

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اثر افزایش کبالت بر بهبود رفتار سایشی آلیاژ آنتروپی بالای FeNiCrMnCo_x تولید شده به روش SPS

مقاله پژوهشی

عرفان بیگدلوئی وطن^۱، مهدی سلیمی^{۲*}

۱- گروه علوم و مهندسی مواد، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲- گروه علوم و مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان، زنجان، ایران.

* mehdi.salimi1383@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱	آلیاژ آنتروپی بالای FeNiCrMnCo_x به روش آسیاب گلوله‌ای و SPS در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در درصد‌های مختلف کبالت (۰/۳ و ۰/۱) ساخته شد. نتایج حاصل از ساختاری فازی نشان داد برای نمونه آسیاب شده صفحات مربوط به محل جامد FCC ایجاد شده است و در اثر فرآیند SPS پیک‌های مذکور ایجاد شده است با این تفاوت که پیک‌های مربوط به صفحات (۱۱۱) و (۲۰۰) مقداری به سمت راست شیف‌ت پیدا کرده‌اند. نتایج حاصل از میکروسختی نشان داد افزایش کبالت در محلول جامد باعث افزایش ۳۰ درصدی میکروسختی می‌شود. این افزایش در میکروسختی تنها مکانیسمی است که مقاومت در برابر سایش را برای نمونه HEA-0.1Co افزایش می‌دهد. نتایج ضربه اصطکاک نیز نشان داد مقدار آن از ۰/۷ به ۰/۶ برای نمونه HEA-0.3Co کاهش پیدا کرده است که این نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر سایش برای نمونه HEA-0.3Co است. همچنین مکانیسم سایش برای نمونه HEA-0.1Co از نوع ترکیبی از لایه اکسیدی و سایش خراشان بود درحالی‌که افزایش مقدار کبالت باعث تغییر مکانیسم سایش از خراشی به لایه اکسیدی می‌شود.
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵	
کلیدواژگان:	
آلیاژ آنتروپی بالا	
اسپارک پلاسما سینترینگ	
سایش	
آسیاب گلوله‌ای.	

The Effect of Cobalt Addition on the Improvement of Wear Behavior of FeNiCrMnCo_x High Entropy Alloy Produced by SPS Method

Erfan Bigdeloyevatan¹, Mehdi Salimi^{2*}

1. Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Materials Science and Engineering, Islamic Azad university of Zanjan, Zanjan, Iran.

* mehdi.salimi1383@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

High Entropy Alloy

Spark Plasma Sintering

Wear

Ball Milling.

Abstract

The FeNiCrMnCo_x high entropy alloy (HEA) was fabricated using mechanical alloying and Spark Plasma Sintering (SPS) at a temperature of 1100°C with different cobalt contents (0.1 and 0.3). The results from phase structural analysis indicated that the milled samples exhibited FCC solid solution phases, and after the SPS process, the corresponding peaks were formed, with the (111) and (200) peaks shifting slightly to the right. Microhardness tests showed that increasing the cobalt content in the solid solution led to a 30% increase in microhardness. This increase in microhardness is the main mechanism contributing to the wear resistance of the HEA-0.1Co sample. The friction coefficient results also revealed a decrease from 0.7 to 0.6 for the HEA-0.3Co sample, indicating improved wear resistance for this composition. Furthermore, the wear mechanism for the HEA-0.1Co sample was a combination of oxide layer and abrasive wear, while increasing the cobalt content changed the wear mechanism from abrasive to oxide layer wear.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Erfan Bigdeloyevatan, Mehdi Salimi, The Effect of Cobalt Addition on the Improvement of Wear Behavior of FeNiCrMnCo_x High Entropy Alloy Produced by SPS Method, New Process in Material Engineering, 2025, 19(3), 37-43.

۱- مقدمه

مفهوم طراحی سیستم‌های آلیاژی سنتی که شامل یک یا دو عنصر به عنوان عنصر اصلی و مقدار کمی از عناصر آلیاژی است، به شدت توسعه سیستم‌های آلیاژی را محدود کرده است. این سیستم‌های آلیاژی محدود توانسته‌اند نیازهای علم و فناوری مدرن را برای عملکرد مواد فلزی برآورده کنند. در سال ۲۰۰۴، آلیاژهای با آنترویی بالا معرفی شدند. مفهوم طراحی عناصر اصلی متعدد (پنج یا بیشتر) درجه آزادی ترکیب آلیاژ را افزایش می‌دهد و این امر موجب می‌شود که آلیاژها در ناحیه مرکزی نمودار فاز به ناحیه‌ای قابل کاوش تبدیل شوند و سیستم آلیاژی را گسترش دهد [۱-۲]. در عین حال، HEAs دارای خواص منحصر به فردی هستند که با خواص آلیاژهای سنتی متفاوت است، از جمله اثر آنترویی بالا (ترمودینامیکی)، انتشار هیستریسی (کینتیکی)، اثر اعوجاج شبکه (ساختاری) و اثر کوکتل (عملکردی). این ویژگی‌ها باعث می‌شود آلیاژهای با آنترویی بالا خواص ساختاری و عملکردی برتری نسبت به آلیاژهای سنتی از خود نشان دهند، مانند استحکام بالا، چقرمگی زیاد، مقاومت خوب در برابر خوردگی، مقاومت عالی در برابر خستگی و خواص ضد تابش [۳]. مقاومت به سایش یکی از خواص حیاتی HEAs است که به دلیل ترکیب چند عنصری و ساختارهای میکروسکوپی ویژه‌ای که دارند، به وجود می‌آید. این آلیاژها معمولاً ترکیبی از عناصر مختلف را شامل می‌شوند که باعث بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی آنها می‌شود. از جمله مشخصه‌های سایش HEAs می‌توان سختی بالا، پایداری حرارتی، توزیع یکنواخت عناصر و مکانیسم‌های تقویت HEAs را اشاره کرد. آلیاژهای HEA اغلب دارای سختی بالایی هستند که به کاهش نرخ سایش کمک می‌کند. ترکیب چند عنصر و وجود فازهای مختلف می‌تواند به سختی و مقاومت در برابر خراش‌های سطحی منجر شود [۴]. بسیاری از HEAs در دماهای بالا عملکرد مناسبی دارند، که این امر موجب افزایش دوام آنها در شرایط عملیاتی سخت می‌شود. توزیع یکنواخت عناصر در ساختار

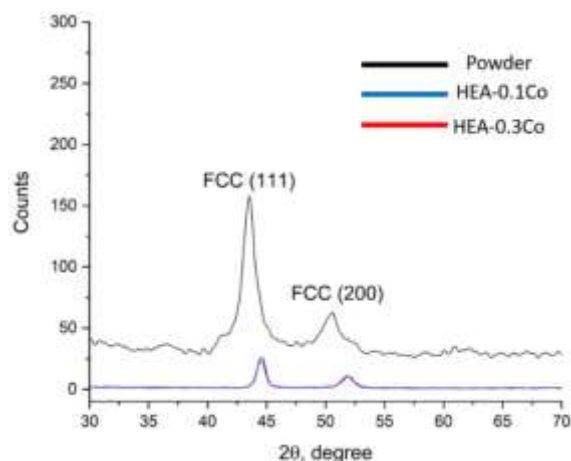
میکروسکوپی HEAs به مقاومت بهتر آنها در برابر سایش کمک می‌کند [۳]. این توزیع به بهبود پایداری و کاهش نقاط ضعف در ساختار آلیاژ منجر می‌شود. همچنین وجود مکانیسم‌های تقویت، مانند تقویت بین سطحی و رسوب، می‌تواند به افزایش مقاومت به سایش در HEAs کمک کند. این مکانیسم‌ها موجب افزایش مقاومت در برابر آسیب‌های ناشی از سایش می‌شوند. از طرفی، این آلیاژها به دلیل ترکیب متنوع خود، معمولاً در برابر شرایط محیطی مختلف، از جمله خوردگی و اکسیداسیون، مقاوم‌تر هستند که این ویژگی نیز به کاهش سایش کمک می‌کند [۵]. این خواص باعث می‌شود که آلیاژهای HEA به عنوان گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای صنعتی با نیاز به مقاومت بالا در برابر سایش شناخته شوند. به طور کلی مکانیسم‌هایی که می‌توانند در آلیاژهای آنترویی بالا مورد مطالعه قرار گیرند شامل مکانیسم‌های هال-پچ، نابجایی، محلول جامد و پراکنده سختی است [۶].

در پژوهش‌های پیشین خواص سایشی آلیاژهای مختلفی مانند AlCoCrFeNiMo0.5Ni [۷]، CoCrFeNiCu [۸]، AlCoCrCuFeNi [۹]، AlCrFeNiTi [۱۰] و CoCrFeMnNi [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است؛ که معمولاً با متغیر قرار دادن یکی از عناصر رفتار سایشی آلیاژ HEA را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در کارهای جدیدتر از تقویت‌کننده‌های سرامیکی مانند گرافن [۱۲]، کاربید تنگستن [۱۳]، کاربید تیتانیوم [۱۴]، زیرکونیا [۱۵] و کاربید سیلیکون [۱۶] به منظور بهبود مقاومت در برابر سایش با استفاده از مکانیسم پراکنده سختی در اثر کامپوزیت سازی استفاده شده است. در میان روش‌های مختلف روش SPS برای ساخت آلیاژهای HEA به دلیل اصلاح میکروساختار، کاهش عیوب ساختاری، سرعت فرآیند و کنترل بهتر بر روی ترکیب و نسبت عنصری نسبت به روش‌های ریخته‌گری ترجیح داده می‌شود [۱۷]. تا آنجایی که ما می‌دانیم تاکنون رفتار سایشی آلیاژ FeCoNiCrMn مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش برای اولین بار مقاومت در برابر سایش آلیاژ FeNiCrMnCo_x با متغیر قرار دادن عنصر کبالت در درصدهای مختلف (۰/۱ و ۰/۳) مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر

پین آزمایشی استوانه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر بود. نمونه‌ها قبل از آزمون سایش به‌طور کامل سنباده‌زنی شدند و سطح آن‌ها آینه‌ای شد تا مرحله آب‌بندی اولیه^۲ مسافت کمتری را به خود اختصاص دهد. سپس نمونه‌ها توسط آب مقطر و الکل شسته شده و خشک شدند تا سطح آن‌ها عاری از چربی و هر آلودگی باشد.

۳- نتایج و بحث

الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه پودری آسیاب شده در ۳۰ ساعت و نمونه‌های SPS شده در دمای ۱۱۰۰ درجه در شکل (۱) نشان داده شد. نتایج نشان داد در حالت پودری محلول جامد FCC در صفحات (۱۱۱) و (۲۰۰) ایجاد شده است. در نمونه‌های جامد پیک‌ها مقداری به سمت راست شیفت پیدا شده است دلیل این امر نسبت داده می‌شود به دلیل کرنش در اثر عملیات SPS نسبت داده می‌شود [۱۸]. در نمونه‌های آلیاژ آنترویی بالا تفاوتی در شدت و پهنای پیک‌ها بین‌های فولادی با روش پین روی ایجاد نشده است. در اثر SPS نیز محلول جامد ایجاد شده FCC نسبت به نمونه پودری تفاوت قابل توجهی پیدا نکرده است. در شکل (۲)، طیف EDS حاصل از پودر نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد تمامی عناصر Fe, Co, Cr, Ni, Mn در ترکیب موجود می‌باشد. تأثیر نقش افزایش عنصر کبالت میکروسختی متوسط HEA-0.1Co و HEA-0.3Co به ترتیب حدود ۴۳۴ و ۵۶۳ ویکرز است. افزایش سختی به دلیل افزایش مقدار کبالت در زمینه آلیاژ منجر به افزایش سختی شده است.

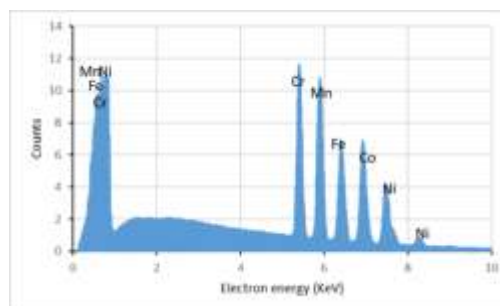


آن بر خواص ریزساختاری و تریبولوژی آلیاژ FeCoNiCrMn مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

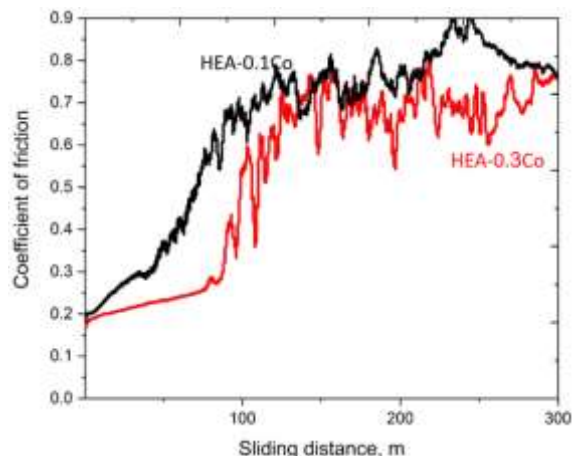
در این مطالعه، پودرهای آلیاژ FeCoNiCrMn، به روش آسیاب گلوله‌ای مخلوط شده، سپس تحت عملیات آسیاب گلوله‌ای توسط دستگاه آسیاب سیاره‌ای قرار گرفتند. جنس گلوله‌ها و دیواره محفظه آسیاب، از جنس فولاد زنگ نزن استفاده شد. برای جلوگیری از چسبندگی مخلوط پودری کلوخه شدن از ۱ درصد وزنی استاریک اسید استفاده شد. آسیاب گلوله‌ای یا آسیاب سیاره‌ای با نسبت وزنی ساچمه به پودر ۱۵:۱ در اتمسفر آرگون، با سرعت چرخش ۳۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ساعت انجام شد. برای ساخت نمونه‌های جامد از روش SPS استفاده شد. مخلوط پودری، در محفظه درون قالب گرافیتی با قطر ۱/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر قرار گرفت. قالب حاوی مخلوط پودری، در محفظه دستگاه قرار گرفت. سپس با توجه به نقطه ذوب مخلوط پودری، دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به همراه فشار ۲۰ مگاپاسکال در مدت زمان ۵ دقیقه، به مخلوط پودری در محفظه خلأ وارد شد. سطوح این نمونه‌های جامد حاوی اکسید فلزی بودند و باید قبل از انجام هر مشخصه‌یابی و آزمون از بین می‌رفتند. به همین منظور نمونه‌ها با ورق‌های سنباده سلیکون کاربید تحت عملیات سنباده‌زنی قرار گرفتند و سپس پولیش شدند. مورفولوژی سطحی و آنالیز عنصری نمونه‌های پودری و نمونه‌های جامد توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی روبشی مجهز به تفکیک انرژی پرتوایکس مدل MIRA3 ساخت کشور چک، کمپانی TESCAN مشخصه‌یابی شد. به‌منظور مطالعه فازی و همچنین اثبات تشکیل محلول جامد مربوط به آلیاژ HEA، از آزمون پراش اشعه ایکس توسط دستگاه مدل D8 advanced Bruker استفاده شد. آلیاژهای آنترویی بالا ساخته‌شده به روش SPS، تحت نیرو ۱۰ نیوتن در معرض سایش لغزشی در برابر ساینده دیسک^۱ (سیستم آزمون سایش اصطکاکی متقابل)، مدل Neo-Tribo RFW160 قرار گرفتند. جسم ساینده

شکل (۱): طیف XRD از مخلوط پودر ۳۰ ساعت آسیاب شده.



شکل (۲): آنالیز عنصری از مخلوط پودر آسیاب شده.

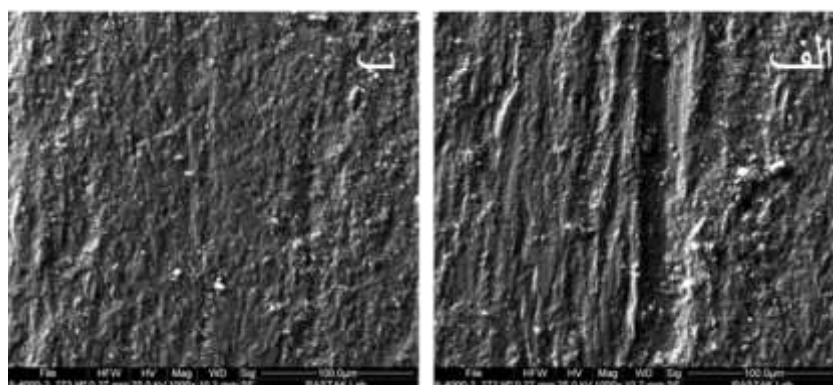
فصل مشترک همانند روانکار جامد^۴ عمل کرده و از تماس مستقیم بین ساینده با سطح سایش^۵ جلوگیری می کند در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می یابد [۲۲].



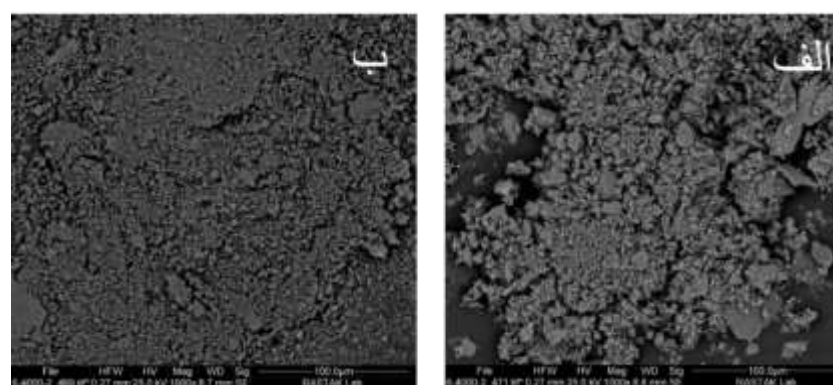
شکل (۳): تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه های HEA-0.1Co و HEA-0.3Co.

در شکل ۴، سطوح سایش مربوط به نمونه های HEA-0.1Co و HEA-0.3Co تحت نیروی نرمال ۱۰ نیوتن نشان داده شد. ظاهراً لایه اکسیدی در روی سطح هر دو نمونه ایجاد شده است. با این حال، در نمونه HEA-0.1Co خراش مشاهده می شود؛ یعنی احتمالاً سایش خراشان در این حالت ایجاد شده است. با توجه به شکل (۳) و (۴) مقاومت در برابر سایش برای نمونه HEA-0.3Co افزایش پیدا کرده است. تنها عاملی که می تواند باعث افزایش مقاومت در برابر سایش نمونه HEA-0.3Co شود افزایش میکروسختی ۳۰ درصدی نمونه HEA-0.3Co نسبت به نمونه HEA-0.1Co است. براده های سایشی حاصل از نمونه های HEA-0.1Co و HEA-0.3Co پس از سایش در برابر ساینده فولاد ۵۲۱۰۰ به ترتیب در شکل ۵ الف و ب نشان داده شد. به دلیل اینکه نمونه HEA-0.1Co مقاومت در برابر سایش کمتری دارد تغییر شکل پلاستیک بیشتری رخ داده و براده های تولید شده با اندازه بزرگ تری به دست می آید.

در شکل (۳)، تغییرات ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از فاصله لغزشی (۳۰۰ متر) برای آلیاژهای HEA-0.1Co و HEA-0.3Co تحت نیروی نرمال ۱۰ نیوتن در برابر ساینده فولاد ۵۲۱۰۰ نشان داده شد. نمودار ضریب اصطکاک مربوط به هر دو نمونه رفتار کاملاً یکسانی در تمامی مسافت های لغزشی از خود نشان می دهند. به طور کلی، مقدار متوسط ضریب اصطکاک برای نمونه HEA-0.3Co مقدار پایین تری می باشد. به عبارتی نشان دهنده مقاومت در برابر سایش بهتری است. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود تمام نمودارها دارای سه مرحله است: ۱- مرحله آب بندی اولیه ۲- ایجاد لایه تریبولوژیکی ۳- پایدار شدن لایه اکسیدی (لایه تریبولوژیکی). در نمودارهای نشان داده شده در شکل ۳، سه مرحله مذکور مشاهده می شود. البته محدوده مسافت لغزشی برای این مراحل، در نیروهای مختلف مقداری متفاوت است. مرحله آب بندی اولیه به این صورت است که در متراژ اولیه سایش، زبری سطح متمایل می شود و سطح عاری از هر ناخالصی و آلودگی شده و بکر می شود. با ادامه لغزش گرمای اصطکاکی افزایش یافته و لایه اکسیدی ایجاد می شود، لایه اکسیدی ایجاد شده ناپایدار بوده و با ادامه سایش، لایه ناپایدار شکسته شده و جزیره های تریبولوژیکی ایجاد می شود [۱۹-۲۱]. این مرحله ادامه پیدا می کند تا ضخامت لایه اکسیدی افزایش یافته و به یک حالت پایدار برسد. در نتیجه باعث متمایل شدن ضریب اصطکاک در سیکل های لغزشی بیشتر می شود. ایجاد لایه تریبولوژیکی (لایه اکسیدی) به دلیل کاهش استحکام برشی^۳



شکل (۴): سطح سایشی مربوط به نمونه‌های HEA-0.1Co (الف) و HEA-0.3Co (ب).



شکل (۵): مورفولوژی براده‌های سایشی مربوط به نمونه‌های HEA-0.1Co (الف) و HEA-0.3Co (ب).

حاصل از سطح سایش نشان داد در نمونه HEA-0.1Co مقداری سایش خراشان مشاهده شد درحالی‌که در اثر افزایش مقدار کبالت سایش خراشان بر روی سطح مشاهده نشد.

۵- منابع

- [1] E. P. George, D. Raabe & R. O. Ritchie, "High-entropy alloys", Nat. Rev. Mater, vol. 4, pp. 515–534, 2019.
- [2] Y. F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu & Y. Yang, "High-entropy alloy: challenges and prospects", Mater. Today, vol. 19, 349–362, 2016.
- [3] D. Kumar, "Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review", Prog. Mater. Sci, vol. 136, p. 101106, 2023.
- [4] S. Alvi & F. Akhtar, "High temperature tribology of CuMoTaWV high entropy alloy", Wear, vol. 426, pp. 412–419, 2019.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آلیاژ HEA-0.1Co و HEA-0.3Co به روش آسیاب گلوله‌ای و SPS ساخته شدند. نتایج نشان داد در اثر آسیاب گلوله‌ای محلول جامد FCC مربوط به صفحات (۱۱۱) و (۲۰۰) تشکیل شده است. در نمونه‌های SPS نیز همان پیک‌ها تشکیل شده است با این تفاوت که پیک‌ها به دلیل کرنش حاصل از SPS مقداری به سمت راست شیف‌ت داده شدند. به منظور بررسی خواص سایشی آزمون‌های ضریب اصطکاک و تصویر SEM از سطح سایش و براده‌های سایشی گرفته شده است. نتایج حاصل از مقاومت در برابر سایش نشان می‌دهد با افزایش ۳۰ درصدی نمونه HEA-0.1Co نسبت به نمونه HEA-0.3Co و کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۷ به ۰/۶ افزایش می‌یابد مقاومت در برابر سایش برای نمونه HEA-0.3Co که این افزایش نسبت داده می‌شود به افزایش کبالت در زمینه آلیاژ آنترویی بالا. نتایج

- [15] M. Ghanbariha, M. Farvizi, T. Ebadzadeh & A. A. Samiyan, "Effect of ZrO₂ particles on the nanomechanical properties and wear behavior of AlCoCrFeNi-ZrO₂ high entropy alloy composites", *Wear*, Vol. 484, p. 204032, 2021.
- [16] Y. Gu, M. Yi, Y. Chen, J. Tu, Z. Zhou & J. Luo, "Effect of the amount of SiC particles on the microstructure, mechanical and wear properties of FeMnCoCr high entropy alloy composites", *Mater. Charact.*, vol. 193, p. 112300, 2022.
- [17] P. Moazzen, M. R. Toroghinejad, P. Cavaliere, "Effect of Iron content on the microstructure evolution, mechanical properties and wear resistance of FeXCoCrNi high-entropy alloy system produced via MA-SPS", *J. Alloys Compd.*, vol. 870, p. 159410, 2021.
- [18] F. Akbaripana, M. Sabbaghian, N. Fakhar, P. Minárik, J. Veselý, P. T. Hung, G. Kapoor, O. Renk, K. Máthis, J. Gubicza & J. Eckert, "Influence of high pressure torsion on microstructure evolution and mechanical properties of AZ80/SiC magnesium matrix composites", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 826, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141916>.
- [19] T. D. Vo, B. Tran, A. K. Tieu, D. Wexler, G. Deng & C. Nguyen, "Effects of oxidation on friction and wear properties of eutectic high-entropy alloy AlCoCrFeNi_{2.1}", *Tribol. Int.*, vol. 160, p. 107017, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107017>.
- [20] Y. Geng, J. Chen, H. Tan, J. Cheng, J. Yang & W. Liu, "Vacuum tribological behaviors of CoCrFeNi high entropy alloy at elevated temperatures", *Wear*, vol. 456–457, p. 203368, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203368>.
- [21] M. Pole, M. Sadeghilaridjani, J. Shittu, A. Ayyagari & S. Mukherjee, "High temperature wear behavior of refractory high entropy alloys based on 4-5-6 elemental palette", *J. Alloys Compd.*, vol. 843, p. 156004, 2020.
- [22] A. Mahamood, H. A. Ahmad, T. Mayyas, A. Alrashdan & A. M. T. Hayajneh, "Wear behavior of Al – Cu and Al – Cu / SiC components produced by powder metallurgy", pp. 5368–5375, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2760-5>.
- [5] M. Kafali, K. M. Doleker, A. Erdogan, S. E. Sunbul, K. Icin, A. Yildiz & M. S. Gok, "Wear, corrosion and oxidation characteristics of consolidated and laser remelted high entropy alloys manufactured via powder metallurgy", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 467, p. 129704, 2023.
- [6] I. Basu & J. T. M. De Hosson, "Strengthening mechanisms in high entropy alloys: fundamental issues", *Scr. Mater.*, vol. 187, pp. 148–156, 2020.
- [7] Y. Wang, Y. Yang, H. Yang, M. Zhang, S. Ma & J. Qiao, "Microstructure and wear properties of nitrided AlCoCrFeNi high-entropy alloy", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 210, pp. 233–239, 2018.
- [8] A. Verma, P. Tarate, A. C. Abhyankar, M. R. Mohape, D. S. Gowtam, V. P. Deshmukh & T. Shanmugasundaram, "High temperature wear in CoCrFeNiCu high entropy alloys: The role of Cu", *Scr. Mater.*, vol. 161, pp. 28–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.10.007>.
- [9] G. Prabu, M. Duraiselvam, N. Jeyaprakash & C. H. Yang, "Microstructural evolution and wear behavior of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy on Ti–6Al–4V through laser surface alloying", *Met. Mater. Int.*, vol. 27, pp. 2328–2340, 2021.
- [10] Z. S. Nong, Y. N. Lei & J. C. Zhu, "Wear and oxidation resistances of AlCrFeNiTi-based high entropy alloys", *Intermetallics*, vol. 101, pp. 144–151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2018.07.017>.
- [11] J. Joseph, N. Haghdadi, K. Shamlaye, P. Hodgson, M. Barnett & D. Fabijanic, "The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and Al_xCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures", *Wear*, vol. 428–429, pp. 32–44, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.002>.
- [12] W. Ye, Q. Zhou, Y. Shi, M. Xie, B. Chen, H. Wang & W. Liu, "Robust wear performance of graphene-reinforced high entropy alloy composites", *Carbon N. Y.*, vol. 224, p. 119040, 2024.
- [13] R. Zhou, G. Chen, B. Liu, J. Wang, L. Han & Y. Liu, "Microstructures and wear behaviour of (FeCoCrNi)_{1-x}(WC)_x high entropy alloy composites", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 75, pp. 56–62, 2018.
- [14] Y. Cai, L. Zhu, Y. Cui, M. Shan, H. Li, Y. Xin & J. Han, "Fracture and wear mechanisms of FeMnCrNiCo₊ x (TiC) composite high-entropy alloy cladding layers", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 543, p. 148794, 2021.

۶- پی نوشت

- [1] Pin on disk

[4] Solid Lubricant
[5] Wear Surface

[2] Running in
[3] Shear Strength