



Nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek oxidációja

Oxidation of Refractory High-Entropy Alloys

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

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

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

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

Összefoglalás

A cikk a fémek oxidációját tárgyalja, különös tekintettel a nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek (RHEAs – refractory high-entropy alloys) oxidációs viselkedésére. Az első részben a nagy hőmérsékletű oxidáció termodinamikai és kinetikai alapjait mutatja be, kitérve a védő és nem védő oxidrétegek tulajdonságaira és az oxidációt meghatározó tényezőkre. A második rész az RHEA-k alapjait ismerteti, beleértve azok összetételét, tulajdonságait és alkalmazási területeit. Végül, a RHEA-k oxidációjának vizsgálatát részletezi a legfrissebb kutatások és publikációk alapján, kiemelve az oxidációval szembeni ellenállásuk mechanizmusait és a jövőbeni fejlesztési lehetőségeket. Az írás célja, hogy átfogó képet adjon a témáról.

Kulcsszavak: oxidáció, nagy-entrópiájú ötvözetek, nagy hőmérséklet

Abstract

This article discusses the oxidation of metals, with particular emphasis on the oxidation behaviour of refractory high entropy alloys (RHEAs). The first part presents the thermodynamic and kinetic fundamentals of high-temperature oxidation, including the properties of protective and non-protective oxide layers and the factors that control oxidation. The second part describes the basics of RHEAs, including their composition, properties and applications. Finally, the oxidation of RHEAs is examined in detail, based on recent research and publications, highlighting the mechanisms of their resistance to oxidation and future development opportunities. The paper aims to provide a comprehensive overview of the subject.

Keywords: oxidation, high-entropy alloys, high temperature

1. A nagy hőmérsékletű oxidáció termodinamikai és kinetikai alapjai

Az oxidáció a fémek és ötvözetek korróziós degradációjának különleges formája, amely akkor következik be, amikor az fémeket vagy ötvözeteket levegőnek vagy oxigénnek teszik ki. Az oxidáció más közegekben is előfordul, mint például a kén-dioxid és a szén-dioxid, viszont ezek alacsonyabb oxidációs potenciállal rendelkeznek. Az oxidáció folyamata egy új réteg létrejöttével valósul meg, mely az alapfém összetétele alapján valamilyen oxidréteg. Ha a képződött oxidréteg vékony, lassan növekvő és tömör, akkor megvédi az alapfémeket a további oxidációtól. Ha azonban a

keletkezett rétegben anyaghibák találhatók, akkor az alapfém tovább tud oxidálódni [1 -3].

A nagy hőmérsékletű oxidáció vizsgálata kulcsfontosságú, mivel meghatározza a fémek és ötvözetek korrózióval szembeni ellenállását és hosszú távú élettartamát ipari alkalmazásokban, például gázturbinákban, hőcserélőkben és vegyipari reaktorokban. Az oxidáció során kialakuló oxidrétegek jelentős szerepet játszanak: védőrétegek esetén az oxidáció lelassul, míg nem védő rétegek gyakran gyors anyagvesztést és a fém idő előtti tönkremenetelét eredményezik. A különböző oxidációs mechanizmusok megértése elengedhetetlen az új anyagok fejlesztéséhez, amelyek képesek ellenállni az extrém környezeti hatásoknak [2].

1.1 A fém oxidációjának kritériumai

Termodinamikailag oxid képződik a fém felületén, ha a környezetben az oxigénpotenciál nagyobb, mint az oxiddal egyensúlyban lévő oxigén parciális nyomása. Az egyensúlyi oxigénnyomás az oxidációs folyamat szabadentalpiájából (ΔG) számítható, amelyet a következő összefüggés ír le (1).

$$\Delta G = -RT \ln \ln p \left(\frac{\alpha_{FO_2}}{\alpha_F} p(O_2) \right) \quad (1)$$

ahol: α_{FO_2} és α_F a fém és az oxid aktivitása, $p(O_2)$ az oxigén parciális nyomása.

Ha a fém és az oxid aktivitását egységnyinek vesszük, akkor az oxigén parciális nyomását az (1) összefüggésből a következőképpen kapjuk meg (2).

$$p(O_2) = \exp \left(\frac{\Delta G}{RT} \right) \quad (2)$$

Az oxidok képződésének standard szabad energiáit a hőmérséklet függvényében Ellingham/Richardson diagramok néven ismerjük, amelyek segítségével információt szerezhetünk az oxigén parciális nyomásáról, amely ahhoz szükséges, hogy bármely fém oxidot képezzen bármilyen hőmérsékleten. Az Ellingham-diagramok egyik korlátja, hogy nem veszik figyelembe a reakció kinetikáját.

1.2 Az oxidáció kinetikája

Az egyensúlyi Ellingham-diagramokból csak ahhoz az információhoz jutunk, hogy a hőmérséklet és az oxigén részleges nyomásának bizonyos feltételei mellett lehetséges-e az oxidképződés. Előfordulhat, hogy a folyamatok kinetikája olyan lassú, hogy bár termodinamikailag lehetséges lenne a reakció bekövetkezése, annak kialakulása rendkívül hosszú időt vehet igénybe. Így úgy tűnik, hogy az oxidációs reakció nem következett be, ezért fontos ismerni az oxidációs reakciók kinetikáját. Továbbá, ha egynél több oxid képződése lehetséges, a diagramok nem tudják eleve megmondani, hogy az adott környezetben melyik oxid fog kialakulni. A termodinamikai és kinetikai információk kombinációja jobb képet adhat az oxid viselkedéséről. Ezenfelül a reakciósebesség ismerete fontos alap az oxidáció mechanizmusok megértéséhez. A reakciók sebessége és a megfelelő arányos egyenletek a vegyületek oxidációjára vonatkozóan számos tényezőtől függenek. A legfontosabb a hőmérséklet, az oxigénnyomás, a felület előkészítése és a fém előkezelése. Gyakran találkozunk különböző típusú sebességtörvényekkel: lineáris, parabolikus, logaritmusos és ezek kombinációi, mint például a paralineáris (lineáris és parabolikus kombinációja) stb. A legtöbb fém és műszaki ötvözet nagy hőmérsékleten parabolikus kinetikát követ. Az oxidnövekedési folyamatot rendszerint az ionok vagy elektronok diffúziója irányítja a kezdetben kialakult oxid rétegen keresztül. A parabolikus törvényt először Wagner vezette le, feltételezve a töltéssel rendelkező részecskék diffúzióját az oxidrétegen keresztül. Vannak olyan

fémek, amelyeknél az oxidáció mértéke az idő múlásával állandó marad, és nem függ a reakcióban korábban felhasznált gáz vagy fém mennyiségétől. Az ilyen reakciók általában felületi vagy fázisátár reakciókkal mennek végbe [1 - 3].

1.3 A hibaszerkezet és a diffúzió szerepe az oxidáció során

A kezdeti vékony oxidfilm növekedése a fém vagy az oxidáló közeg ionjainak diffúziójával történik. Ez az oxidáció során általában szilárd halmazállapotban történik, amely függ a kristályhibáktól. Az oxidok legjellemzőbb kristályhibái a vakanciák, az interszticiós atomok és a szennyezők. Ezek kristályrács vagy térfogati hibák, amelyeknek nagy aktivációs energiára van szükségük ahhoz, hogy diffúzió történjen. A nagy aktivációs energia miatt nagy hőmérséklet szükséges a diffúzióhoz. A diffúzió mértéke a szemcsehatárokon és a szabad felületeken sokkal kedvezőbb, mivel kis aktivációs energia is elég a diffúzióhoz, amely így alacsony hőmérsékleten is végbemehet. Az oxidok hibaszerkezetük alapján n- vagy p-típusú oxidokba sorolhatók. Az n-típusú oxidok többségi töltéshordozói az elektronok, míg a p-típusúakban a lyukak dominálnak. Az n-típusú oxidokban oxigénvakanciák és/vagy fémion-többlet található, míg a p-típusú oxidokban a fémionok helyét lyukak foglalják el. Ha idegen ion kerül az oxidba, az megváltoztatja annak oxidációs viselkedését [1]. Az n-típusú oxidok esetében az oxidáció sebessége lassul, ha nagy vegyértékű kationok kerülnek az oxidba, mivel ezek csökkentik az oxigénvakanciák számát vagy növelik az interszticiós fém ionok számát az oxidban. Ezzel szemben az oxidáció gyorsul, ha kis vegyértékű kationok kerülnek az oxidba, mivel ezek növelik az oxigénvakanciák számát. A p-típusú oxidok oxidációját a nagy vegyértékű kationok gyorsítják a kristályhibák számának növelésével, míg a kis vegyértékű kationok lassítják azok csökkentésével [3].

A ZrO_2 egy n-típusú oxid, amely gyorsabban oxidálódik levegőn, mint tiszta oxigénben. Ennek oka, hogy nitrogénionok helyettesíthetik az oxigénionokat az oxidban, ami növeli az oxigénvakanciák számát, és ezáltal az oxidáció sebességét. A vas oxidációja során kialakulhat FeO , amely egy p-típusú oxid. Ha ebbe az oxidba kis mennyiségben Cr kerül, az növeli a vakanciák számát, amely gyorsítja az oxidációt. A Cr csak akkor lassítja a vas oxidációját, ha már több kerül a vasba, mint amennyit oldani tud [1]. Fontos, hogy az ember tisztában legyen a kialakuló oxid elsődleges töltéshordozójával, mivel befolyásolja az oxidáció mechanizmusát. A 1. táblázat példákat mutat be n- és p-típusú oxidokra.

1. táblázat Példa n- és p- típusú oxidokra [1]

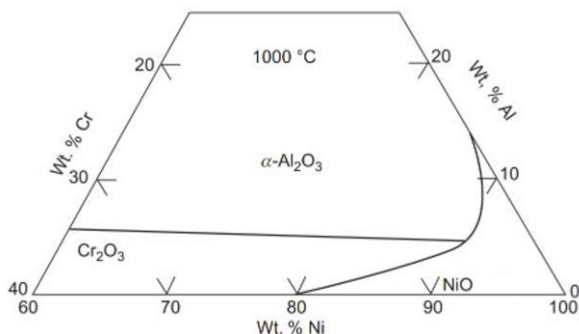
n-típus	TiO_2 , V_2O_5 , ZrO_2 , Mo_2O_5 , Ta_2O_5 , MoO_3 , WO_3 , Fe_2O_3 , Al_2O_3
p-típus	Cr_2O_3 , WO_2 , $FeCr_2O_4$, NiO , FeO , MnO_2

1.4 Az ötvözetek oxidációja

A gyakorlatban a nagy hőmérsékleti tartományban ötvözeteket használnak és nem tiszta fémeket. Bár az ötvözetek oxidációja ugyanazt az általános jelenséget követi, mint a tiszta fémek esetében, viszont az ötvözetben egynél több elem jelenléte miatt számos további tényezőt kell figyelembe venni az ötvözet oxidációs viselkedésének leírásához. Ez az ötvözetek oxidációs mechanizmusát viszonylag összetetté teszi a tiszta fémekéhez képest. Ilyenek például az ötvöző elem jellege, oldhatósága az alapfémekben, oxigén-affinitása és oxidjának termodinamikai stabilitása, a fém mobilitása vagy diffúziója az oxidfázisban. Ezekről függően az ötvözetben kialakuló oxidréteg lehet: különböző ötvözőelemekből képződött oxidok keveréke, egy adott ötvözőelemből képződött egyetlen oxidréteg vagy egyetlen külső oxidréteg, amely alatt bizonyos elemek belső oxidjai vagy azok keverékével képződik további réteg [1, 2].

Az első eset az általános oxidáció esete, amelyben a kezdeti szakaszban (átmeneti oxidáció)

valamennyi elem oxidjai képződhetnek, majd a legstabilabb oxid kialakulása következik be. A második esetben az ötvözet egy adott alkotóelemének szelektív oxidációjához szükséges feltételek alakulnának ki. Bár ez megvédi az ötvözetet a további oxidációtól, a szelektív oxidáció az adott elem kimerülését eredményezheti az alapul szolgáló fémből, ami bármilyen rétegsérülés (repedés vagy leválás) esetén túlzott mértékű oxidnövekedést eredményezhet. Ez könnyen okozhatja az oxidréteg leválását az alapfémről, ami tönkremenetelhez vezethet. A harmadik esetben bizonyos elemek nagyon magas aktivitása miatt az oxigén befelé irányuló diffúziója oxidok kiválását okozhatja a mátrixon belül, jóval a külső oxidréteg alatt az ötvözetben. Ez a fajta belső oxid bizonyos esetekben előnyös lehet. Például erősíthetik az alapötvözetet, és ha az ötvözetben a szemcsehatárokon képződnek, korlátozhatják a szemcsehatárok csúszását. A nagy mennyiségű belső oxid azonban káros az ötvözetre, mert az oxidált anyaggal teljesen körülvelt szemcsék meglazulhatnak, és végül elmozdulhatnak. Az ötvözet elemszámának növekedésével a keletkező oxidréteg típusának és az ötvözetben található elemek szerepének megjósolása egyre nehezebbé válik. Az Ni-Cr-Al háromalkotós ötvözetrendszer során az 1. ábrán látható oxidtérképet lehet ábrázolni [1].



1. ábra Az Ni-Cr-Al háromalkotós ötvözetrendszer oxidtérképe [1]

Amennyiben elegendő termodinamikai és kinetikai adat áll rendelkezésre, akkor az egyik módszer az ötvözet kialakuló oxidrétegek előrejelzésére a háromalkotós fázisdiagram felrajzolása. Egy ilyen diagram megmutatja a különböző típusú oxidrétegek kialakulásának összetételi tartományait, és lehetővé teszi az ötvözet jelen lévő oxidfázisok előrejelzését [1, 3, 4].

A nagy hőmérsékletre szánt ötvözetek általában számos egyéb elemet tartalmaznak, amelyeket vagy szándékosan adnak hozzá az oxidáció csökkentése érdekében, vagy más okokból vannak jelen. A ritkaföldfémek kis koncentrációban történő hozzáadása nem csak az oxidációs ellenállást javítja, hanem fokozza a kialakult oxidréteg tapadását. Vannak bizonyos egyéb elemek, például Mn, Mo, V, Ta stb., amelyek számos magas hőmérsékletre szánt ötvözetben jelen vannak, hogy javítsák mechanikai tulajdonságaikat. Ezek azonban káros hatással lehetnek az ötvözet oxidációs ellenállása szempontjából. Amennyiben az ötvözetben nagy mennyiségben van jelen Mo és V, akkor káros hatású, mivel alacsony olvadáspontú oxidokat (MoO_2 és V_2O_5) képezhetnek, és katasztrofális oxidációhoz vezethetnek. A W 1150 °C felett WO_3 -at képez, amely gyorsan elpárolog és az alapfém további oxidációjához vezet [4].

2. A nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek oxidációja

A nagy hőmérsékletre szánt hagyományos ötvözetek nagy olvadáspontú elemeket tartalmaznak, mint például a Nb és Ta. Így nagy szilárdsággal rendelkeznek nagy hőmérsékleten is, viszont rosszul alakíthatók, nagy a sűrűségük és gyenge az oxidációs ellenállásuk. A hagyományos ötvözetek gyenge oxidációs ellenállásának oka, hogy az előnyös oxidréteg kialakulása az alapfém ötvözőelemeinek elszegényesedését, az oxigén oldhatóságának növekedését és végül a belső oxidáció kialakulását okozza [1, 4].

A nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek legalább 5 elemből állnak, melyek többnyire nagy olvadáspontúak, mint például a Nb, Mo, Ta, W, Re és Ta [5]. A hagyományos ötvözetekkel szemben a nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek oxidációs sebessége jelentősen csökkenhet a komplex oxid kialakulási mechanizmusaik miatt. Ilyen komplex oxidrétegek például a TiNb_2O_7 , $\text{Nb}_2\text{Zr}_6\text{O}_{17}$, CrTaO_4 stb. Ezek a komplex oxidrétegek csökkentik az oxigén oldhatóságát, továbbá a nagy-entrópiájú ötvözetek esetében a diffúzió lassú az ingadozó rács potenciális energiája miatt. További előnye a nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözeteknek, hogy nagy Al és Cr tartalmat lehet elérni, amely miatt Al_2O_3 és Cr_2O_3 védő oxidréteg tud kialakulni a felszínükön. Az Al és Cr oxidjai lassítják az oxidáció sebességét és megvédik az ötvözetben található elemeket a nagy hőmérsékleten történő elpárolgásuktól. Vannak olyan elemek, amelyek akadályozzák vagy rontják a Cr_2O_3 és a Al_2O_3 rétegek kialakulását. A Nb rontja az egybefüggő Cr_2O_3 kialakulását, mivel az Nb_2O_5 és a Cr_2O_3 közel azonos szabad energiával rendelkezik. A Ti olyan nagy-entrópiájú ötvözetek oxidációs ellenállását rontja, melyek Al-t tartalmaznak, mivel az Al_2O_3 és a TiO_2 hasonló termodinamikai stabilitással rendelkeznek és az oxidjuk keveréke meglehetősen inhomogén és porózus. A W az Al_2O_3 és a WO_3 közötti reakció alumínium-volfrámát $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3$ képződését eredményezi, ami csökkenti a folyamatos és védő Al_2O_3 réteg kialakulásának valószínűségét [4].

Xuhui Pei és társai [6] irodalomkutatásuk alapján összefoglalták, hogy mely elemek jelenthetnek problémát a nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetekben. Általános probléma, hogy ezen ötvözetek felszínén nem képes tartós védő oxidréteg kialakulni. Ennek oka, hogy a periódusos rendszer IV. csoportjába tartozó nagy olvadáspontú elemek, a Ti és a Hf nagy hőmérsékleten nagy termodinamikai aktivitást mutatnak az oxigénnel szemben, ami súlyos belső oxidációt eredményez, és lokalizált mikrorepedéseket indít el a réteg oxigénben gazdag régióiban. Ezenkívül az V. és VI. csoportba tartozó nagy olvadáspontú elemek közül a V, Nb és Ta hajlamos lenne közepes hőmérsékleten illékony oxidok (V_2O_5 , Nb_2O_5 és Ta_2O_5) képződésére, míg a Mo és W súlyos oxidációban szenvedne, és 850 °C felett illékony MoO_3 és WO_3 képződne. Általában ezek az illékony oxidok ronthatják az oxidréteg tapadását, ami repedéshez és végül leváláshoz vezet.

Jelenleg a nagy-entrópiájú ötvözetek oxidáció ellenálló képességének javítására irányuló stratégiák általában a hagyományos nagy hőmérsékletre szánt ötvözetek néhány sikeres esetére hivatkoznak. Például a TiAl-Nb , Cr és TiCrAl_Y bevonatok körülbelül 50%-os Al-tartalommal jobb oxidációs tulajdonságokat mutattak 1000 °C-on. A jó oxidáció ellenállású nagy-entrópiájú ötvözetek tervezésének fő stratégiái a Cr, Al és Si hozzáadására támaszkodnak Cr_2O_3 , Al_2O_3 vagy SiO_2 védőrétegek kialakulásának reményében, amelyek az oxigén belső diffúzióját hatékonyan gátolják, mert kellően tömörek. A jelenleg készített ötvözetek esetében a Cr hozzáadása támogatja a Cr_2O_3 védőréteg kialakulását, de 950 °C felett tovább indukálhatja az illékony CrO_3 képződését. Ezenfelül váratlanul felfedezték a CrTaO_4 oxid kiváló oxidációs ellenállását, de csak bizonyos elemeket tartalmazó ötvözetekben. S. Schellert és kutató társai [7] Ta-Mo-Cr-Ti-Al nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetet készítettek változó Ta tartalommal és vizsgálták az oxidációs viselkedést. Kutatásuk alapján 1200 °C-on levegőben javítani tudják az oxidációs ellenállást a Ta növelésével. A legjobb összetétel az egyenlő atomszázalékban létrehozott Ta-Mo-Cr-Ti-Al ötvözet. Ennél az összetételnél folytonossági hibával rendelkező TiO_2 , Al_2O_3 és Cr_2O_3 oxidrétegek alakultak ki,

viszont ezen rétegek alatt egy CrTaO_4 védőréteg jött létre. A sűrű CrTaO_4 réteg az oxigén befelé irányuló diffúziójának eredményeként parabolikus sebességtörvény szerint növekszik. Ez az oxidréteg megakadályozta a fém ionok kifelé történő diffúzióját és a MoO_3 elpárolgását. Da Sun és társai [8] lézeres felrakóhegesztéssel készítettek TiC erősítésű CrMnFeCoNi nagy-entrópiájú kompozit réteget AISI H13 alaplemezre és vizsgálták a nagy hőmérsékletű oxidációját. Kutatásuk alapján egy kopásálló és jó oxidációs ellenállású réteget tudtak létrehozni. Ez a TiC-nak és a kialakult Cr_2O_3 védő oxidrétegnek köszönhető. A nagy-entrópiájú kompozitok, illetve kerámiák új lehetőséget kínálnak a nagy hőmérsékletnek kitett alkatrészek tervezésére [9].

3. Következtetés

Az ötvözetek nagy hőmérsékletű oxidációjának ismerete fontos kutatási terület, mivel a kialakuló réteg befolyásolja az anyagok élettartamát. Emiatt az ötvözetek tervezése során törekedni kell, hogy megfelelő kémiai összetételű ötvözeteket hozzunk létre, amelyek felszínén nagy hőmérsékletű igénybevétel során tartós, tömör védő oxidréteg alakul ki. Az egyik lehetőség a nagy hőmérsékletre szánt nagy-entrópiájú ötvözetek alkalmazása, melyek jobb oxidációs ellenállással bírhatnak, mint a hagyományos ötvözetek. Ez a komplex oxidrétegek kialakulásának, a diffúziós folyamatok lassúságának és a védő oxidrétegek (pl. Al_2O_3 , Cr_2O_3) képződésének köszönhető. Azonban bizonyos elemek, mint például a Nb, Ti és W, negatívan befolyásolhatják ezt a tulajdonságot. A RHEA-k oxidációjának mélyebb megértése és az ötvözetek optimális összetételének tervezése kulcsfontosságú a következő generációs, nagy hőmérsékletre szánt anyagok fejlesztéséhez. A védő oxidrétegek kialakulását elősegítő elemek (Cr, Al, Si) szerepe különösen kiemelkedő a további kutatásokban.

4. Hivatkozások

- [1] A. S. Khanna:(2016) High temperature corrosion, New Jersey : World Scientific., ISBN : 981-4675-23-7
- [2] N Birks, G H. Meier, F S. Pettit (2006) Introduction to the high-temperature oxidation of metals, Cambridge University Press, ISBN 978-0-511-16089-9 101-162 doi.org/10.1017/CBO9781139163903
- [3] D J.Young (2016): High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals, Elsevier Ltd., ISBN: 978-0-08-100101-1
- [4] J Chen, X Zhou, W Wang, B Liu, Y Lv, W Yang, D Xu, Y Liu, (2018) A review on fundamental of high entropy alloys with promising high–temperature properties, Journal of Alloys and Compounds, Volume 760, Pages 15-30, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.067>
- [5] B.S. Murty, JW Yeh,. S Ranganathan,. (2014). High-Entropy Alloys. Elsevier, ISBN: 978-0-12-800251-3
- [6] X Pei, Y Du, H Wang, T Li, M Hu, H Wang, W Liu, (2023) Effects of Al/Si on the oxidation behavior of a TiZrV0.5Nb0.5 refractory high entropy alloy at 1000 °C, Corrosion Science, Volume 224, 111527, ISSN 0010-938X, doi: 10.1016/j.corsci.2023.111527
- [7] S. Schellert, B. Gorr, S. Laube, A. Kauffmann, M. Heilmaier, H.J. Christ (2021) Oxidation mechanism of refractory high entropy alloys Ta-Mo-Cr-Ti-Al with varying Ta content, Corrosion Science, Volume 192, , 109861, ISSN 0010-938X,

- [8] D. Sun, Y. Cai, L. Zhu, F. Gao, M. Shan, S. M. Manladan, K. Geng, J. Han, Zh. Jiang (2022) High-temperature oxidation and wear properties of TiC-reinforced CrMnFeCoNi high entropy alloy composite coatings produced by laser cladding, *Surface and Coatings Technology*, Volume 438, 128407, ISSN 0257-8972, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128407
- [9] S I Moussaoui, P Pinke, J Dusza (2023): *High Entropy Ceramics: A Brief Introduction*, ESB 2023, Óbudai Egyetem, ISBN 978-963-449-359-4