



Investigation on Tribological Behavior of CoCrMo Alloy Fabricated by Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam Process

Meysam Nabizadeh¹, Morteza Azarbarmas*¹ , Ata Abdi²

¹ Research Center for Advance Materials, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

² Faculty of Materials Science and Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: CoCrMo alloys having good corrosion resistance and high mechanical properties as well as good biocompatibility, are widely used in biological applications such as implants. As wear resistance of these parts is important, in this work, the effects of applied load and wear distance on the tribological behavior of CoCrMo alloy produced by powder bed fusion of metals using a laser beam method have been evaluated. Results showed that by increasing the applied force, the amount of volume lost increases according to a two-degree polynomial equation. Also, it was observed that by increasing the sliding distance from 500 to 1000 m, the total volume loss increases from 1500 to 2500 mm³ and the wear mechanism changes from severe abrasion to adhesion and weak abrasion.

Review History:

Received: Dec. 31, 2024

Revised: Feb. 26, 2025

Accepted: Mar. 17, 2025

Available Online: Mar. 28, 2025

Keywords:

CoCrMo

Laser Powder Bed Fusion

Wear Behavior

Abrasion Wear

Adhesion Wear

1- Introduction

ASTM F75, a CoCrMo alloy, with the chemical composition of Co-Cr(27-30 wt.%)-Mo(5-7 wt.%) is widely used in biological implants due to its high corrosion resistance[1], biocompatibility[2] (a selective and spatially varying electrochemical response resulted in generation of a nanoscale surface morphology) crests and troughs and good wear properties[3]. Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam (PBF-LB/M), known as selective laser melting (SLM), is one of the additive manufacturing processes in which metallic powders are melted using a laser beam. This melting is selective according to the applied CAD models. Today many attentions have been focused on producing CoCrMo alloys using the PBF-LB/M process[4]. It has been reported that the PBF-LB/M process has better biocompatibility in comparison to the casting method[5]. Recently, Lam et. al. [6]] have improved the mechanical properties of CoCrMo alloys produced by PBF-LB/M by applying heat treatment and thereby increasing the martensite phase. In most of the published works in the field of wear behavior of CoCrMo alloys produced by the PBF-LB/M process, the effects of post processing heat treatment on the tribological behavior have been evaluated and there are limited results showing

the influence of the applied force and sliding distance on the volume and mechanism of wear. This study is designed to cover this research gap.

2- Experiments

CoCrMo samples were produced using a PBF-LB/M machine with a laser power of 200 W under Argon gas protection. A strip scanning strategy was utilized with a strip size of 5 mm, a starting angle of 45 and a rotation of 67 between each layer. Details of the production process can be found in [7]. The lost mass of samples during the wear tests were determined and considering the nominal density of 8.28 g/cm³ the total lost volume of samples was calculated. Finally the worn surface of the samples was evaluated using FE-SEM equipped with EDS analysis.

3- Results and Discussion

Fig. 1 (a) shows the total volume loss of CoCrMo samples after the wear tests as a function of applied load for the sliding distance of 500 m. It can be seen that the volume loss for the applied load of 25 N is just 700 mm³, while this parameter is 50 and 5500 mm³ for the applied forces of 50 and 100 N, respectively. This indicates that the amount of

*Corresponding author's email: azarbarmas@sut.ac.ir



wear is increased at higher rates with higher forces. Results of the non-linear regression of the total volume loss as a function of the applied load are illustrated in Fig. 1 (b). It is obvious that the obtained quadratic polynomial fits well with the experimental data with the R²-error value of 1. The fitted equation is: $T.V.L = 0.006 F^2 - 0.173 F + 7.313$, in which T.V.L and F indicate the total volume lost (mm³) and applied force (N). Fig. 1 (c) presents the total volume loss of samples after wear test under the applied force of 50 N. It can be observed that as the sliding distance increases from 500 to 1000 m, the volume loss is increased from 1490 to 2520 mm³, i.e. 1.7 times more.

For evaluating the effects of applied force and sliding distance on the wear mechanism of samples, FE-SEM images of them were examined after the wear test. Fig. 2 shows the worn surface of the sample under the applied force of 50 N and the sliding distance of 500 m. White and yellow arrows indicate the grooves and products of wear separated from the surface, respectively. As grooves and plough are distributed in almost all parts of worn surface, it can be deduced that the main mechanism is abrasion wear in this condition.

By comparing Fig. 2 a and b, it can be seen that the depth of grooves decreases with increasing applied force. Also, many separated parts of worn surfaces is present in Fig. b. Thus, it is concluded that the wear mechanism changes from abrasion to adhesion one by increasing the applied load. In fact, as the applied force increases, the temperature of the surface rises [8] and thereby the surface is noticeably oxidized. Therefore, the formation of deep grooves is prevented by these hard oxides.

Fig. 2 c illustrates a FE-SEM image of the sample worn under a force of 50 N and a sliding distance of 1000 m. By comparing this image with Fig. a it can be said that by increasing the sliding distance, the wear mechanism changes from severe abrasion to adhesion and weak abrasion mechanisms. This is due to the oxidation of the surface with increasing wear time. Orange arrows show the cracks that appeared along the wear tracks causing fractures and separating some parts (see yellow arrows).

4- Conclusions

1- Results showed that the volume loss of worn samples increased 2.14 and 7.86 times as the applied load increased from 25 to 50 and 100 N, respectively, showing the progressive increase of wear with increasing the applied load.

2- The variation of volume loss as a function of the applied force was well modeled using a second order polynomial.

3- By increasing the applied load, the wear mechanism was changed from severe abrasion to the adhesion one.

4- With increasing the sliding distance, the amount of volume loss increased 1.7 times.

5- The wear mechanism changed from the severe abrasion to adhesion and weak abrasion by increasing the sliding distance.

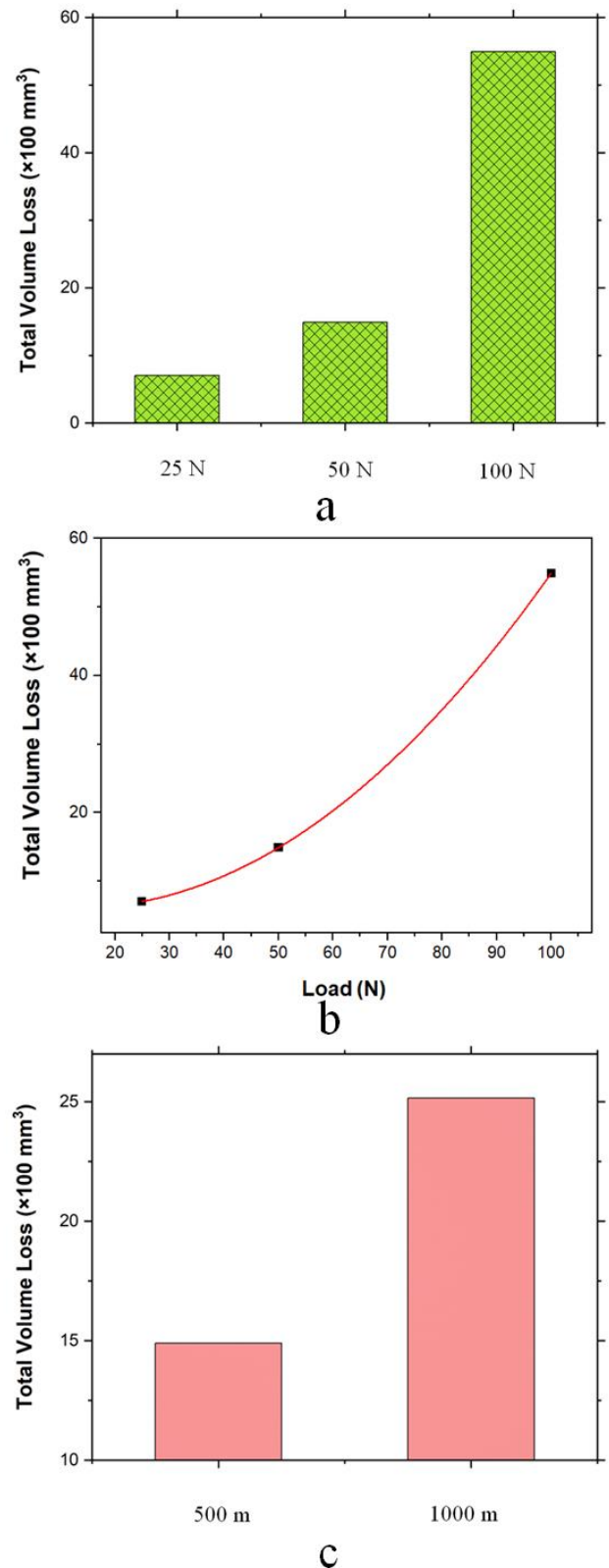


Fig. 1. (a) The total volume loss of samples as a function of applied load, (b) a regression applied to the data in (a) and (c) the total volume loss of samples as a function of the sliding distance.

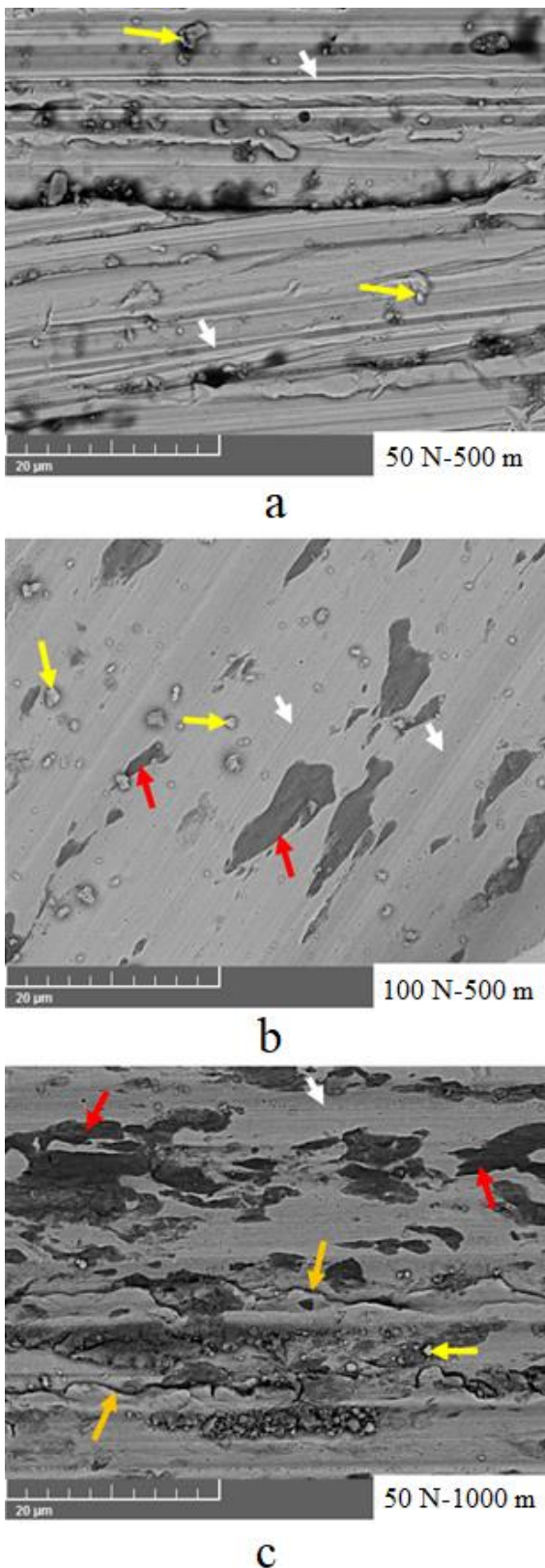
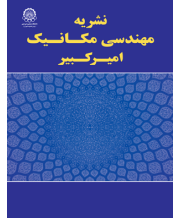


Fig. 2. FE-SEM image of worn surfaces of samples at various conditio

References

- [1] A. Mace, P. Khullar, C. Bouknight, J.L. Gilbert, Corrosion properties of low carbon CoCrMo and additively manufactured CoCr alloys for dental applications, *Dent. Mater.* 38 (2022) 1184–1193.
- [2] S. Mazumder, K. Man, M. Radhakrishnan, M. V Pantawane, S. Palaniappan, S.M. Patil, Y. Yang, N.B. Dahotre, Microstructure enhanced biocompatibility in laser additively manufactured CoCrMo biomedical alloy, *Biomater. Adv.* 150 (2023) 213415.
- [3] L.G. de la Cruz, P. Alvaredo, J.M. Torralba, M. Campos, Material extrusion: A promising tool for processing CoCrMo alloy with excellent wear resistance for biomedical applications, *Mater. Des.* 244 (2024) 1–13.
- [4] A. Takaichi, Y. Kajima, H.L. Htat, N. Wakabayashi, Influences of Different Selective Laser Melting Machines on the Microstructures and Mechanical Properties of Co–Cr–Mo Alloys, *Appl. Sci.* 14 (2024) 6576.
- [5] Z. Guoqing, Y. Yongqiang, S. Changhui, F. Fan, Z. Zimian, Study on Biocompatibility of CoCrMo Alloy Parts Manufactured by Selective Laser Melting, *J. Med. Biol. Eng.* 38 (2018) 76–86.
- [6] T.-N. Lam, K.-M. Chen, C.-H. Tsai, P.-I. Tsai, M.-H. Wu, C.-C. Hsu, J. Jain, E.-W. Huang, Effect of Porosity and Heat Treatment on Mechanical Properties of Additive Manufactured CoCrMo Alloys, *Materials (Basel)*. 16 (2023) 751–768.
- [7] M. Nabizadeh Dizaj, M. Azarbarmas, A. Abdi, The influence of heat treatment on the microstructure, hardness, and wear properties of CoCrMo alloy produced by powder bed fusion of metals using a laser beam (PBF-LB/M) process, *Prog. Addit. Manuf.* 9 (2024) 1–14.
- [8] G. Straffelini, M. Pellizzari, A. Molinari, Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material, *Wear.* 256 (2004) 754–763.



بررسی رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo تولید شده به روش ذوب بستر پودری فلزات با استفاده از پرتوی لیزر

میثم نبی‌زاده دیزج^۱، مرتضی آذربرمس^{۱*}، عطا عبدی^۲

۱- پژوهشکده مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۲- دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸

کلمات کلیدی:

CoCrMo
ذوب بستر پودر لیزری
رفتار سایش
سایش خراشان
سایش چسبان

خلاصه: آلیاژهای CoCrMo با داشتن مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی بالا و نیز سازگاری زیستی مناسب، به صورت گسترده‌ای در کاربردهای مختلف پزشکی از قبیل کاشتنی‌های داخل بدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. اخیراً با توجه به مزایای روش ذوب بستر پودر لیزری در ساخت قطعات با شکل پیچیده و با سرعت بالا، تولید آلیاژهای CoCrMo با این روش، مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آن‌جا که مقاومت به سایش قطعات در کاربردهای پزشکی از اهمیت بالایی برخوردار است، در این مقاله تاثیر پارامترهای بار اعمالی و نیز مسافت ساییدگی، روی رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo تولید شده با روش ذوب بستر پودر لیزری بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش بار اعمالی، مقدار سایش صورت گرفته در قطعات به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. رگرسیون غیر خطی داده‌ها توانست یک چند جمله‌ای درجه ۲ را با دقت بالایی برای بیان ارتباط بین مقدار سایش پدیدار شده نسبت به بار اعمالی ارائه دهد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش مسافت طی شده در طول آزمایش سایش پین روی دیسک از ۵۰۰ m به ۱۰۰۰ m، حجم اتلاف ماده از حدود ۱۵۰۰ mm^۳ به ۲۵۰۰ mm^۳ افزایش می‌یابد و ساز و کار سایش از نوع خراشان شدید به نوع خراشان خفیف در کنار سایش چسبان تغییر می‌یابد.

۱- مقدمه

پاوار^۳ و همکاران [۹] با انجام مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه ساخت افزایشی آلیاژهای CoCrMo به این نتیجه رسیده‌اند که روش SLM مناسب‌ترین روش از بین این فرآیندها برای تولید قطعات CoCr-Mo می‌باشد. مشاهده شده است که قطعات CoCrMo ساخته شده با روش SLM کارایی زیستی بهتری نسبت به قطعات تولید شده با روش ریخته‌گری دارد [۱۰]. اخیراً لام^۴ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش SLM قطعات CoCrMo را برای کاربردهای پزشکی تولید کرده و با اعمال عملیات حرارتی انحلال و پیرسازی، مقدار فاز مارتنیت و در نتیجه، خواص مکانیکی این آلیاژ را بهینه کرده‌اند. مشابه این کار توسط ژنگ^۵ و همکاران [۱۲] نیز انجام گرفته و گزارش شده است که عملیات حرارتی دو مرحله‌ای شامل عملیات انحلال و پیرسازی، نسبت به عملیات تک مرحله‌ای انحلال یا عملیات تک مرحله‌ای پیرسازی مستقیم، نتایج بهتری در ارائه استحکام و شکل‌پذیری مناسب ارائه می‌دهد.

آلیاژ Co-Cr(27-30) ASTM F75 با ترکیب شیمیایی Co-Cr(27-30) Mo(5-7 wt.%) با داشتن مقاومت به خوردگی بالا [۱]، سازگاری زیستی [۲] و خواص سایشی مناسب [۳] به طور گسترده‌ای در ساخت کاشتنی‌های مورد استفاده در بدن استفاده می‌شود [۴]. روش ذوب بستر پودری فلزات به کمک پرتوی لیزر (PBF-LB/M^۱) که با نام ذوب لیزری انتخابی (SLM^۲) نیز شناخته می‌شود، یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن با استفاده از انرژی یک لیزر، پودر مورد نظر ذوب شده و یک قطعه سه بعدی ایجاد می‌شود. با توجه به مزایای روش SLM در ساخت قطعات با شکل پیچیده [۵]، سرعت تولید بالا [۶] و امکان ساخت قطعات با مشخصات دلخواه [۷]، امروزه توجه زیادی به استفاده از این روش در تولید قطعات ساخته شده از آلیاژهای CoCrMo وجود دارد [۸].

1. Powder Bed Fusion of Metals using a Laser Beam
2. Selective Laser Melting

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: azarbarmas@sut.ac.ir

3. Pawar
4. Lam
5. Zhang

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



مشاهده می‌شود، بیشتر کارهای منتشر شده در زمینه مطالعه رفتار سایشی آلیاژهای CoCrMo تولید شده با روش SLM، بر مطالعه تاثیر روش‌های پس از تولید از قبیل عملیات حرارتی بر رفتار سایشی آلیاژ متمرکز شده‌اند و اطلاعات محدودی در حوزه تاثیر مقدار نیروی سایشی اعمالی و مسافت طی شده در حجم سایش صورت گرفته و سازوکار ساییدگی در دسترس می‌باشد. بنابراین در این کار پژوهشی، سعی شده است تا با استفاده از مقادیر بار اعمالی و مسافت طی شده مختلف، تاثیر کمی و کیفی این پارامترها روی رفتار سایشی این آلیاژ مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در واقع نوآوری این مقاله بر بررسی کمی و کیفی تاثیر بار اعمالی و مسافت طی شده بر ساز و کار سایش و کمی‌سازی رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo تولید شده به روش SLM متمرکز می‌باشد.

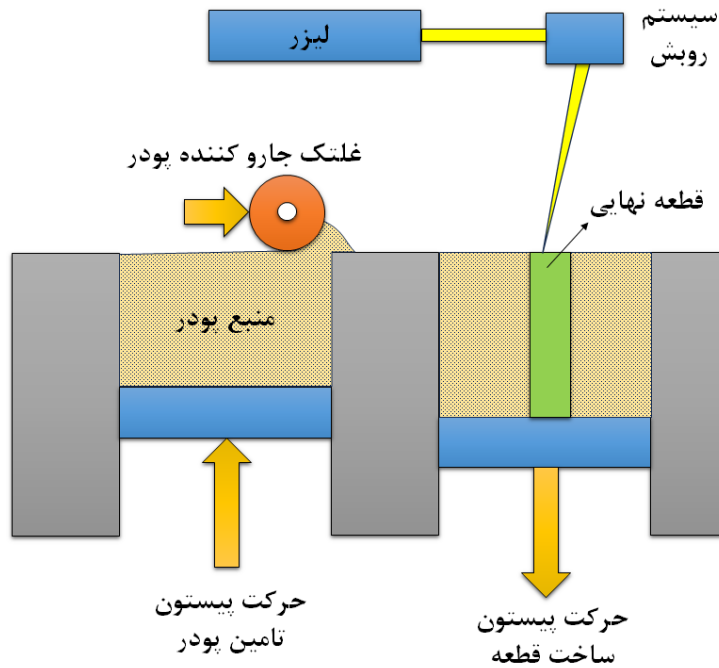
۲- روش تحقیق

نمونه‌های اولیه از جنس آلیاژ CoCrMo با استفاده از روش ذوب لیزری انتخابی تولید شدند. پودر اولیه مورد استفاده به صورت آلیاژی و با اندازه ذرات متوسط ۲۸/۸۳ میکرون بود. اندازه بزرگترین و کوچکترین ذرات پودر شناسایی شده به ترتیب برابر ۵۰/۵۰ و ۸/۵۱ میکرون به دست آمد. در این روش، بسته به هندسه طراحی شده به کمک CAD، لیزر از میان ذرات پودر توزیع شده روی زیرلایه، بخش‌های خاصی را ذوب کرده، به هم متصل می‌کند. با ساخته شدن یک لایه، پودر لایه بعدی به کمک یک غلتک یا جارو، روی لایه اول توزیع می‌شود و ذوب و اتصال ذرات پودری در این لایه نیز انجام گرفته و همین روند تا شکل‌گیری قطعه نهایی ادامه پیدا می‌کند. شماتیک این روش در شکل ۱ آورده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، پیستون منبع پودر، پودر را به اندازه یک گام، بالاتر می‌برد تا غلتک، لایه‌ای از آن را روی محفظه ساخت منتقل کند و در محفظه ساخت، پس از اتمام ساخت یک لایه، پیستون ساخت قطعه، به اندازه یک گام پایین می‌رود تا فضا برای ساخت لایه بعدی فراهم شود. نمونه‌ها به کمک دستگاه مجهز به لیزر ۲۰۰ W تولید شدند. معیار برای به دست آوردن حالت بهینه، حصول نمونه‌های با چگالی تقریباً کامل بود (یعنی به دست آوردن نمونه‌هایی با کمتر از ۱ درصد تخلخل). تمامی نمونه‌ها تحت گاز محافظ آرگون و مقدار اکسیژن کمتر از ۰/۳ درصد تولید شدند. زیرلایه مورد استفاده به ضخامت ۲۰ mm تا دمای ۸۰ حرارت داده شده بود. مشخصات فرآیند تولید در جدول ۱ آورده شده است.

تاثیر عملیات پس از تولید بر رفتار سایشی آلیاژهای CoCrMo تولید شده به روش SLM نیز تاکنون موضوع چندین کار تحقیقاتی بوده است. در برخی از این کارها [۱۳] تاثیر عملیات حرارتی پس از تولید روی رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo ساخته شده با روش SLM بررسی و شرایط بهینه عملیات حرارتی گزارش شده‌اند. همچنین گان^۱ و همکاران [۱۴] با بررسی تاثیر حضور مس در تولید آلیاژ CoCrMo به روش SLM بر خواص سایشی به این نتیجه رسیده‌اند که حضور مس می‌تواند باعث بهبود مقاومت به سایش آلیاژ شود. چن^۲ و همکاران [۱۵] آلیاژ CoCrMo را با روش SLM تولید کرده و روی آن به کمک روش اسپاترینگ مغناطیسی، پوشش TiN اعمال کردند. نتایج به دست آمده نشان داده است که مقاومت سایشی آلیاژ با اعمال این پوشش بهبود چشمگیری داشته است. اخیراً لی^۳ و همکاران [۱۶] رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo تولید شده با روش SLM را قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی کرده و نشان داده‌اند که عملیات پیرسازی در دمای پایین باعث بهبود مقاومت سایشی آلیاژ می‌شود، در حالی که عملیات حرارتی دما بالا منجر به ایجاد ساختار تبلور مجدد یافته عاری از فاز مارتنزیت و تنش پسماند شده و باعث افت چشمگیری در مقاومت سایشی قطعات می‌شود. همچنین آمانو^۴ [۱۷] نمونه‌های CoCrMo ساخته شده با روش SLM را تحت عملیات آلتراسونیک سطحی قرار داده و رفتار تریبولوژیکی آن‌ها را تحت بار و مسافت ثابت مورد بررسی قرار داده است. نتایج حاصله حاکی از این بوده است که با اعمال عملیات آلتراسونیک سطحی، مقادیر سختی، تنش تسلیم و مقاومت سایشی افزایش یافته و ضریب اصطکاک کاهش یافته است. تونلی^۵ و همکاران [۱۳] نیز رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo به دست آمده با روش SLM را با و بدون عملیات حرارتی تحت مسافت ثابت و نیروی متغییر ۵ و ۱۰ N بررسی کرده‌اند. نتایج کار آنها نشان داده است که با اعمال عملیات حرارتی، سختی افزایش ولی مقاومت سایشی کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شده است که افزایش بار از ۵ تا ۱۰ N تغییری در سازوکار سایش ایجاد نمی‌کند که این موضوع می‌تواند به پایین بودن مقادیر بارهای اعمالی نسبت داده شود. نویسندگان مقاله حاضر نیز اخیراً رفتار سایشی آلیاژ CoCrMo تولید شده با روش SLM را با و بدون عملیات حرارتی و تحت بار و مسافت ثابت بررسی کرده و افزایش مقاومت سایشی آلیاژ با اعمال عملیات حرارتی را گزارش کرده‌اند [۱۵]. همان گونه که

1. Gan
2. Chen
3. Li
4. Amanov
5. Tonelli

6. Computer-aided design



شکل ۱. شماتیک نشان دهنده روش ساخت قطعات اولیه به کمک روش ذوب لیزری انتخابی.

Fig. 1. The schematic of the powder bed fusion of metals using a laser beam process used for manufacturing the initial samples.

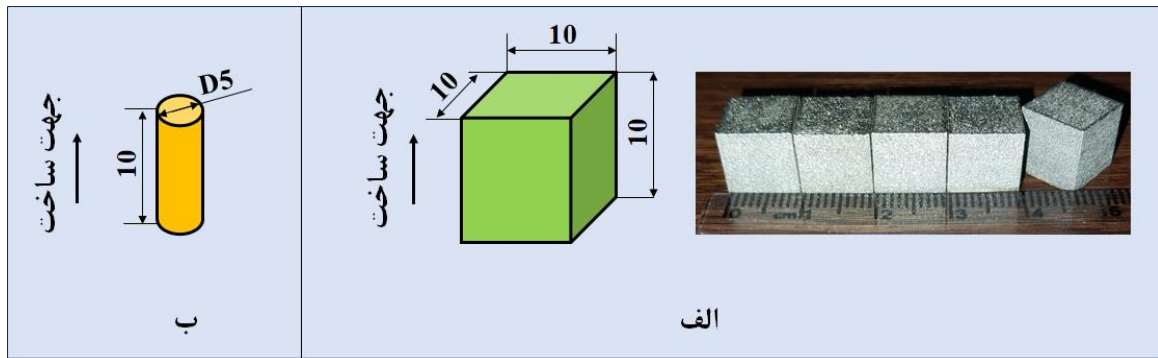
جدول ۱. مشخصات فرآیند ساخت نمونه‌ها با روش ذوب لیزری انتخابی

Table 1. Production parameters for producing samples using powder bed fusion of metals using a laser beam process

توان لیزر [W]	سرعت روبش لیزر [mm/s]	فاصله مسیره‌ها [mm]	ضخامت لایه‌ها [mm]	چگالی انرژی حجمی [J/mm ³]	استراتژی اسکن
۲۰۰	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۰۲	۴۰۰	رفت و برگشتی با چرخش ۹۰°

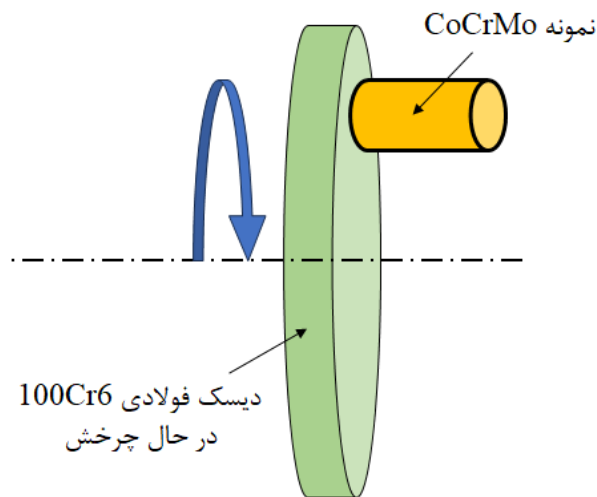
خشک و وزن شدند. دیسک فولادی 100Cr6 با سختی بیش از ۷۵۰ HV، قطر ۷۵ و ضخامت ۷ mm به عنوان زوج سایشی برای پین‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در طول آزمایش سایش، دیسک با سرعت ثابت ۸ m/s حول محور افقی خود تحت چرخش قرار گرفت. بار مورد استفاده شامل ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ N و مسافت طی شده ۵۰۰ و ۱۰۰۰ m بود. پارامترهای سایش مورد استفاده در این کار با توجه به کارهای انجام شده در مورد آلیاژهای مشابه انتخاب شدند. آزمایش در دمای اتاق و بدون حضور روانکار انجام گرفت. پس

نمونه‌های ساخته شده با روش ذوب لیزری انتخابی، در ابعاد مکعب‌های ۱۰×۱۰×۱۰ mm³ تولید شدند و در ادامه جهت بررسی رفتار سایشی، به شکل استوانه‌های به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ mm توسط دستگاه وایرکات برش داده شدند. نمونه‌های اولیه و نیز شماتیک نمونه‌های مورد استفاده برای بررسی رفتار سایشی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها از دستگاه سایش پین روی دیسک استفاده شد. نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش، با کمک اتانول و تحت امواجอัลتراسونیک تمیز شده، سپس



شکل ۲. الف) نمونه‌های اولیه ساخته شده با روش ذوب لیزری انتخابی و ب) شماتیک نمونه‌های برش داده شده جهت استفاده در آزمایش سایش.

Fig. 2. (a) The initial samples produced by powder bed fusion of metals using a laser beam process and (b) the schematic of samples cut for use in wear tests.



شکل ۳. شماتیک نشان دهنده نحوه انجام آزمایش سایش.

Fig. 3. The schematic showing the wear test.

۳- نتایج و بحث

ریزساختار نمونه‌های CoCrMo تولید شده با روش SLM قبلاً در [۵] ارائه شده است. این ریزساختار دارای ظاهر پوست ماهی‌مانند بود که این ساختار، در نتیجه هم‌پوشانی حوضچه‌های ذوب بوجود می‌آیند. تصاویر ریزساختاری در بزرگنمایی‌های بالاتر، نشان‌دهند تشکیل ساختار سلولی ریز بود. همچنین نتایج نشان داده است که ساختار یک رشد هم‌بافته با دانه‌های

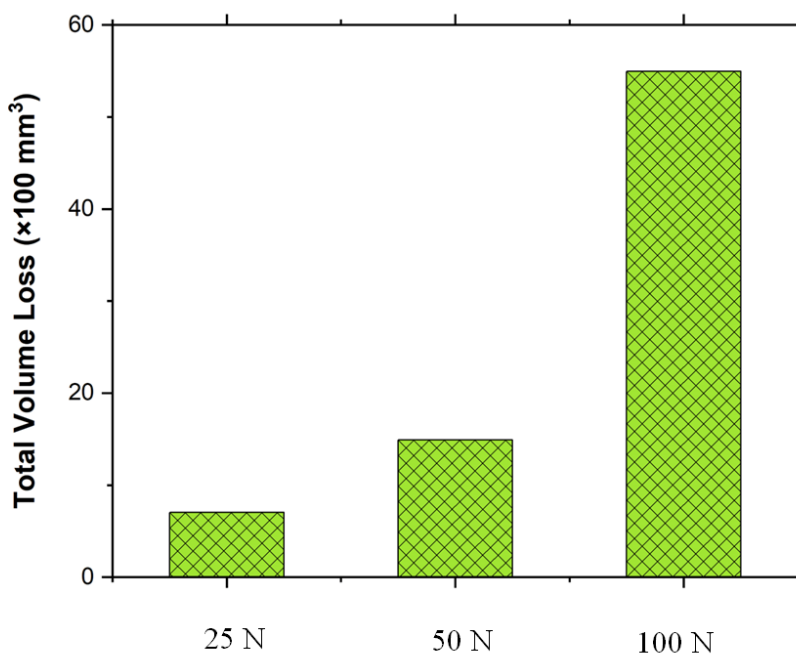
از انجام آزمایش‌ها، جرم کاسته شده توسط ترازو تعیین و با لحاظ چگالی اسمی آلیاژ برابر با $8/28 \text{ g/cm}^3$ ، حجم بخش ساییده شده محاسبه گردید. نهایتاً سطوح شکست توسط میکروسکوپ FESEM¹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

1. Field Emission Scanning Electron Microscopes

جدول ۲. مقادیر کاهش حجم ماده (mm^3) برای آزمایش سایش نمونه‌های CoCrMo ساخته شده با روش SLM تحت شرایط بار اعمالی و مسافت طی شده مختلف.

Table 2. The total volume loss (mm^3) of CoCrMo samples after wear test at various conditions of applied force and sliding distance.

مسافت طی شده (m)	بار اعمالی (N)		
	۲۵	۵۰	۱۰۰
۵۰۰	۷۰۰	۱۴۹۰	۵۵۰۰
۱۰۰۰		۲۵۲۰	

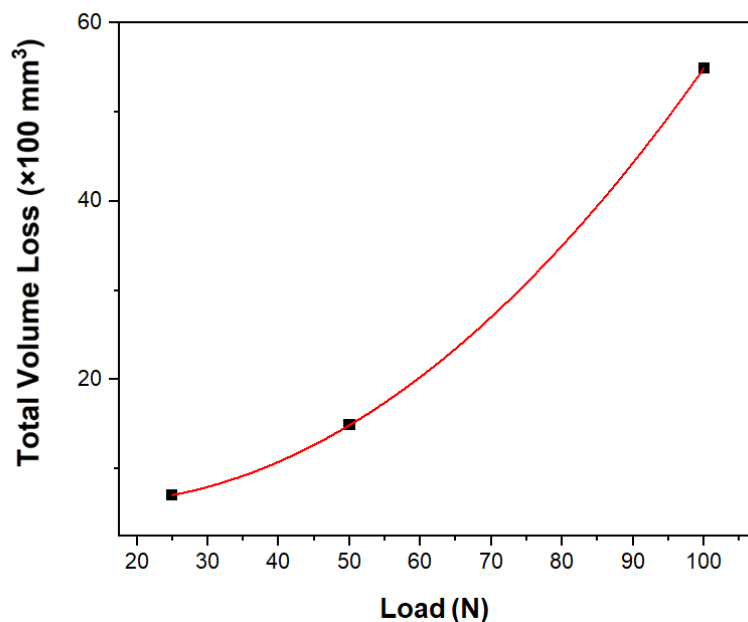


شکل ۴. مقادیر کاهش حجم ماده برای آلیاژ CoCrMo تحت سایش با مسافت ۵۰۰ m.

Fig. 4. The total volume loss of CoCrMo samples after wear test with a sliding distance of 500 m.

۷۰۰ از حجم خود را در طول سایش از داده است، در حالی که این مقدار برای بار ۵۰ N و ۱۰۰ N به ترتیب برابر حدود ۱۵۰۰ و 5500 mm^3 به دست آمد. به عبارتی با افزایش بار اعمالی از ۲۵ به ۵۰ N، مقدار سایش $2/14$ برابر و با افزایش بار از ۲۵ به ۱۰۰ N مقدار سایش $7/86$ برابر شده است و افزایش نیرو از ۵۰ به ۱۰۰ N باعث افزایش $3/67$ برابری مقدار سایش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که در مقادیر نیروی بالا، مقدار سایش با افزایش نیروی اعمالی، به صورت تصاعدی و نه به صورت

کشیده که از چندین حوضچه ذوب عبور می‌کنند را تجربه می‌کند. نتایج آزمایش سایش بین روی دیسک برای نمونه‌های CoCrMo ساخته شده با روش SLM تحت شرایط بار اعمالی و مسافت طی شده مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. برای مقایسه بهتر بین نتایج، نمودار ستونی نشان دهنده مقادیر کاهش حجم نمونه‌ها تحت شرایط بار اعمالی مختلف، در شکل ۴ نیز آورده شده است. این نمودار برای مسافت طی شده ۵۰۰ m رسم شده است. ملاحظه می‌شود که نمونه تحت بار ۲۵ N فقط 7 mm^3



شکل ۵. رگرسیون منحنی نشان‌دهنده تغییرات کاهش حجم کلی سایش به صورت تابعی از بار اعمالی.

Fig. 5. The regression curve indicating the variation of total volume loss as a function of the applied force.

جهت بررسی تاثیر زمان ساییدگی بر مقدار و سازوکار سایش، نمونه‌های CoCrMo تولید شده به روش SLM تحت سایش با مسافت‌های ۵۰۰ m و ۱۰۰۰ m قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها، نیروی اعمالی به صورت ثابت برابر ۵۰ N در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به مقدار سایش صورت گرفته در شکل ۶ آورده شده است. در این شکل مقدار اتلاف ماده برای سطوح ساییده شده در دو مسافت ۵۰۰ m و ۱۰۰۰ m به صورت نمودار ستونی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مسافت سایش از ۵۰۰ m به ۱۰۰۰ m، مقدار کاهش حجم ماده از ۱۴۹۰ به ۲۵۲۰ mm³ افزایش یافته است. به عبارتی افزایش ۱/۷ برابری مشاهده می‌شود.

به منظور مطالعه تاثیر نیروی اعمالی و مسافت طی شده روی ساز و کار سایش، تصاویر SEM نمونه‌های ساییده مورد ارزیابی قرار گرفتند. این تصاویر در شکل ۷ آورده شده اند. در شکل ۷-الف سطح نمونه CoCrMo تحت سایش قرار گرفته با نیروی ۵۰ N و مسافت ۵۰۰ m متر آورده شده است. در این تصویر، فلش‌های سفید رنگ شیارهای ایجاد شده ناشی از سایش و فلش‌های زرد رنگ محصولات ناشی از سایش که از سطح جدا شده‌اند را نشان می‌دهند. اینکه سرتاسر سطح، مملو از شیارها و خیش‌های سایشی است، نشانگر این است که ساز و کار اصلی سایش در این شرایط، سایش خراشان بوده است. با مقایسه شکل الف و ب می‌توان دید که با

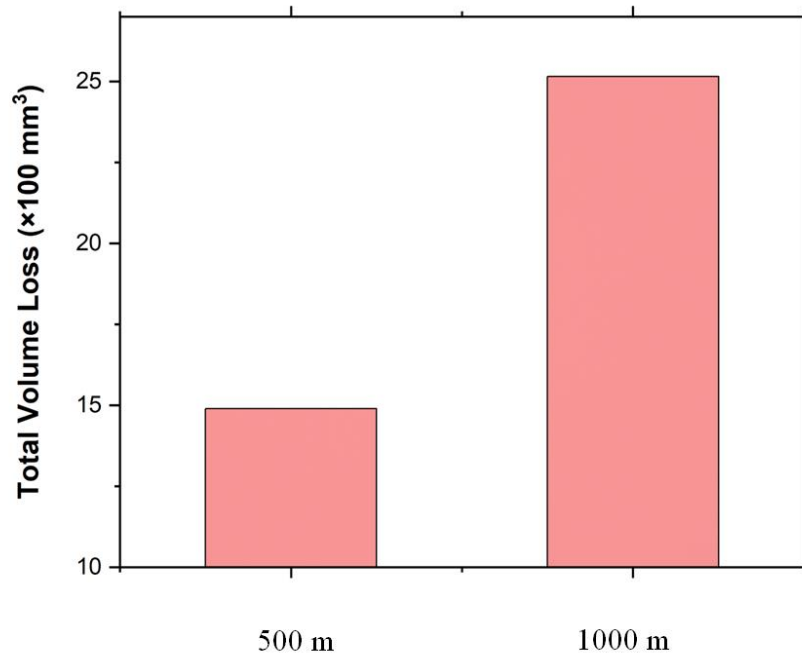
خطی افزایش می‌یابد. فو^۱ و همکاران [۱۸] نشان داده‌اند که نمونه‌های Co-Cr ساخته شده با روش SLM مقاومت سایشی بهتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با روش ریخته‌گری دارند. این موضوع می‌تواند به ریزساختار ظریف حاصل از SLM نسبت داده شود.

در ادامه تلاش شد تا رفتار سایشی ماده به صورت تابعی از مقدار نیروی اعمالی مدلسازی شود. شکل ۵ نتایج رگرسیون غیر خطی داده‌های مربوط به کاهش حجم کلی سایش را برای نمونه‌های سایش تحت بار ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ N را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که چند جمله‌ای درجه ۲ نسبت داده شده، بخوبی روی نقاط تجربی قرار گرفت. این چند جمله‌ای با مقدار خطای R² برابر ۱ بدست آمد که گویای مدلسازی دقیق رفتار ماده است. معادله ۱ این چند جمله‌ای را نشان می‌دهد.

$$T.V.L = 0.006 F^2 - 0.173 F + 7.313 \quad (1)$$

که در این معادله، T.V.L مقدار کاهش حجم کلی حین سایش (بر حسب mm³) و F نیروی وارده (بر حسب N) می‌باشند.

2. Fu



شکل ۶. مقدار کاهش حجم ماده برای سطوح CoCrMo تحت سایش قرار گرفته در مسافت‌های مختلف تحت نیروی ثابت ۵۰ N.

Fig. 6. The total volume loss of CoCrMo samples worn at various sliding distances under a force of 50 N.

مناطق و جدا شدن آن‌ها شوند (فلش‌های زرد رنگ). امانو [۱۷] معتقد است که بخش‌های جدا شده در طول سایش می‌تواند ناشی از ایجاد شیارهای سایشی باشد که بخش‌های اطراف این شیارها به علت برآمده بودن، حین سایش جدا می‌شوند. ساز و کار چسبان توام با خراشان توسط کورناکچیا^۲ و همکاران [۲۰] برای آلیاژ CoCrMo تولید شده توسط روش SLM نیز گزارش شده است. البته شرایط سایش به کار رفته توسط آن‌ها نسبت به شرایط این مقاله بسیار خفیف بوده است (نیروی ۵ N و مسافت ۵۰ m). همچنین وارول^۳ و همکاران [۲۱] با بررسی سایش رفت و برگشتی آلیاژ CoCrMoW تولید شده به روش SLM تحت بار ۵ N، ساز و کار سایش ترکیبی شامل خراشان، چسبان و تغییر شکل پلاستیک را گزارش کرده‌اند. تفاوت ساز و کار گزارش شده توسط ایشان با کار حاضر را می‌توان به اعمال عملیات حرارتی پس از تولید توسط ایشان مرتبط دانست که منجر به تغییر ریزساختار و خواص آلیاژ شده است.

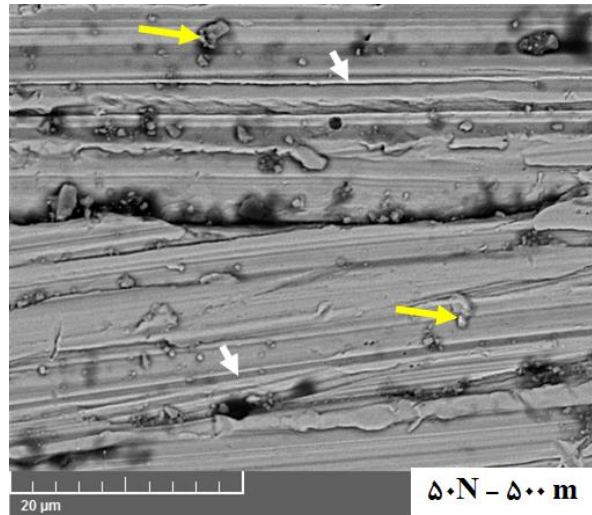
جهت بررسی بیشتر ساز و کار سایش، از ذرات ساییده و کنده شده در

نمونه نمونه تحت سایش ۱۰۰۰ m - ۵۰ N قرار گرفته، تصویر FE-SEM

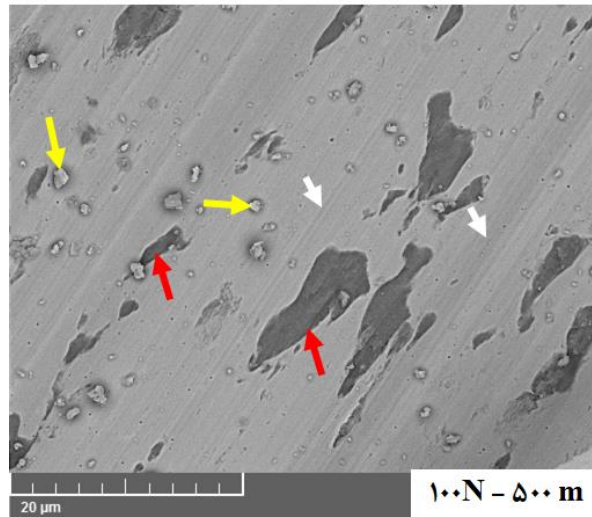
1. Amanov
2. Cornacchia
3. Varol

افزایش نیروی اعمالی به جای اینکه خراش‌های ایجاد شده عمیق‌تر شوند، از عمق این شیارها کاسته شده است. نکته حائز اهمیت در شکل ب این است که بخش‌های زیادی از سطح، بر اثر سایش، از سطح جدا شده‌اند. کم عمق بودن شیارها و جدا شدن بخش‌هایی از سطح، این موضوع را نشان می‌دهد که با افزایش نیرو، ساز و کار سایش از خراشان به چسبان تغییر یافته است. در واقع با افزایش نیرو، دمای سطح افزایش یافته [۱۹]، سطح به شدت اکسید شده و این لایه‌های اکسیدی سخت، مانع از ایجاد خراش‌های عمیق می‌شوند. در نتیجه اعمال نیرو، بخش‌هایی از سطح به ساییده چسبیده، با ادامه چرخش دیسک، این سطوح سخت و ترد از سطح ماده جدا شده‌اند.

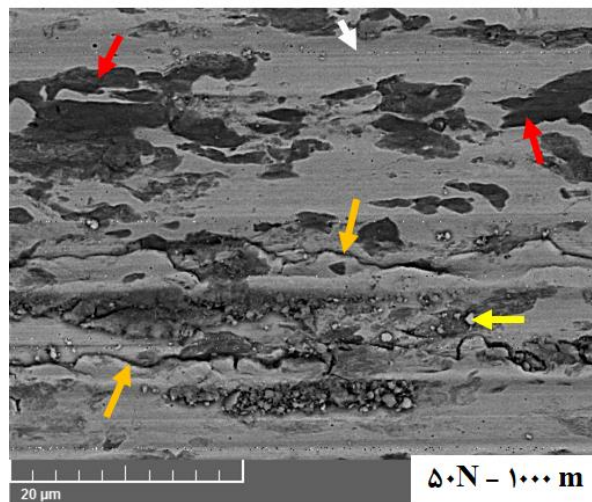
در شکل ۷-ج تصویر FE-SEM از سطح ساییده شده نمونه تحت بار ۵۰ N و مسافت ۱۰۰۰ m آورده شده است. با مقایسه این شکل با تصویر الف می‌توان گفت که با افزایش مسافت سایش، ساز و کار سایش از سایش خراشان شدید با شیارهای عمیق به سایش خراشان خفیف (با شیارهای کم عمق) و چسبان تبدیل شده است. به عبارتی با افزایش زمان ساییدگی، سطوح اکسید می‌شوند و با تشکیل این سطوح سخت، شیارهای تشکیل شده کم عمق می‌شوند. از طرف دیگر شکل ج نشان می‌دهد که با افزایش سایش، ترک‌هایی در امتداد مسیر ساییدگی ایجاد شده‌اند (به فلش‌های نارنجی دقت شود) که این ترک‌ها می‌توانند باعث شکست برخی



الف



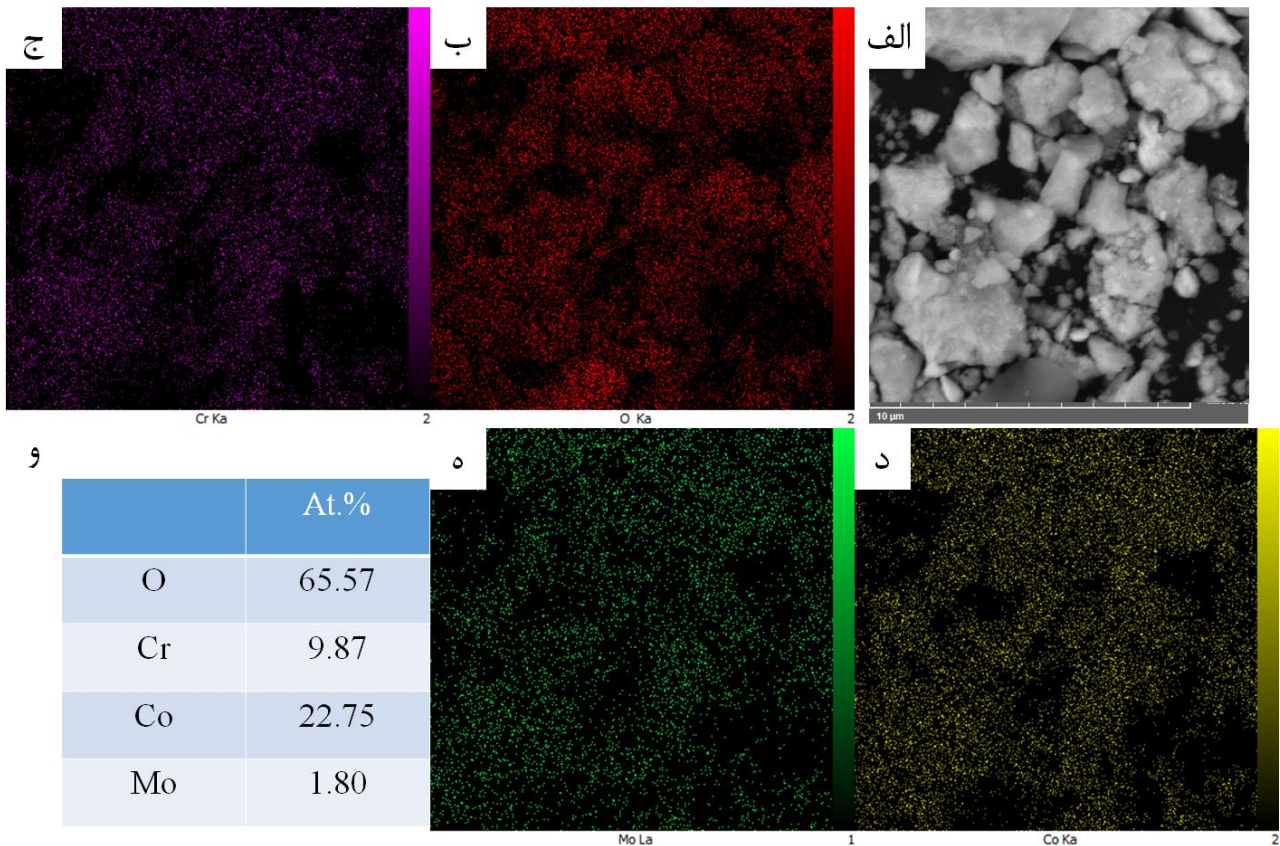
ب



ج

شکل ۶. مقدار کاهش حجم ماده برای سطوح CoCrMo تحت سایش قرار گرفته در مسافت‌های مختلف تحت نیروی ثابت ۵۰ N.

Fig. 6. The total volume loss of CoCrMo samples worn at various sliding distances under a force of 50 N.



شکل ۸. (الف) تصویر FE-SEM از ذرات ساییده و جدا شده از سطح نمونه تحت سایش $50\text{ N} - 1000\text{ m}$ قرار گرفته، (ب) تا (ه) نتایج آنالیز نقشه EDS استخراج شده برای توزیع عناصر به ترتیب O، Cr، Co و Mo و (و) نتایج آنالیز EDS برای کل ذرات نشان داده شده در بخش (الف).

Fig. 8. (a) The FE-SEM image of worn and separated particles from the surface of sample under the condition of 50N-1000m, (b) to (e) the results of EDS-map extracted to show the distribution of O, Cr, Co and Mo, respectively, and (f) the EDS-point analysis for particles shown in (a).

این موضوع تحلیل قبلی صورت گرفته براساس مشاهدات سطوح سایش نمونه تحت سایش $50\text{ N} - 1000\text{ m}$ قرار گرفته را تایید می‌کند.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله نمونه‌های CoCrMo تولید شده با روش SLM تحت سایش بین روی دیسک با نیروی اعمالی و مسافت مختلف قرار گرفتند و نتایج زیر به دست آمدند:

۱- نتایج نشان دادند که با افزایش بار اعمالی از ۲۵ به ۵۰ N، مقدار کاهش حجم ماده $2/14$ برابر و با افزایش بار از ۲۵ به ۱۰۰ N مقدار سایش $7/86$ برابر می‌شود که نشان‌دهنده افزایش تصاعدی حجم سایش با افزایش نیرو است.

۲- تغییرات مقدار سایش نسبت به نیروی اعمالی به خوبی با یک معادله

و نیز آنالیز EDS^۱ تهیه شد. شکل ۸ تصویر SEM و نتایج آنالیز نقشه EDS استخراج شده برای توزیع عناصر O، Cr، Co و Mo و نیز نتایج آنالیز EDS برای کل ذرات را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ذرات کنده شده با اندازه‌های مختلف از زیر $0/2$ میکرون تا نزدیک ۴ میکرون می‌باشند. ظاهر ذرات که گوشه‌دار هستند نشان می‌دهد که این ذرات از سختی بالایی برخوردار هستند که در طول سایش، که مابین دیسک و نمونه CoCrMo تحت بار قرار گرفته‌اند، تیزی گوشه‌های خود را از دست نداده‌اند. نتایج آنالیز EDS نشان می‌دهد که درصد بالایی از ترکیبات این ذرات از اکسیژن تشکیل شده است (بیش از ۶۵٪ ترکیب شیمیایی به عنوان اکسیژن شناخته شده است: شکل ۸-۹). بنابراین این ذرات، ذرات اکسیدی تولید شده حین سایش می‌باشد که به علت سختی و تردی بالا، براحتی از سطح جدا شده‌اند.

4. Energy dispersive X-ray spectroscopy

- [6] S.J. Han, G.B. Bang, W.R. Kim, G.H. Kim, H.-S. Kang, H.S. Han, T.W. Lee, H.G. Kim, Effect on microstructural and mechanical properties of selective laser melted pure Ti parts using stress relief heat-treatment process, *J. Mater. Res. Technol.* 27 (2023) 200–208.
- [7] S. Raghavendra, A. Molinari, V. Fontanari, V. Luchin, G. Zappini, M. Benedetti, F. Johansson, J. Klarin, Tensile and compression properties of variously arranged porous Ti-6Al-4V additively manufactured structures via SLM, *Procedia Struct. Integr.* 13 (2018) 149–154.
- [8] A. Takaichi, Y. Kajima, H.L. Htat, N. Wakabayashi, Influences of Different Selective Laser Melting Machines on the Microstructures and Mechanical Properties of Co–Cr–Mo Alloys, *Appl. Sci.* 14 (2024) 6576.
- [9] P. Pawar, A. Kumar, R. Ballav, Cobalt-Chromium Alloy Additive Manufacturing Technologies for Biomedical Applications, in: *Adv. Addit. Manuf.*, Wiley Online Library, 2024: pp. 109–120.
- [10] Z. Guoqing, Y. Yongqiang, S. Changhui, F. Fan, Z. Zimian, Study on Biocompatibility of CoCrMo Alloy Parts Manufactured by Selective Laser Melting, *J. Med. Biol. Eng.* 38 (2018) 76–86.
- [11] T.-N. Lam, K.-M. Chen, C.-H. Tsai, P.-I. Tsai, M.-H. Wu, C.-C. Hsu, J. Jain, E.-W. Huang, Effect of Porosity and Heat Treatment on Mechanical Properties of Additive Manufactured CoCrMo Alloys, *Materials (Basel)*. 16 (2023) 751–768.
- [12] Y. Zhang, W. Lin, Z. Zhai, Y. Wu, R. Yang, Z. Zhang, Enhancing the mechanical property of laser powder bed fusion CoCrMo alloy by tailoring the microstructure and phase constituent, *Mater. Sci. Eng. A.* 862 (2023) 144449.
- [13] L. Tonelli, M.M.Z. Ahmed, L. Ceschini, A novel heat treatment of the additively manufactured Co28Cr6Mo biomedical alloy and its effects on hardness, microstructure and sliding wear behavior, *Prog. Addit. Manuf.* 8 (2023) 313–329.
- [14] Y. Gan, M. Zhou, C. Ji, G. Huang, Y. Chen, L. Li, T. Huang, Y. Lu, J. Lin, Tailoring the tribology property and corrosion resistance of selective laser melted CoCrMo alloys by varying copper content, *Mater. Des.* 228 (2023) ۲ با دقت بالا مدلسازی شد.
- ۳- مشاهده شد که با افزایش نیروی اعمالی، ساز و کار سایش از خراشان شدید به چسبان تغییر می‌یابد. این تغییر به تشکیل سطوح اکسیدی سخت روی سطح ماده نسبت داده شد.
- ۴- نتایج نشان داد که با افزایش مسافت سایش، مقدار حجم سایش یافته ۱/۷ برابر افزایش می‌یابد.
- ۵- بررسی سطوح ساییده نشانگر این موضوع بود که با افزایش مسافت سایش، ساز و کار سایش از خراشان شدید به خراشان خفیف و چسبان تغییر می‌یابد. ایجاد ترک و جدا شدن بخش‌هایی از ماده نیز در مسافت‌های طولانی مشاهده شدند.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه صنعتی سهند جهت در اختیار گذاشتن امکان انجام آزمایش‌ها تشکر می‌نمایند.

منابع

- [1] A. Mace, P. Khullar, C. Bouknight, J.L. Gilbert, Corrosion properties of low carbon CoCrMo and additively manufactured CoCr alloys for dental applications, *Dent. Mater.* 38 (2022) 1184–1193.
- [2] S. Mazumder, K. Man, M. Radhakrishnan, M. V. Pantawane, S. Palaniappan, S.M. Patil, Y. Yang, N.B. Dahotre, Microstructure enhanced biocompatibility in laser additively manufactured CoCrMo biomedical alloy, *Biomater. Adv.* 150 (2023) 213415.
- [3] L.G. de la Cruz, P. Alvaredo, J.M. Torralba, M. Campos, Material extrusion: A promising tool for processing CoCrMo alloy with excellent wear resistance for biomedical applications, *Mater. Des.* 244 (2024) 1–13.
- [4] J.I. Zuchuat, A.S. Manzano, V. Sigot, G.L. Miño, O.A. Decco, Bone improvement in osteoporotic rabbits using CoCrMo implants, *Eng. Regen.* 5 (2024) 495–504.
- [5] M. Nabizadeh Dizaj, M. Azarbarmas, A. Abdi, The influence of heat treatment on the microstructure, hardness, and wear properties of CoCrMo alloy produced by powder bed fusion of metals using a laser beam (PBF-LB/M) process, *Prog. Addit. Manuf.* 9 (2024) 1–14.

- of Co-Cr dental alloys fabricated with CAST and SLM techniques, *Materials (Basel)*. 15 (2022) 3263.
- [19] G. Straffelini, M. Pellizzari, A. Molinari, Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material, *Wear*. 256 (2004) 754–763.
- [20] G. Cornacchia, S. Cecchel, D. Battini, C. Petrogalli, A. Avanzini, Microstructural, mechanical, and tribological characterization of selective laser melted CoCrMo alloy under different heat treatment conditions and hot isostatic pressing, *Adv. Eng. Mater.* 24 (2022) 2100928.
- [21] T. Varol, H.C. Aksa, F. Yıldız, S.B. Akçay, G. Kaya, M. Beder, Influence of post processing on the mechanical properties and wear behavior of selective laser melted Co-Cr-Mo-W alloys, *Tribol. Int.* 192 (2024) 109336.
- 111869.
- [15] J. Chen, X. Ding, J. Wang, Z. Xie, S. Wang, Corrosion behavior, metal ions release and wear resistance of TiN coating deposited on SLM CoCrMo alloy by magnetron sputtering, *J. Alloys Compd.* 1002 (2024) 175318.
- [16] H. Li, M. Wang, D. Lou, W. Xia, X. Fang, Microstructural features of biomedical cobalt–chromium–molybdenum (CoCrMo) alloy from powder bed fusion to aging heat treatment, *J. Mater. Sci. Technol.* 45 (2020) 146–156.
- [17] A. Amanov, Effect of post-additive manufacturing surface modification temperature on the tribological and tribocorrosion properties of Co-Cr-Mo alloy for biomedical applications, *Surf. Coatings Technol.* 421 (2021) 127378.
- [18] W. Fu, S. Liu, J. Jiao, Z. Xie, X. Huang, Y. Lu, H. Liu, S. Hu, E. Zuo, N. Kou, Wear resistance and biocompatibility

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Nabizadeh , M. Azarbarmas, A. Abdi, *Investigation on Tribological Behavior of CoCrMo Alloy Fabricated by Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam Process, Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(12) (2025) 1629-1642.

DOI: [10.22060/mej.2025.23789.7813](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23789.7813)

