

Kétrétegű fémes kompozit lemez hengerlési technológiájának kidolgozása szénacél rendszerek hidrogénállóságának javítása szempontjából

Development of a double-layer metallic composite plate rolling technology to improve the hydrogen resistance of carbon steel systems

*SZABÓ Gábor¹, KÁRPÁTI Viktor², PUSKÁS Csaba Sándor²,
VESZPRÉMI Ramóna¹, PALKOVICS Miklós²*

¹Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, 3515 Miskolc Egyetemváros, Hungary

²Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, 3515 Miskolc Egyetemváros, Hungary

Abstract

In this research work, we focused on the feasibility of producing 2-ply composite plates by rolling. The aim of the investigation was to develop an optimal rolling technology for the application of a high entropy alloy in the solid state on the surface of a steel of S355J+N grade. The cladding technology and the corresponding temperature conditions and piercing patterns were developed during the bond rolling process. These were optimised and finally an experimental production technology was established which was considered ideal. Our investigation focused on the dimensions of the laboratory equipment.

Kulcsszavak: Hidrogén, Cantor ötvözet, nagy entrópia, bevonat, plattírozás

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek során a légitömegközlekedési eszközök – a társadalmi elvárásoknak megfelelően – jelentős fejlődésen mentek keresztül. Ugyanakkor az általuk használt üzemanyagok továbbra is fosszilis eredetűek, melyek kitermelhetősége véges. A jelenlegi fogyasztási szintet fenntartva a jelenleg elérhető kőolajkészletek még mintegy 47 évre elegendőek. Azonban fontos figyelembe venni a folyamatosan növekvő energiaigényt, legyen az ipari vagy közlekedési szempontból, ami csökkentheti ezt az időtartamot. Emellett más gazdasági és politikai tényezők is befolyásolhatják a kőolajkészletek elérhetőségét és az árak alakulását, ideértve a nemzetközi konfliktusokban részt vevő felek növekvő katonai igényeit is. Az ázsiai országok növekvő energiaigénye tovább súlyosbíthatja az árnyomást. [1]

Az emelkedő kőolajfelhasználás következtében az elmúlt évtizedekben rekordmennyiségű szén-dioxid került a légkörbe. A szén-dioxid mellett a légkörbe jutó egyéb szennyező gázok (pl: metán) megtartják a bolygó felszínéről kisugárzó hőt, hozzájárulva a globális felmelegedéshez és a szélsőséges időjárási jelenségekhez. Az üvegházhatású gázok kibocsátása számos hatást gyakorol az óceánokra is, például a tengerszint emelkedésére, a tengervíz hőmérsékletének emelkedésére és a savasodás fokozódására, ami negatívan befolyásolja a tengeri élőlényeket. Az ipari forradalom előtti időszakban a szén-dioxid koncentrációja átlagosan 280 ppm körül volt. 2022 májusában ez az érték elérte a 420 ppm-t, és közelíti a 450 ppm-es visszafordíthatatlansági küszöböt. [1]

2. HIDROGÉNÁLLÓ RENDSZEREK FEJLESZTÉSI KONCEPCIÓI A KÖZLEKEDÉSBEN

A közlekedési ágazat jelentős szerepet vállal a CO₂ kibocsátásból ezáltal a globális környezetterhelésből. A repülés által okozott CO₂ kibocsátás csökkentésére történő hidrogén alkalmazásnak több lehetséges módja van, bár ezek közül a legtöbb még mindig elméleti fázisban, néhány pedig fejlesztés alatt áll. Néhány lehetséges megközelítés: [2]

- Hidrogénhajtású repülőgépek: A hidrogénhajtású repülőgépek olyan légi járművek, amelyek hidrogént használnak üzemanyagként. A hidrogén égése során csak víz és hő keletkezik, ami minimális CO₂ kibocsátást eredményez. Az ilyen repülőgépek tervezése és fejlesztése azonban

még mindig folyamatban van, és sok technológiai kihívást kell még megoldani ahhoz, hogy ezek széles körben elterjedjenek. [3]

- Zéróemissziós repülőterek: A hidrogént lehet használni repülőtéri járművek, például vontatók vagy szervizjárművek hajtására. Ha ezek a repülőtéri járművek hidrogént használnak üzemanyagként, a repülőtér környezetszennyezése csökkenthető. [4]
- Hidrogénből előállított üzemanyagok: A hidrogénből előállított üzemanyagok, például hidrogénnel dúsított kerozin vagy hidrogénből előállított szintetikus üzemanyagok használata lehetőséget kínál a hagyományos repülőgépek CO₂ kibocsátásának csökkentésére. Ezek az alternatív üzemanyagok kevésbé szén-dioxid-kibocsátók lehetnek, mint a hagyományos kerozin. [5]
- Hidrogén alapú infrastruktúra: A repülésben való hidrogén használatának növelése érdekében kialakítható hidrogéninfrastruktúra, amely magában foglalja a hidrogén tárolását, szállítását és töltőállomásokat a repülőtereken. [4]

Jelen cikkünkben csak az első pontban említett hidrogénhajtású repülőgépekkel foglalkozunk. Itt a legnagyobb kihívást a hidrogén üzemanyag tárolása/raktározása jelenti. Ha a jelenlegi repülőgép építési koncepciót vesszük alapul, a szárnyak megerősítése fontos hidrogénállósági szempontból. Ennek egyik lehetséges megoldása a HEA bevonatok alkalmazása. Ebben az esetben, azonban az alumínium alap mátrixot szénacélra kell cserélni.

A hidrogén szerepe a közlekedésben

A hidrogén egyre fontosabb szerepet tölt be a közlekedésben. Néhány kiemelt szempont, mely a hidrogént előnyösebbé teszi a többi alternatív környezetbarát energiahordozóhoz képest:

- Környezetbarát energiaforrás: A hidrogén üzemanyagként használva tiszta energiát biztosít, mivel a hidrogén üzemanyagcellákban történő égése során csak víz és hő keletkezik. Ez hozzájárulhat a légszennyezés csökkentéséhez és a szén-dioxid-kibocsátás minimalizálásához, különösen akkor, ha a hidrogént megújuló energiával állítják elő.
- Nagy hatótávolság és gyors újratöltés: A hidrogén üzemű járművek rendelkeznek hosszabb hatótávolsággal és gyorsabb újratöltési idővel, mint a hagyományos elektromos járművek, amelyek akkumulátorokat használnak. Ez lehetővé teszi a hosszabb utak megtételét és a gyorsabb újratöltést, ami kényelmesebbé teszi a hidrogén üzemanyagcellás járműveket a mindennapi használat során.
- Diverzifikált energiaforrások: A hidrogén előállítása többféle módon történhet, beleértve a vízbontást megújuló energiaforrásokkal, fosszilis tüzelőanyagok felhasználását vagy más alternatív módszereket. Ez lehetővé teszi a különböző energiaforrások diverzifikálását és csökkenti a függőséget az olajtól vagy más hagyományos tüzelőanyagoktól.
- Alacsony zajszint: A hidrogén üzemű járművek általában csendesebbek, mint a belső égésű motorokkal működő járművek, mivel a hidrogén üzemanyagcellák működése során kevésbé zajos a folyamat.

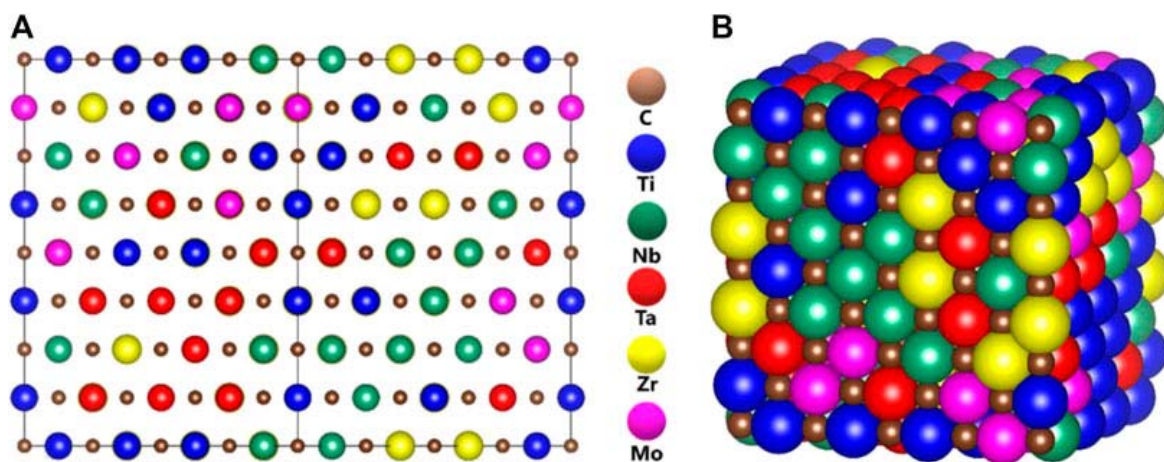
Ezek az előnyök azt mutatják, hogy a hidrogén számos előnnyel járhat a közlekedésben, különösen a környezetvédelmi szempontból és az alternatív energiaforrások diverzifikálása terén. Ennek ellenére további kutatásokra és fejlesztésekre van szükség annak érdekében, hogy a hidrogén alapú közlekedés szélesebb körben elterjedhessen és hatékonyan működhessen.

3. HIGH-ENTROPY ALLOYS (HEA) – MINT BEVONAT

A HEA ötvözet a "High-Entropy Alloys" rövidítése, magyarul magas-entrópia ötvözeteket jelent. Ezek olyan speciális fémötvözetek, amelyek különböző alapfémeket tartalmaznak, általában legalább négyet vagy még többet. Az, hogy többféle fém van jelen az ötvözetben, lehetővé teszi számukra, hogy különleges tulajdonságokkal rendelkezzenek, amelyeket az egyes fémek önmagukban nem mutatnak.

A HEA ötvözeteket általában azért hozzák létre, hogy javítsák a fémek mechanikai tulajdonságait, például a szilárdságot, a keménységet vagy a korrózióállóságot. A magas entrópiájú ötvözetekben az összetevő fémek atomjai véletlenszerűen vannak elhelyezve, ami különleges szerkezetet eredményez és számos előnyös tulajdonságot biztosít. [6] [7] [8]

Ezek az ötvözetek új kutatási területet nyitottak a fémiparban, és sok ígéretes alkalmazást kínálnak a repülési iparban, az autógyártásban, a fémfeldolgozásban és más területeken. [9] [10]



1. ábra

HEA ötvözet véletlenszerű atomstruktúrája 50% C tartalom mellett. [11]

A HEA ötvözet szerepe a hidrogénállóság szempontjából

Az HEA (High-Entropy Alloy) bevonatok fontos szerepet játszhatnak a hidrogénállóságban különféle ipari alkalmazásokban, például az olaj- és gáziparban vagy az energiaiparban. A hidrogénállóság kritikus szempont lehet bizonyos környezetekben és alkalmazásokban, mivel a hidrogén diffúziója és korróziós hatása számos anyagot és szerkezetet károsíthat. [12] [13] [14] [15] [16]

Az HEA bevonatok előnyei a hidrogénállóság szempontjából:

- **Keményység és kopásállóság:** Az HEA bevonatok általában nagy keménységűek és kopásállóak lehetnek, ami segít megvédeni az alatta lévő szerkezetet a hidrogén okozta korróziótól és káros hatásaitól.
- **Kémiai stabilitás:** Az HEA bevonatok általában kémiai stabilitást mutatnak szélsőséges körülmények között is, amelyeknek kitett lehet a hidrogénállóság szempontjából kritikus ipari környezetekben.
- **Diffúzió-gátló hatás:** Az HEA bevonatok alkalmasak lehetnek a hidrogén diffúziójának csökkentésére az alatta lévő anyagba, ami segíthet megakadályozni a hidrogén bejutását és korróziót okozó hatásait.
- **Többcélú alkalmazhatóság:** Az HEA bevonatok sokoldalúan alkalmazhatók különböző alapanyagokon és felületeken, ami lehetővé teszi számukra a hidrogénállósággal kapcsolatos különböző ipari kihívások kezelését.

Az HEA bevonatok használata a hidrogénállóságban még aktív kutatási terület és további fejlesztésekre van szükség annak érdekében, hogy még hatékonyabb és megbízhatóbb bevonatokat fejlesszenek ki az ipari alkalmazások számára. A hidrogénállóság fontos szempont lehet az olaj- és gázfeldolgozó üzemekben, hidrogénenergia-iparban és más területeken, ahol a hidrogén jelen van vagy potenciálisan káros hatásokat okozhat.

Az HEA bevonatok esetében a hidrogén diffúzióját több tényező is befolyásolhatja:

- **Kémiai összetétel:** Az HEA bevonatok kémiai összetétele jelentősen befolyásolhatja a hidrogén diffúzióját. Bizonyos összetevők hozzájárulhatnak a hidrogén diffúziójának csökkentéséhez vagy gátlásához.
- **Szöveti szerkezet:** Az HEA bevonatok szerkezete és kristályos szerkezete is hatással van a hidrogén diffúziójára. Például az amorf vagy nagy fázisszámú HEA bevonatokban gyakran kevesebb lehetőség van a hidrogén diffúziójára, mint a kristályos szerkezetű bevonatokban.
- **Bevonat vastagsága:** Az HEA bevonatok vastagsága is befolyásolhatja a hidrogén diffúzióját. A vastagabb bevonatok általában hatékonyabbak a hidrogén diffúziójának gátlásában, mivel hosszabb időt vesz igénybe a hidrogén átjutása az anyagba.
- **Felületi tulajdonságok:** Az HEA bevonatok felületi tulajdonságai, például a durvaság és a porozitás, szintén befolyásolhatják a hidrogén diffúzióját. A simább és kevésbé porózus felületek általában kevésbé engedik át a hidrogént.

Az HEA bevonatok hidrogén diffúziójának megértése és kezelése kulcsfontosságú a hidrogénálló anyagok és szerkezetek tervezésében és fejlesztésében. A megfelelő anyagtulajdonságok és bevonatok kiválasztása segíthet minimalizálni a hidrogén okozta korróziót és más káros hatásokat az ipari alkalmazásokban.

Egyes HEA bevonatok felvitele acéllemezek felületére hengerléssel történik. Ez a folyamat magában foglalja az acéllemez felületére való hengerlést a HEA bevonat alapanyagával, majd a hőkezelést, amely során a bevonat és az alapanyag kölcsönhatása révén stabilizálódik a felvitt réteg. A hengerlés során a HEA bevonat anyaga egyenletesen terül el az acél felületén, lehetővé téve a kívánt tulajdonságok elérését, mint például a

korrozíóállóság, a kopásállóság vagy a hőállóság. A bevonatok kialakításának és jellemzésének alapos megértése kulcsfontosságú az optimális tulajdonságok eléréséhez és az alkalmazások széles körű kiaknázásához.

HEA ötvözet plattírozó hengerléssel történő felvitelének lehetősége az alapmátrixra:

Az HEA (High-Entropy Alloy) bevonatok felhordása acéllemezek felületére hengerléssel komplex folyamat, amely során az acéllemezek felületét HEA bevonat réteggel borítják. A hengerlés egy olyan mechanikus eljárás, amely során a forgó hengerek nagy felületi nyomással maradó alakváltozást hoznak létre a rétegekben és a súrlódás hatására lehetővé teszik a rétegek közötti kötés kialakítását.

Az HEA bevonatok felhordása hengerléssel általában a következő lépésekből áll:

Előkészítés: Az acéllemezeket előkészítik a bevonat felhordására. Ez magában foglalhatja a felület tisztítását, zsírtalanítását és előkezelését, hogy megfelelő tapadást biztosítsanak a bevonatnak.

Bevonat előkészítése plattírozó hengerléshez: Az HEA bevonatot előzetesen kész méretre hengerlik, majd előkészítik. Az előkészítés itt is magában foglalja a felület tisztítását, zsírtalanítását és előkezelését, hogy megfelelő tapadást biztosítsanak a rétegeknek.

Hengerlés: A hengerlési folyamat során az acéllemezeket és a HEA ötvözetet nagy nyomással hengerlik egy erre a célra kialakított speciális hengerállványon. Ez a folyamat általában meleghengerlés de attól függően, hogy milyen anyagokat kell összehengerelni hideghengerlés is lehetséges.

Nyomás és hőmérséklet: A hengerlési folyamat során a nyomás és a hőmérséklet kulcsfontosságúak a bevonat minőségének és tapadásának szempontjából. A megfelelő nyomás és hőmérséklet biztosítja a megfelelő alakváltozást és a bevonat megfelelő tapadását az acéllemezen.

Utókezelés: A hengerlés után lehet szükség a bevonat utókezelésre. Ilyen utókezelés lehet például hőkezelés vagy egyéb bevonat stabilizáló eljárások, melyekkel biztosíthatóak a kívánt szerkezetek és tulajdonságok.

4. SAJÁT OPTIMALIZÁLT SZÚRÁSTERV

A saját kísérletek tervezésekor négy tizedesjegy pontossággal számoltunk. Ugyan az állvány rugalmassága és a rugalmas alakváltozás okozta eltérés miatt az elméleti számítás és a tényleges kifutó vastagság jelentősen eltér egymástól. A számítás automatizálását a 4 tizedesjegy pontosság jelentősen megkönnyítette. A szűrastervek készítésekor arra törekedtünk, hogy a lehető legkevesebb szúrásban, de még megfelelő hullámosság mellett lehessen legyártani a készterméket.

A szűrastervek készítésének sarokpontjai:

- Kiinduló rétegarányok:
 - HEA: 2 mm
 - Acél mátrix: 10 mm
- Egy szúrásban elérhető magasságcsökkenés: max. 30%, de nem több mint 2 mm.

Ezek alapján a tervezési adatok:

- kiinduló vastagság: 12 mm
- végvastagság: 0,4 mm

Első 5 szúrásban kötő hengerlést kell végezni, ahol is a maximális magasságcsökkenés nem haladhatja meg a 0,2 mm-t

A kötő hengerlés optimalizált szűrastervét a 2., míg az elméleti továbbhengerlés szűrastervét a 3. ábra szemlélteti.

1. Első szúrás:

- Vastagság csökkentése: $12 - 0.2 = 11.8$ mm
- Maradék vastagság: 11.8 mm

2. Második szúrás:

- Vastagság csökkentése: $11.8 - 0.2 = 11.6$ mm
- Maradék vastagság: 11.6 mm

3. Harmadik szúrás:

- Vastagság csökkentése: $11.6 - 0.2 = 11.4$ mm
- Maradék vastagság: 11.4 mm

4. Negyedik szúrás:

- Vastagság csökkentése: $11.4 - 0.2 = 11.2$ mm
- Maradék vastagság: 11.2 mm

5. Ötödik szúrás:

- Vastagság csökkentése: $11.2 - 0.2 = 11.0$ mm
- Maradék vastagság: 11.0 mm

2. ábra

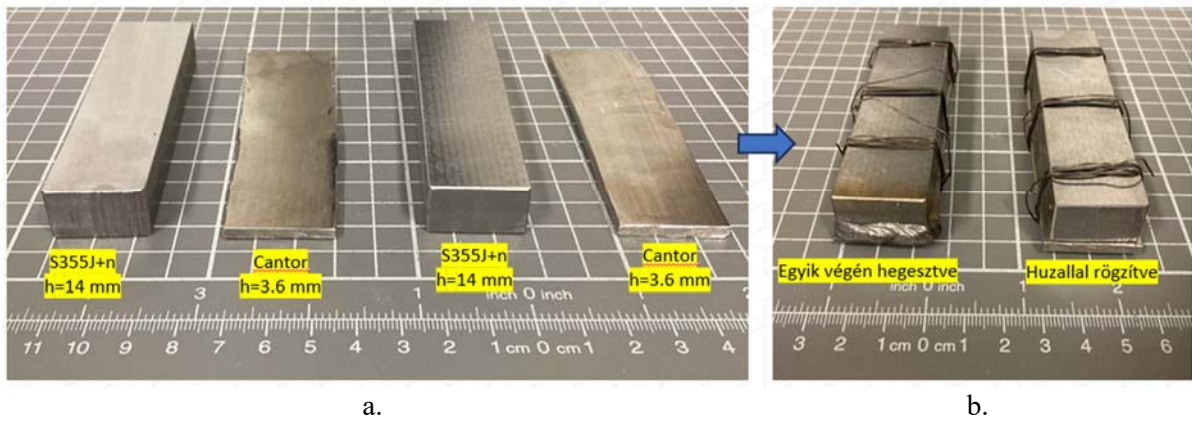
Kötő hengerlés szűrasterve

1. **Első szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 1.65 mm
 - Kifutó vastagság: 9.35 mm
2. **Második szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 1.4025 mm
 - Kifutó vastagság: 7.9475 mm
3. **Harmadik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 1.1921 mm
 - Kifutó vastagság: 6.7554 mm
4. **Negyedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 1.0133 mm
 - Kifutó vastagság: 5.7421 mm
5. **Ötödik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.8613 mm
 - Kifutó vastagság: 4.8808 mm
6. **Hatodik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.7321 mm
 - Kifutó vastagság: 4.1487 mm
7. **Hetedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.6223 mm
 - Kifutó vastagság: 3.5264 mm
8. **Nyolcadik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.528 mm
 - Kifutó vastagság: 2.9984 mm
9. **Kilencedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.4498 mm
 - Kifutó vastagság: 2.5486 mm
10. **Tizedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.3823 mm
 - Kifutó vastagság: 2.1663 mm
11. **Tizenegyedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.3249 mm
 - Kifutó vastagság: 1.8414 mm
12. **Tizenkettedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.2762 mm
 - Kifutó vastagság: 1.5652 mm
13. **Tizenharmadik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.2348 mm
 - Kifutó vastagság: 1.3304 mm
14. **Tizennegyedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.1996 mm
 - Kifutó vastagság: 1.1308 mm
15. **Tizenötödik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.1696 mm
 - Kifutó vastagság: 0.9612 mm
16. **Tizenhatodik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.1442 mm
 - Kifutó vastagság: 0.817 mm
17. **Tizenhetedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.1226 mm
 - Kifutó vastagság: 0.6944 mm
18. **Tizennyolcadik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.1042 mm
 - Kifutó vastagság: 0.5902 mm
19. **Tizenkilencedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.0885 mm
 - Kifutó vastagság: 0.5017 mm
20. **Huszas szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.0753 mm
 - Kifutó vastagság: 0.4264 mm
21. **Huszonegyedik szűrés:**
 - Magasságcsökkenés szűráson belül: 0.064 mm
 - Kifutó vastagság: 0.3624 mm

3. ábra
Továbbhengergelés elméleti szűrősterve



4. ábra
Előhengergelt HEA ötvözet darabolás előtt



a.

b.

5. ábra

Kiválasztott HEA és acélötvözet összepántolás előtt (a.) és után (b.)



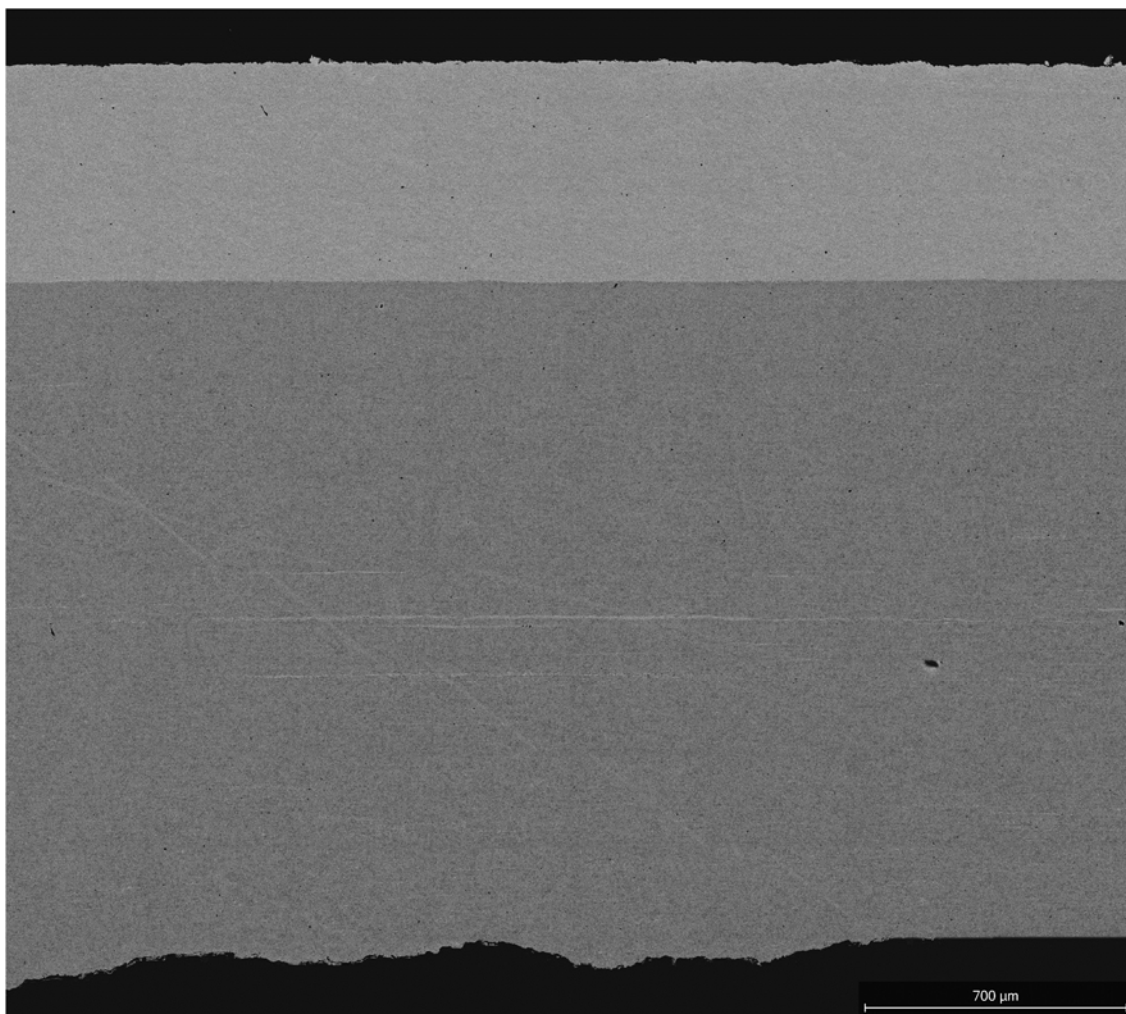
6. ábra

Kemencébe helyezett darabok hengerlésre várva



7. ábra

Hengerelt darabok hengerlés után (a „bimetál” hatás miatt felfele emelkedő végekkel)



8. ábra

Az összehegedt rétegek egyenletes határfelületet mutatnak

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KONKLÚZIÓ

A légiközlekedés fejlődése ellenére továbbra is problémát jelent az üzemanyagok fosszilis eredete és a szén-dioxid kibocsátás, ami hozzájárul a globális felmelegedéshez és más környezeti problémákhoz. Ezeknek egyik alternatív lehetősége a hidrogén használatában rejlik. A hidrogénes technológiák fejlesztési lehetőségei a közlekedésben, különös tekintettel a hidrogénhajtású repülőgépekre és az HEA bevonatokra rendkívül nagy potenciállal rendelkezik. Az HEA bevonatok fontosságát hangsúlyozni kell a hidrogénállóság szempontjából, amelyek nagy keménységet, kémiai stabilitást és diffúziógátló hatást biztosítanak, mivel a HEA bevonatok szerkezetüknek köszönhetően segíthetnek a hidrogén diffúziójának csökkentésében és a korrózió elleni védelemben.

Megállapítható, hogy a HEA bevonatok plattírozó hengerléssel történő felvitele az egyes rétegekre műszakilag megoldható. A kutatómunka során bizonyítást nyert, hogy létezik olyan optimális hengerléstechnológia, mellyel a réteghatáron a kötés kialakul, a határfelület egyenletes, míg a hengerelt lemez síkfekvő lesz. A meleghengerlés után a „bimetál” hatást ellensúlyozni szükséges a síkfekvés biztosítása érdekében.

Összességében elmondható, hogy a HEA ötvözetek alkalmasak lehetnek hidrogén tároló acélfelületek bevonására, a bevonatolást pedig szilárd fázisban plattírozó hengerléssel meg lehet valósítani.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1.] P. Csató és G. Óvári, A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben, Rep-TudKoz, köt. 34, sz. 3, o. 59–76, júl. 2023.
- [2.] R. Sengupta, Hydrogen as Aviation Fuel: Opportunities & Challenges, Journal of Aerospace Engineering & Technology, 2019.
- [3.] A. Ghafourian és N. Ehsan, A Review on Aviation Industry Emissions and Potential Mitigation Strategies, International Journal of Aerospace Engineering, 2020.
- [4.] J. Whitelegg és R. Bosworth, Hydrogen in Aviation: Fuelling the Future? The Aeronautical Journal, 2021.
- [5.] J.P. Neef, Hydrogen Fuel in Aviation, Aerospace America, 2020.
- [6.] J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin et al., A critical review of high entropy alloys and related concepts, Acta Materialia, 2004.
- [7.] D.B. Miracle és O.N. Senkov, Current understanding of the structure and properties of high entropy alloys, Journal of Materials Research, 2017.
- [8.] Y. Zhang, Y.J. Zhou, J.P. Lin et al., High-entropy alloys: A critical assessment of their founding principles and future prospects, Intermetallics, 2018.
- [9.] B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan, High-entropy alloys by mechanical alloying: A review, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2010.
- [10.] Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang et al., Recent advances in high-entropy alloys, Progress in Materials Science, 2014.
- [11.] Saro, Ching Wai-Yim, Subtle Variations of the Electronic Structure and Mechanical Properties of High Entropy Alloys With 50% Carbon Composites, Frontiers in Materials, vol. 7, 2020.
- [12.] X.H. An, W.W. Wu, W.M. Wang, et al., "High-entropy alloy coatings: A review," Journal of Alloys and Compounds, vol. 819, 153084, 2020.
- [13.] Y.F. Kao, Y.C. Chen, S.J. Lin, et al., "Development and characterization of high-entropy alloy coatings on steel substrate," Surface and Coatings Technology, vol. 283, pp. 384-392, 2015.
- [14.] J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, et al., "High-entropy alloy coatings: Recent developments and prospects," Current Opinion in Solid State and Materials Science, vol. 25, no. 4, pp. 100922, 2021.
- [15.] C.S. Chien, S.K. Chen, J.W. Yeh, "Properties and applications of high-entropy alloy coatings: A review," Materials Science and Engineering: A, vol. 754, pp. 55-75, 2019.
- [16.] M.C. Gao, J.W. Yeh, P.K. Liaw, "High entropy alloy (HEA) thin film materials: Progress and challenges," Current Opinion in Solid State and Materials Science, vol. 20, no. 6, pp. 319-328, 2016.