2):97-112.

9-Shoja Razavi, S.R., "Laser Coating", Malek Ashtar University of Technology, Publications, 2015.

10-Shoja Razavi, S.R. et al., "Additive manufacturing with direct laser deposition", Malek Ashtar University of Technology, Publications 2018.

11-Borhani, M.R., Shoja-Razavi, R., Kermani, F., Ilanlou.M., Erfanmanesh.M., "Evaluation of wear properties of 17-4ph steel and stellite 6 coatings created by direct laser deposition process on 17-4ph steel substrate", Journal of Surface Science and Engineering, 18(51), 13-27.

12-Cao, Y., Farouk, N., Taheri, M., Yumashev, A. V., Bozorg, S. F. K., & Ojo, O. O. (2021). Evolution of solidification and microstructure in laser-clad IN625

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]

superalloy powder on GTD-111 superalloy. Surface and Coatings Technology, 412, 127010.

13-Borhani, M. R., Rajabi, M., Shojarazavi, R., & Jamaati, R. (2023). Statistical modeling in the laser cladding process of Inconel 625 via linear regression and response surface method. Journal of Laser Applications, 35(2), 022024.

14-Borhani MR, Rajabi M, Shojarazavi R, Jamaati R., "Evaluation of the effect of the scanning pattern on the texture of Inconel 625 in the direct laser deposition process" , Journal of Surface Sciences and Engineering, 18(51), 39-48.

15-Kermani, F., Shoja-Razavi, R., Zangenemadar, K., Borhani, "Evaluation of the effect of the cladding pattern on the texture of Inconel 718 in direct laser deposition process", Journal of Surface Sciences and Engineering, 17(50), 17-27.

16-Kermani, F., Shoja-Razavi, R., Zangenemadar, K., Borhani, M., & Gavahian, M. (2023). An investigation into the effect of scanning pattern and heat treatment on the mechanical properties of Inconel 718 in the direct metal deposition process. Journal of Materials Research and Technology, 24, 4743-4755.

17-Murray, C. (2013). ASTM G99 Tip's Perspective Continuous Wear Contact. Today's standard for tomorrow's materials.

18-Li, J., & Lu, Y. H. (2013). Effects of displacement amplitude on fretting wear behaviors and mechanism of Inconel 600 alloy. Wear, 304(1-2), 223-230.

19-Chung, Ilsup, and Myungho Lee. "An experimental study on fretting wear behavior of cross-contacting Inconel 690 tubes." Nuclear Engineering and Design 241.10 (2011): 4103-4110.

20-Liu, B., Bruni, S., & Lewis, R. (2022). Numerical calculation of wear in rolling contact based on the Archard equation: Effect of contact parameters and consideration of uncertainties. Wear, 490, 204188.

21-Hedayatnejad, R., Sabet, H., Rahmati, S., & Golezani, A. S. (2023). Investigating laser power in additive manufacturing (AM-LMD) process on the microstructure and hardness of deposited layers on Inconel738. Journal of Welding Science and Technology of Iran, 8(2), 155-168.

22-Naiju, C. D., & Anil, P. M. (2017). Influence of operating parameters on the reciprocating sliding wear of direct metal deposition (DMD) components using Taguchi method. Procedia engineering, 174, 1016-1027.

23-Costa, L., & Vilar, R. (2009). Laser powder deposition. Rapid prototyping journal, 15(4), 264-279.

24-Rashkovets, M., Nikulina, A., Turichin, G., Klimova-Korsmik, O., & Sklyar, M. (2018). Microstructure and phase composition of Ni-based alloy obtained by high-speed direct laser deposition. Journal of Materials Engineering and Performance, 27, 6398-6406.

25-Wu, K., Sun, W., Tan, A. W. Y., Marinescu, I., Liu, E., & Zhou, W. (2021). An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings. Surface and Coatings Technology, 424, 127660.

26-Ahn, D. G. (2013). Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14, 1271-1283.

27-Riza, S. H., Masood, S. H., & Wen, C. (2016). Wear behaviour of DMD-generated high-strength steels using multi-factor experiment design on a pin-on-disc apparatus. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, 461-477.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.02]