



Kopási tulajdonságok vizsgálata nagy-entrópiájú ötvözetek esetében

Investigation of Wear Properties in High-Entropy Alloys

^{1,2,3}Hareancz Ferenc, ^{1,2,3}Juhász Gergely, ¹Fábián Enikő Réka, ²Vida Ádám

¹Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola. Budapest, Magyarország,
har.ferenc@gmail.com, gregoryshepard.95@gmail.com, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

²Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Budapest, Magyarország,
ferenc.hareancz@bayzoltan.hu, gergely.juhasz@bayzoltan.hu, adam.vida@bayzoltan.hu

³Neumann János Egyetem. Kecskemét, Magyarország, hareancz.ferenc@nje.hu,
juhasz.gergely@nje.hu

Összefoglalás

A nagy-entrópiájú ötvözetek (angolul High-Entropy Alloys, HEA) az elmúlt évtizedben kiemelt figyelmet kaptak a korszerű anyagtudományos kutatásokban. Ezek az ötvözetek legalább öt fő alkotót tartalmaznak, melyek moláris aránya azonos, így létrejön egy összetett rendszer, amely rendkívül jó mechanikai és kopásállósági tulajdonságokat mutat.

Ez az irodalomkutatás a HEA-k kopási tulajdonságaira vonatkozó tudományos eredményeket foglalja össze. A kopási tulajdonságok javításában jelentős szerepe van az ötvözőként adagolt elemeknek. Ezek akár többszöröse is tudják növelni a felrakott réteg keménységét. Emellett a vizsgált tanulmányok áttekintik a különböző kopási vizsgálati módszereket, adhéziós és abrázió kopási tulajdonságok meghatározását. A kopási jelenségek numerikus modellezése

Az irodalmi összefoglalás célja, hogy képet adjon a HEA-k kopásállóságának jelenlegi tudományos állásáról, azonosítva a meglévő tudásbeli hiányosságokat, lehetséges fejlesztési irányokat.

Kulcsszavak: anyagtudomány, nagy-entrópiájú ötvözetek, kopásvizsgálat, keménységmérés

Abstract

High-entropy alloys (HEA) have been a major focus of modern materials science research in the last decade. These alloys contain at least five main constituents in the same molar ratio, creating a complex system with very good mechanical and wear resistance properties.

This literature survey summarises the scientific results on the wear properties of HEAs. Elements added as additives play a significant role in improving the wear properties. They can increase the hardness of the applied layer up to several times. In addition, the studies reviewed give an overview of the different wear test methods, adhesion and abrasion wear properties. Numerical modelling of wear phenomena

The aim of the literature review is to provide an overview of the current state of the art of the science of wear resistance of HEAs, identifying existing knowledge gaps and possible directions for improvement.

Keywords: materials science, high-entropy alloys, wear testing, hardness measurement

1. Bevezetés

A hagyományos ötvözettervezési elvek szerint az anyagok egy fő elem köré épülnek, amelyhez kisebb mennyiségű ötvözőelemeket adnak hozzá a kívánt tulajdonságok elérése érdekében. A nagyentrópiájú ötvözetek (HEA) ezzel szemben több, általában öt vagy több fő elemet tartalmaznak közel egyenlő atomi arányban, amely egyedülálló tulajdonságokat eredményez. Ezen ötvözetek az elemek különleges kombinációjából adódóan magas hőállóságot, kiváló kopásállóságot és korrózióállóságot biztosítanak, ami számos ipari alkalmazásban, például vágószerszámokban, repülőgépipari alkatrészekben és energiaipari berendezésekben előnyös lehet [1-3].

A nagyentrópiájú ötvözetek előállítására több módszer létezik, beleértve az öntést, a porkohászati technikákat és az additív gyártási eljárásokat. Az egyik legígéretesebb technológia a lézeres felrakóhegesztés (LMD – Laser Metal Deposition), amely lehetővé teszi a komplex geometriájú bevonatok és alkatrészek gyártását [4,5].

2. Ötvözők tulajdonság befolyásoló hatásai

Az ötvözők tulajdonságbefolyásoló hatása jelentős mértékben függ az adott ötvöző típusától, koncentrációjától és a szövetszerkezetre gyakorolt hatásától. Az ötvözők különböző módon befolyásolják ezeket a tulajdonságokat.

Xiao és társai [5] CoCrFeMnNiC_x ötvözetet vizsgáltak. A karbon hozzáadásakor a mintákban M7C3 típusú karbidokat figyeltek meg, ahol M fémeket jelöl. Az eredmények alapján az M7C3 fázis elsősorban krómot, karbont, vasat és mangánt tartalmaz, míg a mátrix főként kobaltból, nikkeltől, vasból és mangánból áll. Ez azt jelenti, hogy az M₇C₃ fázis (Cr, Fe, Mn)₇C₃ összetételű. A Fe és Mn koncentrációja mindkét fázisban hasonló, ami arra utal, hogy ezek az elemek kevésbé hajlamosak a szegregációra, mint a Co, Ni és Cr. A karbidok kiválása jelentősen javítja az ötvözet kopásállóságát. Nagyobb koncentrációban azonban ridegebb szerkezetek alakulhatnak ki, ami csökkentheti az ötvözet alakíthatóságát [5].

Xing és társai [6] az FeCrNiMnAl_x ötvözet vizsgálva lapközepes köbös (LKK) szerkezetet mutat ki, míg az FeCrNiMnAl_{0.3} esetében LKK+TKK+B2 szerkezeteket is tartalmaz, az Al adagolással a LKK szerkezet fokozatosan csökken, miközben a TKK és B2 szerkezet növekszik. A magasabb Al-tartalmú HEA ötvözetek (FeCrNiMnAl_{0.5}, FeCrNiMnAl_{0.8} és FeCrNiMnAl_{1.0}) TKK + B2 szerkezetet mutatnak. A növekvő Al- tartalommal az LKK fázis fokozatosan eltűnik és TKK és B2 fázissá alakul át. Ezen eredmény összhangban vannak Zhang és társai [7] kutatásaival. Hasonló szerkezetátalakulást figyelt meg Joseph és társai [8] az Al_xCoCrFeNi ötvözetekben, ahol az LKK fázis fokozatosan eltűnt, és a növekvő Al-tartalommal TKK és B2 fázisokká alakult át. Wang és társai [9] az Al hozzáadásával bekövetkező átmenetet az Al_xCoCrFeNi ötvözetekben a rácsstorzulás által kiváltott instabilitással magyarázta. Az Al nagy atommérettel rendelkezik, ami hozzájárul ehhez a szerkezetváltozáshoz. Emellett az Al elősegíti egy oxidvédő réteg (Al₂O₃) kialakulását, amely javítja a korrózióállóságot [6].

Guo és társai [10] CoCr₂FeNiTi_x ötvözetet vizsgáltak, 0 % Ti esetében egyfázisú LKK szilárd oldat jön létre, másodlagos fázisok jelenléte nélkül. A titántartalom növekedésével a Ti_{0.5} bevonat szerkezete már LKK fázisokból és TiN kerámiafázisokból állhat. A TiN fázisok kialakulása a titán és a nitrogén közötti erős affinitásnak tulajdonítható. A TiN fázisok mennyisége arányosan nő a titántartalommal. Emellett a Ti és a többi négy elem közötti negatív keverési entalpia miatt könnyen képződnek intermetallikus vegyületek, Laves-fázisok jelennek meg. A ridex Laves-fázisok képződése növelheti a repedési hajlamot, repedések jelennek meg. Ti hozzáadásával a bevonatok keménysége eléri a 410 HV és 642 HV értékeket. Ebből látható, hogy az intermetallikus vegyületek jelentős mértékben növelik a keménységet és a kopásállóságot, azonban a repedések veszélye is megnő [10].

Byeli és társai [11] vizsgálatai alapján, Mo hozzáadásával jelentős a kopásállóság-javulást. A tanulmányok szerint a Mo kopott felületen molibdén-oxid (MoO_3) réteget képez, amely csökkenti a súrlódást és javítja a kopásállóságot. Wang és társai [12] vizsgálatai alapján a 4,0 tömeg%-os és magasabb Mo-tartalom a Mo_2C fázis megjelenéséhez vezet a bevonatban. A kutatás szerint a 6,0 tömeg%-os Mo-tartalmú bevonat kopásállósága körülbelül 3,7-szerese a Mo-mentes bevonaténak. A 2 tömeg%-os Mo-tartalmú bevonattal érhető el a legjobb korrózióállóság [13].

3. Kopási tulajdonságok vizsgálati módszerei

A kopási folyamatok vizsgálata fontos a különböző szerkezeti anyagok és bevonatok élettartamának meghatározásában. Az anyagok tribológiai tulajdonságainak értékelésére többféle laboratóriumi és numerikus vizsgálati módszer áll rendelkezésre, amelyek különböző mechanizmusok szerint határozzák meg az anyagvesztést és a súrlódási folyamatokat.

3.1 Bevonatok kopásvizsgálata

A kopási tulajdonságok meghatározására a legelterjedtebb laboratóriumi vizsgálati módszerek közé tartoznak az adhéziós és abrazív kopást mérő eljárások. Az adhéziós és abrazív kopás során az érintkező felületek közötti mechanikai súrlódás hatására anyagleválás történik. A leggyakrabban alkalmazott módszerek a pin-on-disk, block-on-ring és ball-on-disk teszt [14,15].

A pin-on-disk teszt esetében egy hengeres vagy kúpos próbatestet (pin) egy forgó tárcsa (disk) ellen préselnek állandó nyomás és sebesség mellett. Ez a módszer alkalmas az anyagpárosítások súrlódási együtthatójának (COF) és kopásállóságának meghatározására. A block-on-ring teszt esetében egy téglatest alakú mintát egy forgó gyűrűhöz szorítanak, és vizsgálják az anyagvesztéseket, a súrlódási tényezőt és a keletkező kopásnyomot. Ez a módszer különösen fémek és bevonatok esetében hasznos. A ball-on-disk teszt esetében egy gömb alakú próbatestet egy sík tárcsára helyeznek, majd forgómozgást végeznek állandó nyomás mellett. A vizsgálat során rögzítik a súrlódási együttható alakulását az idő függvényében, a kopásnyom szélessége és mélysége és anyagleválás mennyiségét [14,15].

3.2 Kopási jelenségek numerikus modellezése és szimuláció

A kopási jelenségek numerikus modellezése és szimulációja lehetővé teszi a kopásfolyamatok pontosabb előrejelzését. Az Archard-féle kopási modell az egyik legelterjedtebb matematikai modell a kopás előrejelzésére. A modell azt feltételezi, hogy a kopás sebessége arányos az érintkezési felület nyomásával és a relatív mozgás hosszával. Az Archard-modell jól alkalmazható fémek és kerámia anyagok kopásállóságának vizsgálatára, különösen csúszókopás esetén. A kopási együtthatót kísérleti úton határozzák meg, és a modell segítségével előre jelezhető a várható élettartam különböző terhelési körülmények között [16].

4. Összegzés

A nagyentrópiájú ötvözetek egyedi összetétele és szövetszerkezete révén kiváló mechanikai és tribológiai tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek számos ipari alkalmazásban kihasználhatók. A lézeres felrakóhegesztés ígéretes technológia az ilyen ötvözetek bevonatként történő alkalmazására. Az ötvözőelemek megfelelő kombinációjának kiválasztása kulcsfontosságú az optimális tulajdonságok eléréséhez, figyelembe véve az adott ipari alkalmazás követelményeit.

5. Hivatkozások

- [1] Murty, B., Yeh, J., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P. (2019). High-Entropy alloys. Elsevier.
- [2] Miracle, D., & Senkov, O. (2016). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- [3] Zhang, P., Li, Z., Liu, H., Zhang (2022). Recent progress on the microstructure and properties of high entropy alloy coatings prepared by laser processing technology: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 397–411.
- [4] Li, Y., & Shi, Y. (2020). Microhardness, wear resistance, and corrosion resistance of Al_xCrFeCoNiCu high-entropy alloy coatings on aluminum by laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 134, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106632>
- [5] Xiao, J., Tan, H., Chen, J., Martini, A., & Zhang, C. (2020). Effect of carbon content on microstructure, hardness and wear resistance of CoCrFeMnNi_x high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 847, 156533.
- [6] Xing, X., Liu, Y., Hu, J., & Li, W. (2022). Effect of Al content on microstructure and wear properties of FeCrNiMnAl_x high-entropy alloys. *Materials Research Express*, 9(3)
- [7] Zhang, L., Guo, K., Tang, H., Zhang (2019). The microstructure and mechanical properties of novel Al-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys with trimodal distributions of coherent B2 precipitates. *Materials Science and Engineering A*, 757, 160–171.
- [8] Joseph, J., Jarvis, T., Wu, X.(2015). Comparative study of the microstructures and mechanical properties of direct laser fabricated and arc-melted Al x CoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering A*, 633, 184–193.
- [9] Wang, W., Wang, W., & Yeh, J. (2013). Phases, microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*, 589, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.084>
- [10] Guo, Y., Shang, X., & Liu, Q. (2018). Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr₂FeNiTi high-entropy alloy composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 344, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.035>
- [11] Byeli, A., Lobodaeva, O., Shykh, S., & Kukareko, V. (1995). Microstructural variations and tribology of molybdenum-type high speed steel ion implanted with high current density nitrogen beams. *Wear*, 181–183, 632–637. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90179-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90179-5)
- [12] Wang, K., Chang, B., Chen, J., Fu, H., Lin, Y., & Lei, Y. (2017). Effect of molybdenum on the microstructures and properties of stainless steel coatings by laser cladding. *Applied Sciences*, 7(10), 1065. <https://doi.org/10.3390/app7101065>
- [13] Singla, Y. K., Maughan, M. R., Arora, N., & Dwivedi, D. (2024). Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes*, 120, 135–160.
- [14] Chuang, M., Tsai, M., Wang, W., Lin, S., & Yeh, J. (2011). Microstructure and wear behavior of Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 59(16)
- [15] Hsu, C., Yeh, J., Chen, S., & Shun, T. (2004). Wear resistance and high-temperature compression strength of Fcc CuCoNiCrAl_{0.5}Fe alloy with boron addition. *Metallurgical*

and Materials Transactions A, 35(5), 1465–1469.

- [16] Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>