

2024. I. SZÁM
157. ÉVFOLYAM

BKL

JÓ SZERENCSET!

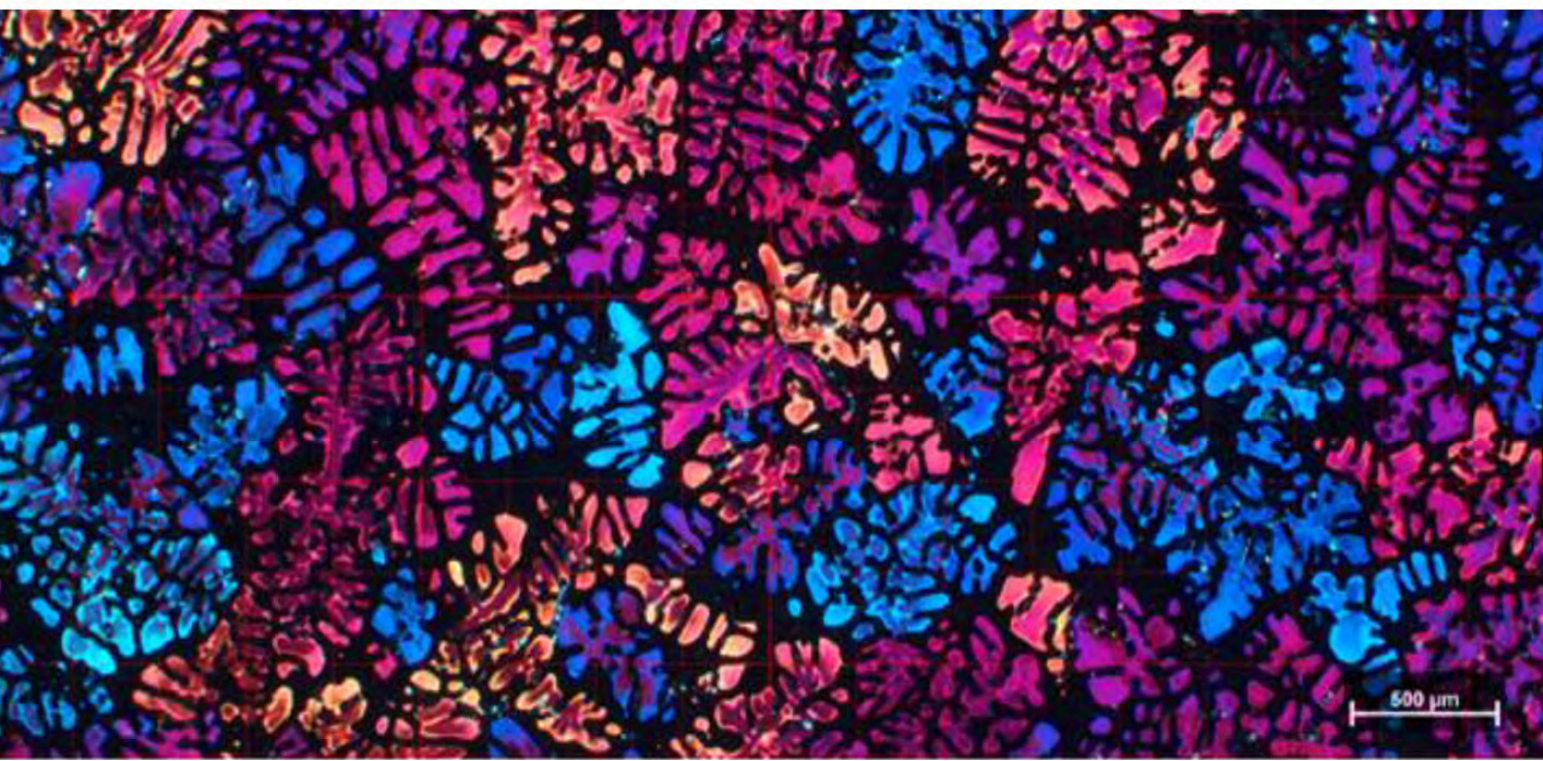
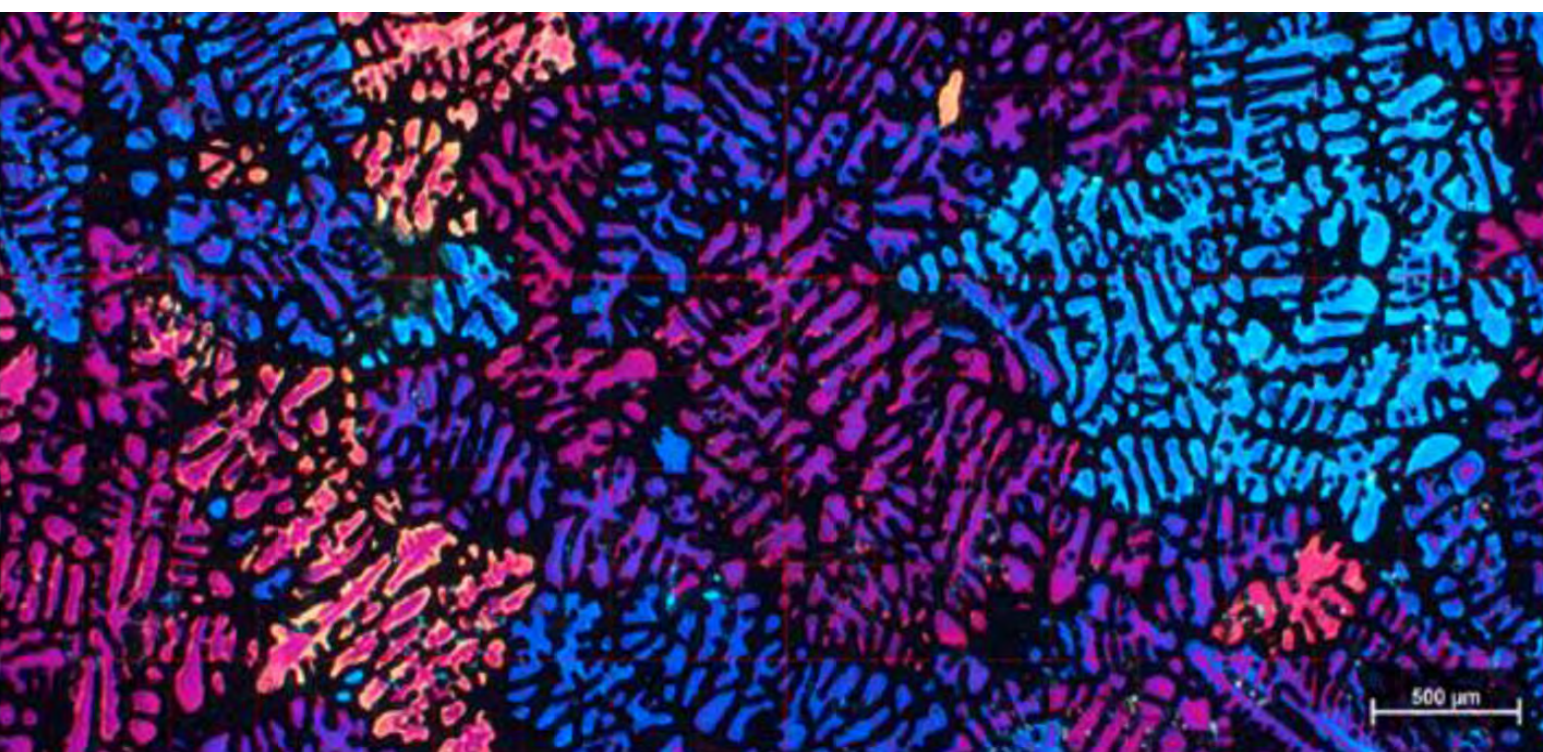


BÁNYÁSZATI és KOHÁSZATI

LAPOK

AZ ORSZÁGOS MAGYAR BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI
EGYESÜLET LAPJA ALAPÍTOTTA PÉCH ANTAL 1868-BAN

**Barker-maratott minták polarizációs
szűrővel készített szövetségi felvételei**



FROM THE CONTENTS

LEVENTE BOGOLY, TAMÁS MENDE, GYÖRGY FEGYVERNEKI, GÁBOR GYARMATI: Comparative analysis of the effect of different fluxes and Al-5%Ti-1%B master alloy addition on the melt quality of EN AC-45500 alloy 2	SAMUEL AYIPA ARTHUR, RAYHAN ALDIZAN FARRENZO, JÁNOS FÖLDESSY: From the Critical Raw Materials Marathon data collections – 1. Brief review of critical mineral raw materials for battery production 31
ISTVÁN PÉTER KOVÁCS, LEVENTE RONCZYK, ERIK ADORJÁN, ÁDÁM KESZTHELYI, DÁNIEL MÁRTON KOVÁCS, ZOLTÁN ORBÁN, BOTOND KERTÉSZ: InSAR applications for quarry monitoring 12	BEÁTA BURÓ: Technological overview of the green transition of the steel industry and its techno-economic implications 41
ERVIN FINTA: On the equations of motion and the stability of the railway wheelset 22	ÁDÁM THIELE, LÁSZLÓ HÁRI: Metallurgical aspects of the iron bloom formation – Experiments in side-blast forge ... 51
MOHAMED BADAWI, LÍVIA LESKÓNÉ MAJOROS, EVANE CÉSAR JOÃO DE CUÑHA, ELYAS HADDAD, AHMAD SAIFO,	* * *
	3B Hungária Ltd. 30

Felelős szerkesztő:

Hajnal József

E-mail:
hirfor2000@gmail.com

A Szerkesztőbizottság tagjai:

Bariczáné Szabó Szilvia, Bíró Nóra,
Dr. Dovrtel Gusztáv, Fisch Iván,
Dr. Földessy János,
Dr. Harcsik Béla, Dr. Kóródi István,
Dr. Ladányi Gábor, Livó László,
Lois László, Molnár József,
Molnár Zsolt, Pali Sándor,
Schudich Anna, Dr. Szabó Tibor,
Székács Annamária,
Dr. Szunyogh István, Dr. Tardy Pál,
Dr. Török Tamás, Dr. Vadászi Marianna
Dr. Vojuczki Péter

Kiadja:

Országos Magyar Bányászati és
Kohászati Egyesület (OMBKE),
1107 Budapest, Hizláló tér 1.
Telefon/Fax: 1-201-7337
www.ombke.hu

A kiadásért felel:

Dr. Hatala Pál

Belső tájékoztatásra,
kereskedelmi forgalomba nem kerül.
A közölt cikkek fordítása, utánnomása,
sokszorosítása és adatrendszerekben való
tárolása kizárólag a kiadó engedélyével
történhet.

A BKL lapszámait az OMBKE
honlapján – www.ombke.hu –
érhetők el.

HU ISSN 2498-9322

TARTALOM

BOGOLY LEVENTE, MENDE TAMÁS, FEGYVERNEKI GYÖRGY, GYARMATI GÁBOR:

Eltérő kezelősók és Al-5%Ti-1%B előötvözet-adagolás
olvadékminőségre gyakorolt hatásának összehasonlító
vizsgálata EN AC-45500 ötvözet esetén 2

KOVÁCS ISTVÁN PÉTER, RONCZYK LEVENTE, ADORJÁN ERIK, KESZTHELYI ÁDÁM, KOVÁCS DÁNIEL MÁRTON, ORBÁN ZOLTÁN, KERTÉSZ BOTOND:

A műholdradar-interferometria alkalmazásának lehetőségei
a kőbányászati szektorban 12

FINTA ERVIN:

A vasúti kerék mozgásegységeiről és stabilitásáról 22

MOHAMED BADAWI, LESKÓNÉ MAJOROS LÍVIA I, EVANE CÉSAR JOÃO DE CUÑHA, ELYAS HADDAD, AHMAD SAIFO, SAMUEL AYIPA ARTHUR, RAYHAN ALDIZAN FARRENZO, FÖLDESSY JÁNOS:

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből –
1. Az akkumulátor gyártáshoz használt kritikus ásványi
nyersanyagok rövid áttekintése 31

BURÓ BEÁTA:

Az acélipar zöld átállásának technológiai áttekintése, annak
műszaki gazdasági vonatkozásai 41

THIELE ÁDÁM, HÁRI LÁSZLÓ:

A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai –
modellkísérletek oldalszeles kovácstűzhelyben 51

(for English titles see B2 page)

Inzert: Bányaterv Mérnökiroda Zrt.

WEIR Minerals Sand Wash Plant

3B Hungária Kft. 30

Címlapon: Barker-maratott minták polarizációs szűrővel készített
szövetképi felvételei (Publikáció a 2. oldalon)

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával jelenik meg.

Eltérő kezelősók és Al-5%Ti-1%B előötvözet-adagolás olvadáskminőségre gyakorolt hatásának összehasonlító vizsgálata EN AC-45500 ötvözet esetén

Comparative analysis of the effect of different fluxes and Al-5%Ti-1%B master alloy addition on the melt quality of EN AC-45500 alloy

BOGOLY LEVENTE,

kohómérnök MSc-hallgató, E-mail: bogoly.levente@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4634-0690
Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet

DR. MENDE TAMÁS,

egyetemi docens, E-mail: tamas.mende@uni-miskolc.hu, ORCID: 0000-0002-3034-9823
Miskolci Egyetem, Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

DR. FEGYVERNEKI GYÖRGY,

termék- és folyamatmérnökségi osztályvezető,
E-mail: gyorgy.fegyverneki@nemek.com, ORCID: 0000-0001-5550-9080
Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft., 9027 Győr Ipari park

GYARMATI GÁBOR,

tanársegéd, E-mail: gabor.gyarmati@uni-miskolc.hu, ORCID: 0000-0001-7568-6922
Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet



Kutatómunkánk során rotoros gáztalanító olvadékkezelést hajtottunk végre három különböző sókeverékkel és Al-5%Ti-1%B előötvözet-adagolással Al-7%Si-0,5%Cu-0,4%Mg ötvözetben. A vizsgálati eredmények kiértékelése során a különböző segédanyagokkal történő kezelések olvadék- és öntvényminőségre gyakorolt hatásait hasonlítottuk össze, kiemeltképpen figyelve a szemcsefinomítás hatékonyságára és az öntvényekben kialakuló porozitás mértékére. Vizsgáltuk továbbá a kezelések során elérhető olvadéktisztítás és gáztalanítás hatékonyságát is.

Kulcsszavak: öntészeti alumínium ötvözet, olvadékkezelés, rotoros gáztalanítás, olvadéktisztítás, szemcsefinomítás, sókeverék, előötvözet

Rotary degassing coupled with the addition of different fluxes is the most common melt treatment method in aluminum foundries, due to its high efficiency in inclusion removal and the possibility of grain refining. In this study, the effect of different fluxes and master alloy addition was investigated on the melt and casting quality in different stages of the melt preparation.

Four experiments were conducted, which are labeled as “A”, “B”, “C” and “D”. In all cases, EN AC-45500 alloy (the standard composition in weight percentage is 7% Si, 0.5% Cu, 0.4% Mg, 0.12% Ti) was melted in a shaft-type melting furnace and then approximately 1000 kg was poured into a resistance-heated holding crucible furnace. In case “A” we applied a melt cleaning flux, whereas in case “D” we used the same flux combined with the addition of Al-5%Ti-1%B grain refining master alloy. In cases “B” and “C”, cleaning and grain refining fluxes from different suppliers were used.

Each experiment consisted of 5 melt treatment cycles with 9 minutes long treatment time, the N₂ purging gas flow rate was 20 ± 2 l/min and the pressure was equal to 5 ± 1 bar. The rotational speed of the impeller was 490 rpm during the vortex formation and 380 rpm in the degassing phase. 800 ± 30 g of the granulated fluxes was added in all cases. The melt cleanliness and grain refinement were examined in different stages of the melt preparation; after pouring it into the crucible, right after and 15 minutes after the melt treatment, and finally before the next pouring into the holding furnace (approximately 200 kg residual melt at the bottom of the crucible).

During the experiments, the evolution of the inclusion content was investigated by the fracture surfaces of K-mold samples. The mechanical properties (elongation, yield strength, ultimate tensile strength) were measured by tensile test of samples machined from the castings, and the quality index was also calculated. The oxide inclusions found on the fracture surfaces of the K-mold samples were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS).

The degree of grain refinement and the nucleation temperature were investigated by thermal analysis in different stages of the melt preparation. The exact grain size was measured by image analysis of the polished and Barker-etched thermal analysis samples. The susceptibility to pore formation was compared by Density Index samples, X-ray analysis, and metallographic investigation of polished surfaces from the castings.

The chemical composition of the melt was measured by optical emission spectroscopy (OES) in different stages of the melt preparation, while the phase composition of the applied fluxes was analyzed by X-ray diffraction (XRD).

Keywords: aluminum casting alloy, melt treatment, rotary degassing, melt cleaning, grain refining, flux, master alloy

1. Bevezetés

Napjainkban az öntészeti alumínium-szilícium ötvözeteket (Al-Si ötvözet) széles körben alkalmazzák a jármű- és repülőgépiparban, ahol a magas minőségügyi követelményeket is kielégítő öntvények gyártása érdekében, elengedhetetlen szempont a megfelelő metallurgiai minőségű fémolvadék előállítása. Szükséges az alumíniumolvadék oxidzárványoktól való megtisztítása, az oldott gáztartalom csökkentése, valamint a kristályosodás során lejátszódó folyamatok kontroll alatt tartása. Ilyen többek között a primer alumíniumfázis (α -Al) szemcsefinomítása, az eutektikum morfológiájának módosítása, továbbá az intermetallikus vegyületfázisok minőségének, morfológiájának és mennyiségének szabályozása.

Az alumíniumolvadékokban jelenlévő oxidzárványok állandó velejárai a napjainkban alkalmazott öntészeti és olvadékkezelési technológiáknak. Ezt eredményezhetik többek között a nem megfelelően kivitelezett olvadék-előkészítési műveletek, valamint az alumínium nagy reakciókészsége is. Ezen oxidzárványok önmagukban is erősen rontják a formaképző képességet, a táplálhatóságot és az öntvények szilárdsági tulajdonságait, továbbá az oldott gáztartalommal együtt aktív szerepük van az anyaghiányos helyek, azaz a lunkerek és a porozitás kialakulásában [1–4].

A szemcsefinomítás jelentősen befolyásolja az öntvények mechanikai tulajdonságait, a kisebb átlagos szemcseméretet, és egyenletesebb szemcseméreteloszlást eredményez növelve ezzel a szilárdsági és szívóssági értékeket. Javíthatók továbbá az önthetőségi tulajdonságok, a táplálhatóság, csökken a melegrepe-

déssel szembeni érzékenység, és ellenállóbbá válnak az öntvények a fásztó igénybevételekkel szemben. Az öntödék számos olvadékkezelő eljárást, valamint olvadéktisztító és szemcsefinomító segédanyagot alkalmaznak világszerte. Éppen ezért kulcsfontosságú szerepe van az alkalmazott segédanyagok megválasztásának, valamint adagolásuk módjának és mennyiségének, kiemelten a nagy kapacitású szériagyártások esetén [1, 2, 5, 6].

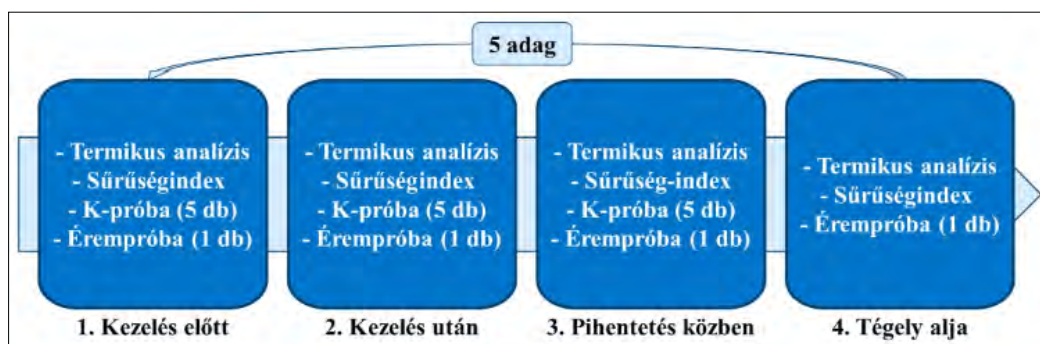
2. Vizsgálati körülmények

Kutatómunkánk során Al-7%Si-0,5%Cu-0,4%Mg ötvözetolvadék rotoros gáztalanítással egybekötött, gépi sóadagolós kezelőeljárásainak olvadék- és öntvényminőségre gyakorolt hatásait hasonlítottuk össze. A kapcsolódó kísérletekre üzemi körülmények között került sor a Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft. gyáregységében.

Vizsgálataink alatt összesen négy kísérletet végeztünk, melyek során Al-5%Ti-1%B szemcsefinomító előötvetetet és három különböző sókeveréket („A”, „B”, „C”) alkalmaztunk az olvadékkezelések közben (1. táblázat). Minden kísérlet alkalmával öt adag, egyenként körülbelül egy tonna tömegű folyékony fémot vizsgáltunk. A mintavételezés minden esetben az ellenállásfűtésű tégelyes hőtartó kemencéből történt az 1. ábra szerint. Az olvadékciklus elején a transzportüstből való áttöltés és felzékretég-eltávolítás után került sor az első minták öntésére. A gáztalanításkor keletkezett salakréteg eltávolítását követően, a második, majd az olvadék pihentetése közben, 15 perc elteltével a harmadik mintavétel is megtörtént. Az utolsó próbák öntése a tégely aljáról történt, amikor

1. táblázat. Olvadékkezelések során alkalmazott segédanyagok

Kísérlet	Olvadéktisztító sókeverék	Szemcsefinomító segédanyag	Sóadagolás	
			Tömeg [g]	Időtartam [s]
A	„A” tisztító	–	800 ± 30	28
B	„B” tisztító és szemcsefinomító sókeverék		800 ± 30	43
C	„C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék		800 ± 30	50
D	„A” tisztító	AlTi5B1(14 pálca)	800 ± 30	28



1. ábra. A mintavételezés folyamata a hőntartó kemencéből

a fémszint egy bizonyos érték alá (körülbelül 200 kg olvadék) csökkent a gyártás következtében. A kísérlet során az olvadékhőmérséklet jelentősen nem változott, végig 760 ± 10 °C volt.

Kísérleteink során a primer alumíniumfázis kristályosodási túlhűlésének megállapítása céljából minden mintavételezéskor termikus analízisvizsgálatot végeztünk. A körülbelül 100 g tömegű olvadék öntőformája egy 200 °C-ra előmelegített acéltégely volt. A mintadarab hőmérsékletének időbeli változását egy védőcsővel ellátott K-típusú hőelem segítségével, 10 Hz-es adatgyűjtési frekvenciával rögzítettük [5].

A különböző szemcsefinomító segédanyagokkal végzett olvadékkezelések hatására elért szemcseméret kvantitatív jellemzése érdekében a termikus analízismintákat elvágtuk, és metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A polírozást követően a mintákat Barker-reagens felhasználásával színesmarattuk, majd polarizációs szűrővel ellátott fénymikroszkóppal vizsgáltuk. Az elkészített szövtfelvételek kiértékelése során meghatároztuk az α -Al-szemcsék egységnyi területre eső számát és lineáris metszékhosszát is az ImageJ Fiji képelemző szoftver segítségével [7, 8].

Az eltérő tisztító sókeverékekkel végzett kezeléseken átesett olvadékok gázporozitás képződési hajlamának kvantitatív minősítése céljából sűrűségindex-meghatározást alkalmaztunk, melyhez két minta szükséges. Az egyik egy acéltégelybe öntött 80 mbar nyomáson dermedő (RPT), a másik egy rézkokillába öntött atmoszférikus nyomáson dermedő (ATM) minta. A vákuumkamrában lejátszódó kristályosodás során az alumíniumolvadéokban nagymértékben lecsökken a hidrogénatomok oldhatósága, és könnyebben végbemegy a hidrogéngáz pórusok belsejében történő kiválása. Mindez a pórusok látványos növekedését és így a minta sűrűségének csökkenését okozza. Ezzel szemben a rézkokilla jó hővezetőképessége által biztosított nagy lehűlési sebesség miatt az atmoszférikus nyomáson dermedő mintában a pórusnövekedési folyamatoknak alig van idejük végbemenni, így az ATM-minták sűrűsége szinte megegyezik az alumíniumötvözet elvi sűrűségével. A sűrűségindex-értékek

kiszámítása a két minta sűrűsége alapján történik [4, 9, 10].

Az olvadék zárványtartalmának minősítése céljából mintavételezésenként öt darab K-kokillás próbát öntöttünk. A minták eltérését követően a töretfelületeket sztereomikroszkóp segítségével vizsgáltuk, hogy a pontosság érdekében a szabad szemmel nem látható, apróbb zárványok is jól megkülönböztethetők legyenek az alapszövettől [3, 4].

A K-kokillás próbák töretfelületein talált zárványok közül néhányat pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével is megvizsgáltuk, valamint energiadiszperzív mikroszondával (EDS) is elemeztük.

A fémfürdő kémiai összetételében bekövetkező változások vizsgálata érdekében minden mintavételezés során egy darab érempróbát öntöttünk. Ezeket később optikai emissziós spektroszkópiával vizsgáltuk mintánként három különböző mérési pontban.

A gyártócégek többnyire nem közlik az általuk forgalmazott kezelősók kémiai összetételét, ezért az egyes sóalkotó vegyületfázisok meghatározása érdekében röntgendiffraktométeres (XRD) vizsgálatot alkalmaztunk. Az azonosított komponensek mennyiségi meghatározása Rietveld-analízis által történt.

Egy adag fémolvadék körülbelül 26–29 hengerfej öntésére volt elegendő, így kísérletenként átlagosan 130 és 145 között volt a termelt darabszám. Az öntvények közül kísérletenként hat darabot választottunk ki, melyekből szakító próbapalcákat, valamint egy porozitásproblémával rendelkező területről mintacsiszolatokat munkáltunk ki.

Az olvadékkezelés folyamata teljesen automatizált, így a rotoros gáztalanítás és a kezelősó-adagolás is az előre beállított értékek szerint történt (2. táblázat). A kezelési paraméterek minden kísérlet során azonosak voltak. A tölcserképzés és sóadagolás három részre tagolódott, az előtölcserképzés, a sóadagolás, mely minden esetben azonos mennyiségben, de eltérő idők alatt történt (1. táblázat), majd végül az utótölcser került sorra. A gáztalanítás során az alkalmazott öblítőgáz kváziinert, N_2 -gáz volt. A folyamat időtartama átlagosan 9 perc volt, ezt követően a rotor

2. táblázat. A kísérletek során alkalmazott olvadákezelési paraméterek

Tölsérképzés			Gáztalanítás					
Előtöltés	Sóadagolás	Utótöltés	Rotor fordulatszáma		Időtartam	Öblítőgáz	Gázátfolyás	Gáznyomás
5 s	800 ± 30 g	20 s	490 rpm	380 rpm	9 min	N ₂	20 ± 2 l/min	5 ± 1 bar

és a lapát kiemelkedett a fémfürdőből, és megtörtént a képződött salakréteg eltávolítása.

3. A vizsgálati eredmények kiértékelése

3.1. A szemcsefinomító sókeverékek kémiai összetételének elemzése

A kísérletek során alkalmazott sókeverékek közül a „B” és „C” nemcsak olvadáktisztító, hanem szemcsefinomító hatással is bír a gyártók szerint. Az XRD-vizsgálattal beazonosított vegyületalkotók és az ezekhez tartozó koncentrációértékek a 3. és 4. táblázatban láthatóak.

A „B” jelű sókeverék eredményei alapján összesen 12 vegyület jelenlétét sikerült detektálni, így elmondható, hogy egy komplex, sokalkotós összetételű sókeverékről van szó. Az egyszerűbbektől kezdve egészen sok elemből álló vegyületek is megtalálha-

tóak, így a molekulatömegek is igen széles skálán mozognak. Éppen ezért az összetételi arányok szemléletesebb bemutatása érdekében a Rietveld-analízissel kapott tömegszázalékokat mólszázalékba is átszámítottuk az egyes sóalkotók moláris tömegének segítségével. A táblázatban feltüntetett sóalkotók között megtalálhatóak kloridok, fluoridok, oxidoldó és oxidáló vegyületek is. Viszonylag nagy mennyiségben vannak jelen titán- és bórtartalmú fázisok, melyek az egyéb hatásaik mellett a szemcsefinomító célú TiB₂-szemcsék képződésében is részt vehetnek. A titánnal történő mikroötvözés céljából legelterjedtebben alkalmazott sóalkotó a K₂TiF₆, melyet magas ára miatt a gyártó feltehetőleg más titántartalmú oxidásványokkal (K₂Ti₆O₁₃, CaTiO₃) próbált bizonyos mennyiségben kiváltani [11, 12].

A „C” jelű sókeverék eredményei alapján összesen hat vegyület jelenlétét sikerült detektálni, így az előzőhöz képest egyszerűbb összetételű kezelőanyagról beszélhetünk. A KCl- és NaCl-komponenseket gyakran alkalmazzák együttesen, mivel viszonylag alacsony olvadáspontú (657 °C) eutektikumot képeznek egymással. A NaF szintén elterjedt vegyület, mely a zárványok sóolvadék általi megfelelő nedvesíthetőségéért felel. A szemcsefinomító hatású TiB₂-fázishoz szükséges bórtartalmat a KBF₄ biztosítja, a titántartalmat pedig K₂TiF₆ és K₂NaTiOF₅ vegyületek, melyek közül az utóbbi feltehetőleg oxidáló hatással is bíró oxifluorid komponens [11–14].

3.2. A kezelőanyagok hatása az olvadék kémiai összetételére

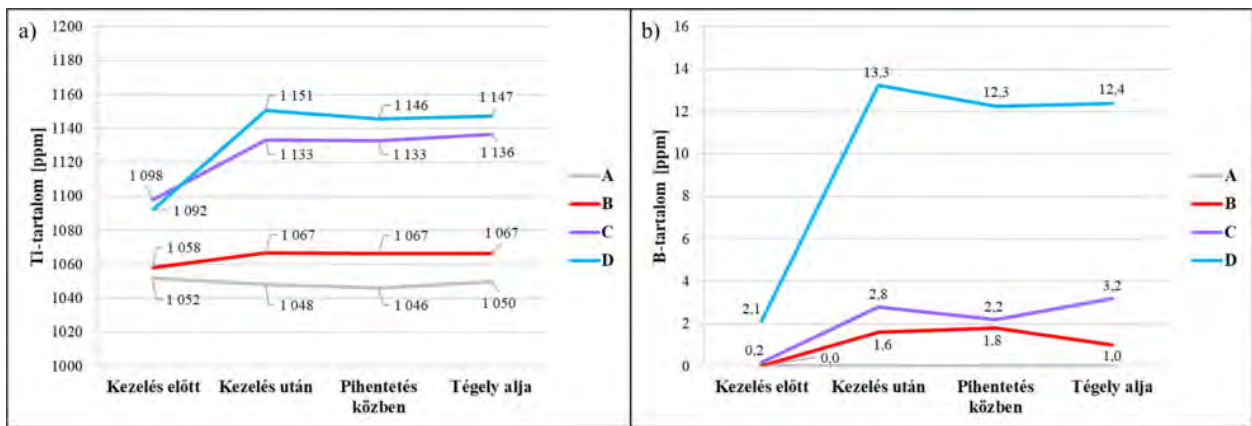
Az optikai emissziós spektroszkópia eredményei alapján elmondható, hogy a titán és bór kivételével nem volt jelentős változás a vizsgált elemek koncentrációja esetében. A különböző titán- és bórtartalmú vegyületfázisokat elsősorban szemcsefinomítás céljából alkalmazzák az öntészetben, így ennek hiányában az (A) kísérlet során mérhetőek a legkisebb koncentrációértékek

3. táblázat. A „B” sókeverék diffraktogramja alapján azonosított vegyületek és koncentrációik

Sóalkotó [-]	Moláris tömeg [g/mol]	Koncentráció [m/m%]	Koncentráció [n/n%]
KBF ₄	125,91	29,28	41,67
K ₂ B ₄ O ₇	233,44	20,92	16,05
K ₂ Ti ₆ O ₁₃	573,42	11,55	3,61
Ca ₄ Mg(B ₄ O ₆ (OH) ₆)(CO ₃) ₂	546,02	8,67	2,84
Na ₂ Ca(PO ₄)F	200,10	6,27	5,62
K ₂ TiF ₆	240,07	5,28	3,94
NaNO ₃	85,01	5,28	11,13
KCl	74,60	3,29	7,89
KCa ₄ Si ₈ O ₂₀ (F,OH)·8H ₂ O	924,47	3,19	0,62
CaTiO ₃	135,97	2,79	3,67
NaCa ₂ (Mg ₄ Al)(Si ₆ Al ₂)O ₂₂ F ₂	840,00	1,99	0,42
Na ₂ CO ₃	106,01	1,49	2,53

4. táblázat. A „C” sókeverék diffraktogramja alapján azonosított vegyületek és koncentrációik

Sóalkotó [-]	Moláris tömeg [g/mol]	Koncentráció [m/m%]	Koncentráció [n/n%]
K ₂ TiF ₆	240,07	25,83	10,95
NaCl	58,50	25,53	44,43
KBF ₄	125,91	19,52	15,79
K ₂ NaTiOF ₅	260,07	13,51	5,29
KCl	74,60	13,51	18,44
NaF	42,00	2,10	5,10



2. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban öntött érempróbakon mért átlagos titán- és bórtartalom

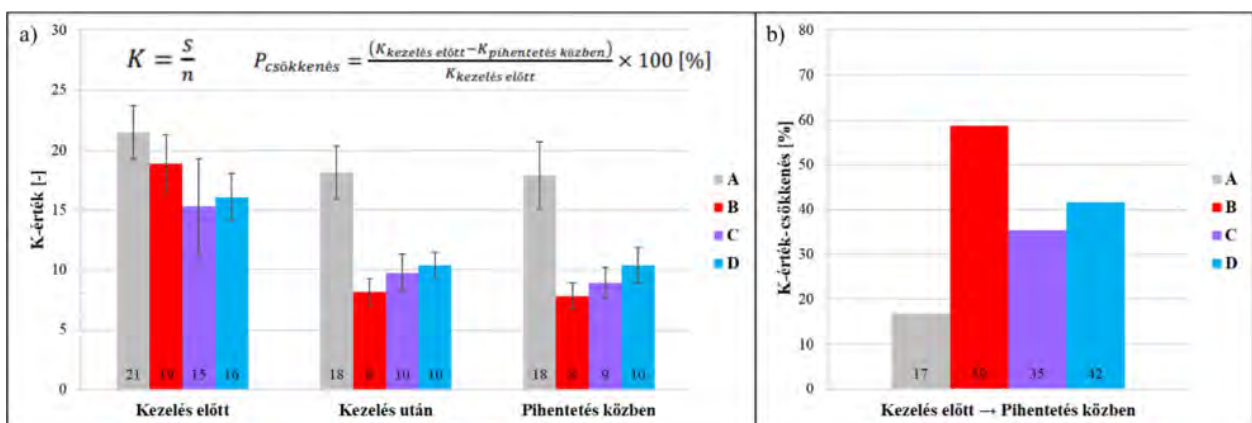
(2. ábra). A többi kísérlet esetén mind a titántartalom, mind a bórtartalom növekedése megfigyelhető a szemcsefinomítás következtében. Ezek közül az Al-5%Ti-1%B előtötvözet-adagolás hatására nőttek legnagyobb mértékben a koncentrációk. A (C) és (D) esetekben az ötvözt követően az értékek kismértékű csökkenése, majd a tégely alján növekedése tapasztalható. Ez feltehetőleg a szilárd vegyületfázisok ülepedésének és ezáltal a tégely alján bekövetkező dúsulásának köszönhető [1].

3.3. A zárványtartalom vizsgálata

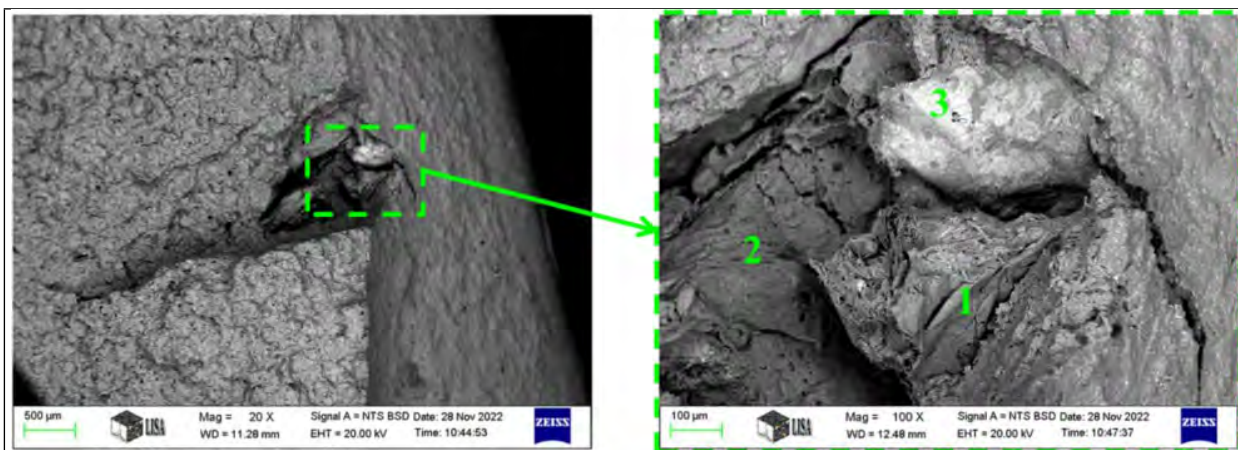
A K-kokillás próbák töretfelületeinek sztereomikroszkóp segítségével történő kiértékelése során kapott eredményeket a 3a. ábra mutatja be. Megállapítható, hogy minden kísérlet során a kezelés előtti állapot volt a legrosszabb, továbbá jól látható, hogy az egyes kísérletek kiinduló olvadátkinősége eltérő volt. Éppen ezért tartottuk fontosnak a K-értékek százalékos csökkenésének összehasonlítását, mellyel a kiindulási állapotoktól valamelyest függetlenül is képet kaphatunk a különböző tisztítósók hatékonyságáról. A 3b. ábra alapján elmondható, hogy az „A” kezelőszóval végzett olvadátkisztítás (A kísérlet) hatékonyságát Al-5%Ti-1%B előtötvözet adagolásával kiegészítve

(D kísérlet) növelni lehet. A pihentetés közben a legkisebb zárványtartalom-értékek a (B) és (C) kísérletek során tapasztalhatóak, viszont közöttük nincs nagy eltérés. A százalékos csökkenéseket figyelembe véve jól látható, hogy a „B” sókeverék bizonyult hatékonyabbnak.

A 4. ábrán bemutatott töretfelület SEM-felvétele és EDS elemzése alapján arra következtethetünk, hogy mindhárom mérési ponton $MgO \cdot Al_2O_3$ spinell oxidzárvány van jelen. A nagyított felvételen apró gyűrődéseket is megfigyelhetünk bizonyos helyeken, melyek tipikusan oxidhártyára utaló jelek. Amennyiben feltételezzük, hogy egy szétvált kettős oxidhártyáról van szó, úgy magyarázatot kapunk a mért nitrogéntartalomra is, mely a bezárt levegő oxidációját követő nitridációs folyamatok eredménye lehet. Az összetétel elemzése alapján több helyen kimutatható az eutektikus szilícium módosítására szolgáló stroncium jelenléte is. Ennek pontos megjelenési formája nem azonosítható, azonban feltehetőleg oxigén vagy egyéb elemekkel alkotott vegyületek formájában maradt vissza az oxidhártya felületén. Nyomokban megtalálhatóak még tipikus sóalkotó elemek is, mint nátrium, kalcium és klór, melyek nem tudtak az oxidhártyával a salakrétegbe üszni, így visszamaradtak az olvadátkban. Megjelenési formájuk, a mért összetétel



3. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban jellemző K-értékek és K-érték-csökkenések



Mérési pont	Al [n/n%]	Mg [n/n%]	O [n/n%]	N [n/n%]	Si [n/n%]	Sr [n/n%]	Cu [n/n%]	Fe [n/n%]	Na [n/n%]	Ca [n/n%]	Cl [n/n%]
1	71,13	6,30	16,01	0,88	4,82	–	0,67	0,19	–	–	–
2	47,44	13,03	32,72	0,97	3,38	0,70	0,08	0,09	1,06	–	0,52
3	42,38	6,19	36,88	0,17	3,27	8,60	0,20	0,21	0,90	0,73	0,48

4. ábra. A K-kokillás próba töretfelületén megtalálható oxidzárvány SEM-felvétele

alapján lehet például NaCl, CaCl₂, MgCl₂ vagy AlCl₃ vegyület. A mérőműszer által gerjesztett térfogatban megtalálhatók még szilícium és réz ötvözők is, továbbá vas szennyezőelem.

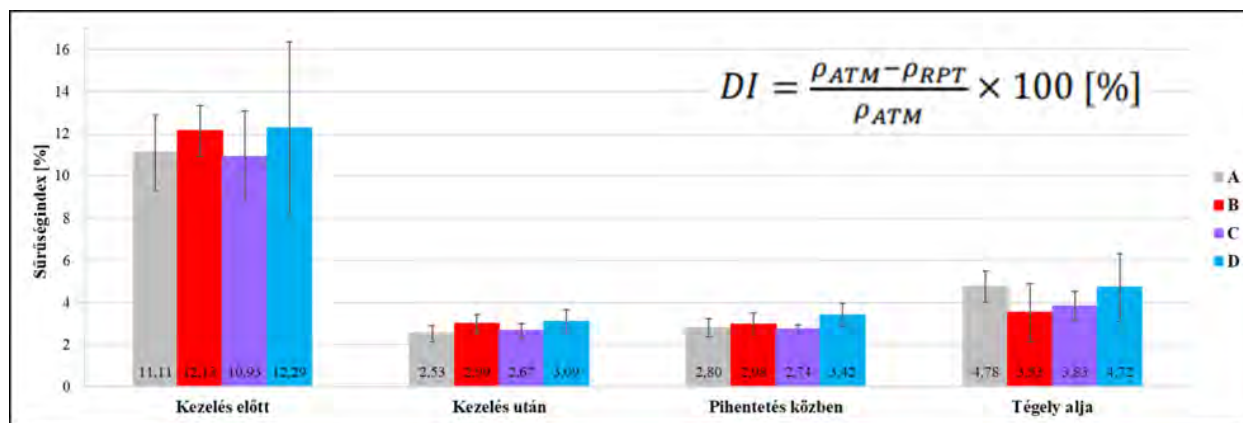
3.4. A sűrűségindex meghatározása

A sűrűségindex-értékeken (5. ábra) jól látható, hogy minden olvadékkezelés során jelentős mértékben csökkent (körülbelül 9% DI-csökkenés) az olvadék gázporozitás-képződési hajlama. Az (A) és (C) kísérletek kiinduló értéke körülbelül 11%, a (B) és (D) kísérletek kiinduló értéke pedig valamivel rosszabb, körülbelül 12% volt. Ez a tendencia a kezelés után is látható, ugyanis mindenhol hasonló arányban, körülbelül 75%-kal csökkent a sűrűségindex értéke. Elmondható, hogy az egyes olvadékkezelő

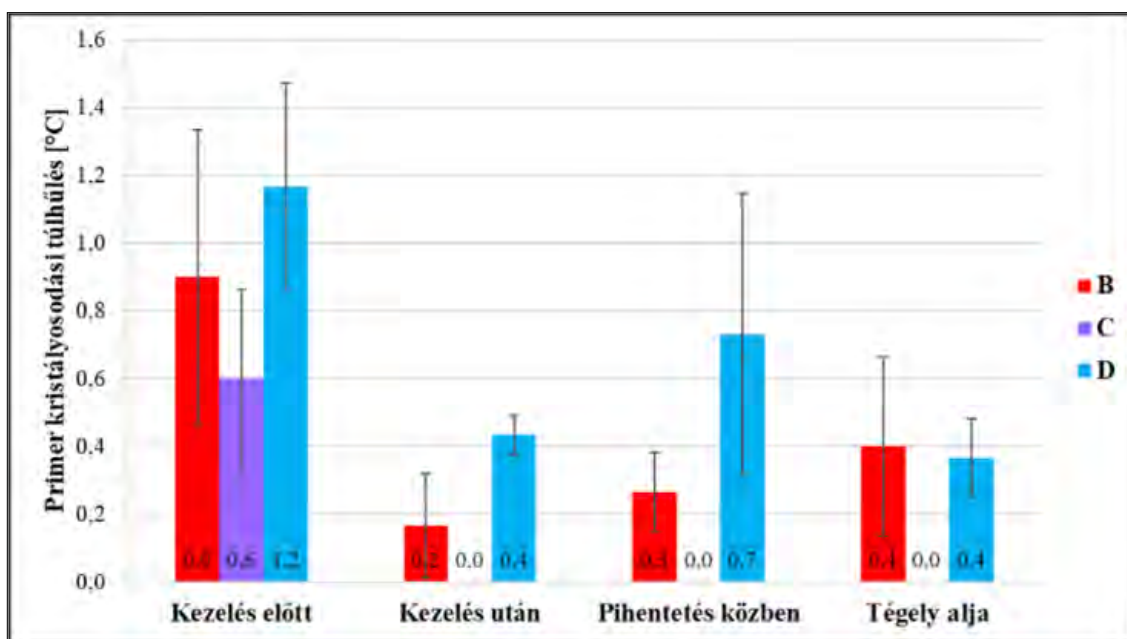
segédanyagok hatékonysága közel azonos, vagyis nem állapítható meg jelentős különbség a gázporozitás-képződési hajlamra gyakorolt hatásukban.

3.5. Termikus analízis

A kristályosodási túlhűlésértékeken (6. ábra) jól látható, hogy minden kezelőanyag alkalmazása jelentős mértékű csökkenéshez vezetett az olvadékkezelést megelőző állapotokhoz képest. A kezelés előtti, utáni és pihentetés közbeni értékekre ugyanaz a tendencia érvényes, miszerint legkisebb túlhűlés a (C) esetben volt, ezt követte a (B), majd pedig a (D) kísérlet. Amennyiben abból az elvből indulunk ki, hogy a túlhűlés mértéke fordítottan arányos a szemcsefinomsággal (kisebb túlhűlés esetén nagyobb egységnyi területre eső szemcseszám), úgy el-



5. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban mért sűrűségindex-értékek



6. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban mért primer kristályosodási túlhűlések

mondható, hogy a legjobb eredményeket a „C” sókeveréssel értük el, amellyel a mérhető túlhűlés nullára csökkent, és ezt követően sem nőtt. A „B” sókeveréssel történő kezelést követően szintén hatékonyan csökkent a túlhűlés mértéke, viszont a hőtartás során kismértékű növekedés volt tapasztalható, azaz idővel a szemcsefinomító hatás bizonyos mértékben csökkent.

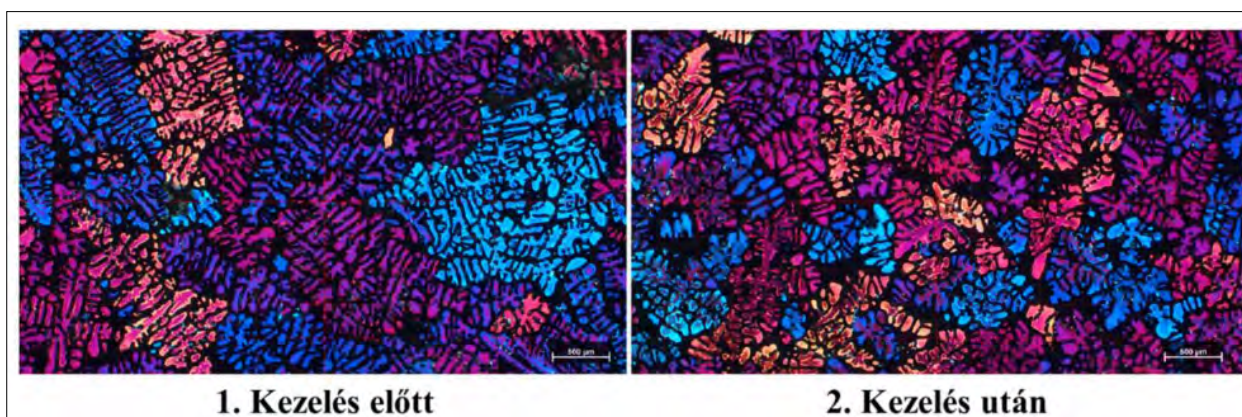
3.6. A szemcseméret meghatározása

A termikusanalízis-mintákról készített Barker-maratott szöveteleki felvételekre a 7. ábra mutat be példát. A képeken jól látható az olvadékkezelés hatására bekövetkező átlagos szemcseméret csökkenése.

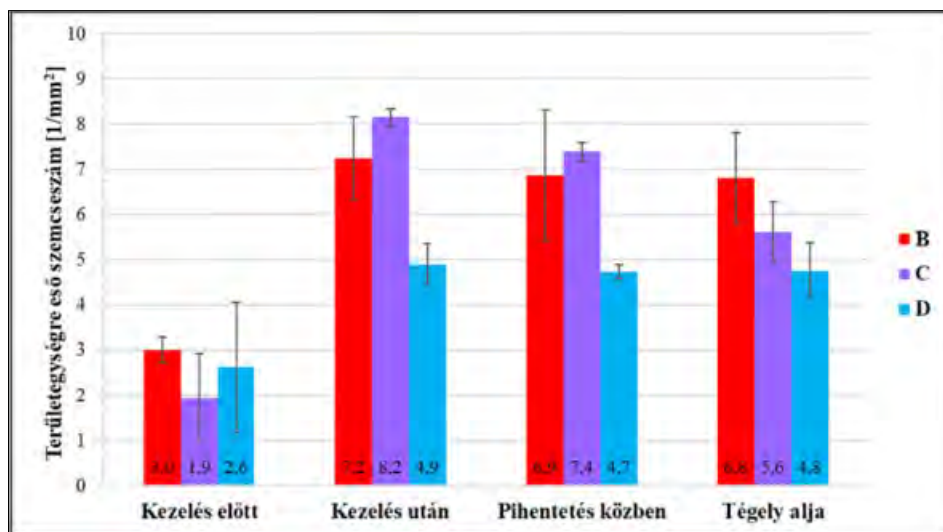
Kezdeti feltételezések szerint minél nagyobb a területegységre eső szemcseszám, annál kisebb a lineáris metszék hossz, és kisebb a mérhető kristályosodási túlhűlés értéke is. A 6. ábrát összehasonlítva a 8. és 9. ábrával nagymértékű hasonlóságot fedez-

hetünk fel az eredmények alakulásában. A kezelés előtti és a tégely aljáról történő mintavételek esetén van némi eltérés a három módszer eredményei között, azonban a kezelés utáni és pihentetés közbeni értékek teljes mértékben összhangban vannak. Mindhárom kiértékelés szerint a (C) kísérlet eredményeiből következtethetünk a legfinomabb szemcsestruktúrára, míg a legrosszabb értékeket a (D) kísérlet eredményezte.

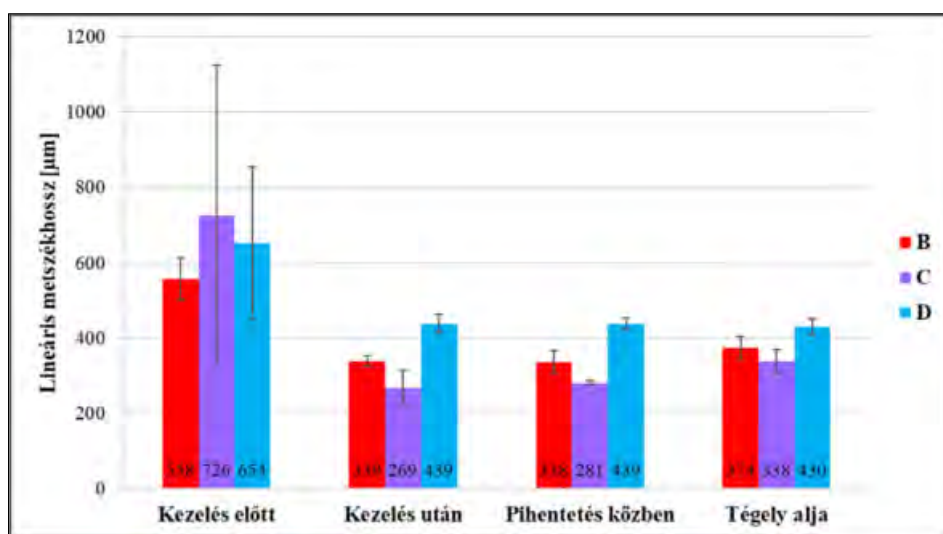
A termikus analízis alapján a legjobb eredményeket a „C” sókeverék hozta, amivel összhangban vannak a szemcseméret meghatározás eredményei is. A (C) kísérlet során mért túlhűlések alapján nem volt kimutatható a szemcsefinomító hatás csökkenése, azonban a Barker-maratott felvételek kiértékelése során mindkét módszer szerint bizonyos mértékű szemcsedurvulás állapítható meg a pihentetés közben és a tégely alján. A (B) kísérlet során alkalmazott szemcsefinomító segédanyag szintén elég hatékonynak



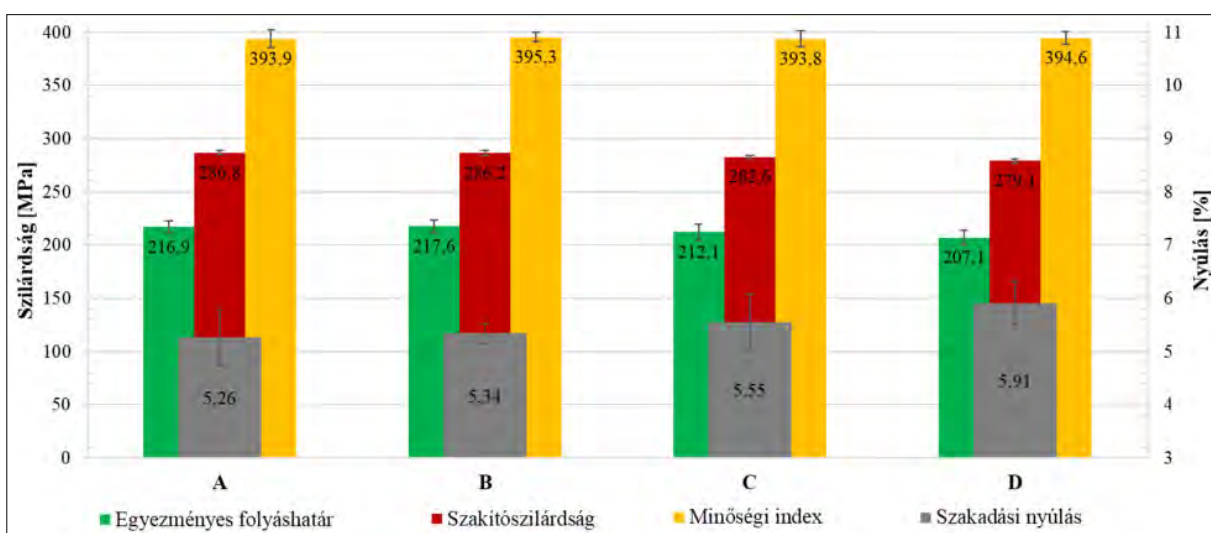
7. ábra. Barker-maratott minták polarizációs szűrővel készített szöveteleki felvételei (saját képek)



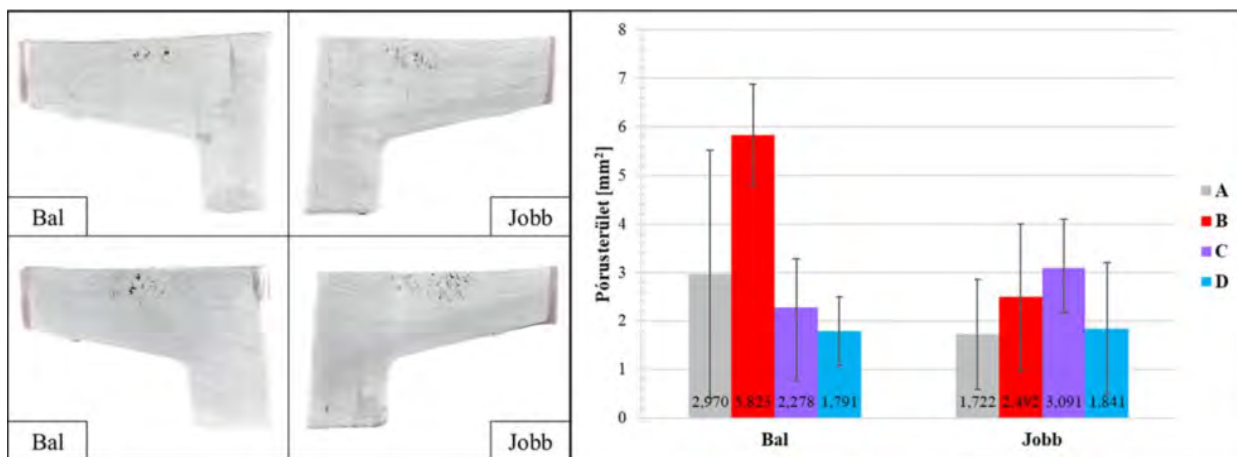
8. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban meghatározott területegységre eső szemcseszámok



9. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban meghatározott lineáris metszékhosszértékek



10. ábra. Különböző kísérletek ötvényeire jellemző szakítóvizsgálati eredmények



11. ábra. Öntvényekből kimunkált mintacsiszolatok és pórussterület értékeik

mondható, az elért eredmény megközelíti a (C) kísérlet során produkáltakat.

3.7. Öntvények mechanikai tulajdonságai

A szakítóvizsgálatok eredményeinek, valamint a kiszámított minőségi indexek értékeinek átlagait és szórásait a 10. ábra ismerteti. Az oszlopdiagramok szerint az eltérő segédanyagokkal kezelt olvadékokból készült öntvények szilárdsági értékei között nincs számottevő különbség, továbbá a szórások mértéke is viszonylag alacsony. A legjobb szakítószilárdság és egyezményes folyáshatárértékeket az „A” tisztító, valamint a „B” tisztító és szemcsefinomító sókeverék esetén értük el. A szakítóvizsgálatok esetén nagyobb szakítószilárdsághoz általában kisebb nyúlásértékek tartoznak, ami jelen esetben is megfigyelhető. A legjobb szakadási nyúlást a (D) kísérlet esetén értük el, viszont a szakítószilárdság is itt bizonyult a legrosszabbnak. Emiatt szükséges a minőségi index meghatározása, melynek értékével mindkét fontos paramétert együttesen figyelembe véve minősíthetők az öntvények. A „C” sókeverék minden szempontból a közepes eredményekkel járt, így semmiben sem mondható kiemelkedőnek, a QI-értéket tekintve pedig ez a legalacsonyabb. A mechanikai tulajdonságokat átfogóan vizsgálva azt láthatjuk, hogy az arany közeputat a legjobb QI-értékkel rendelkező „B” sókeverék jelenti.

3.8. Az öntvényekben kialakult porozitás

A kísérletekből kiválasztott öntvények egyes területein szinte minden esetben porozitás volt megfigyelhető a röntgenvizsgálatok során. Az érintett helyekről hengerfejenként két mintát munkáltunk ki, majd csiszoltunk fel. Az elkészült mintákról felvételeket készítettünk (11. ábra), melyeket az ImageJ Fiji képelemző szoftver segítségével elemeztünk. Az összehasonlítás alapjaként meghatároztuk a mintafelü-

lettel elmesztett pórusok területének összegét (11. ábra).

A pórussterület-értékek szinte minden esetben elég széles szórásmezővel rendelkeznek, így az egyes kezelőanyagok esetén várható porozitás mértékét sajnos nem lehet megállapítani a vizsgált területen. Az eredmények azonban jól alkalmazhatóak összehasonlítás céljából. A legkisebb pórusképződési hajlamot és ezzel a legjobb eredményt a (D) kísérlet hozta, ezt követi a (C), majd kis lemaradással az (A). Végül a legnagyobb pórussterület a (B) kísérlet mintáin volt tapasztalható.

4. Összefoglalás

A vizsgálati eredmények kiértékelését követően az alábbi következtetések állapíthatók meg.

- ❑ A „C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék nagyobb mértékben növeli az olvadék titán- és bórtartalmát, így sóalkotóiból feltehetőleg hatékonyabban képződnek TiB₂ aktív szemcsefinomító fázisok, mint a komplexebb összetételű „B” sókeverék alkotóiból.
- ❑ A K-kokillás próbák alapján a zárványtartalom csökkentésének szempontjából a „B” kezelősó volt a leghatékonyabb, ezt követte a „C”, majd az „A” só. Az „A” tisztító sókeverék hatékonysága Al-5%Ti-1%B előötvozlet-adagolással fokozható.
- ❑ A sűrűségindex-próbák értékei alapján mindegyik kísérlet során közel azonos volt a gáztalanító olvadékezelés hatékonysága.
- ❑ A lehülési görbék alapján meghatározott primer kristályosodási túlhűlések szerint a „C” sókeverékkel érhető el a legjobb szemcsefinomító hatás, mely a pihentetés közben sem romlik jelentősen. A „B” kezelősónál viszonylag lassú, míg az előötvozletnél gyorsabb lecsengés tapasztalható a pihentetési idő alatt.
- ❑ A területegységre eső szemcseszám- és a lineáris metszékhossz-értékek alapján, az ol-

vadékkézelést követően, a legfinomabb szemcse szerkezet a „C” sóval volt elérhető, azonban a pihentetés közben lecsengés volt tapasztalható. A (B) kísérlet eredményei szintén elég jónak bizonyultak, megközelítik a (C) kísérlet értékeit.

- A szakítóvizsgálatok alapján a különböző kísérletek eredményei között nem tapasztalható nagymértékű eltérés. A minőségi indexértékek szerint azonban a (B) kísérlet hozta a legjobb eredményt, ezt követően kis lemaradással a (D), az (A), majd a (C) kísérletek.
- A hengerfejekben megjelenő porozitás mértékének vizsgálata során a legnagyobb pórus-terület a (B) kísérletnél volt meghatározható. Ennél valamivel jobb értékeket mutattak az (A) és a (C) kísérletek. A leghatékonyabban a (D) kísérlet során sikerült csökkenteni a szívódás mértékét.

A vizsgálati eredmények alapján összességében elmondható, hogy olvadáktisztítás és szemcsefinomítás szempontjából a „B” és „C” sókeverékek bizonyultak a leghatékonyabbnak. A primer kristályosodási túlhűlések alapján elmondható, hogy a kezelősókkal szemben a szemcsefinomító előötvetet rövidebb lecsengési idővel rendelkezik. Ez a tendencia azonban nem érzékelhető a területegységre eső szemcse szám és a lineáris metszék hossz értékein, így ez pontosan nem megállapítható.

A különböző segédanyagokkal elért mechanikai tulajdonságokban nem tapasztalható jelentős eltérés, így a legideálisabb kezelőanyag kiválasztása során az ötvényekben megjelenő porozitás mértéke lesz a mérvadó. Mindezek alapján a „C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék alkalmazása javasolt a szériagyártás során. Amennyiben azonban az „A” tisztító sókeverék kerülne felhasználásra, úgy mindenképpen ajánlott a kezelés kiegészítése Al-5%Ti-1%B előötvetet adagolásával.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk kifejezni köszönetünket a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetének, valamint a Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft. dolgozóinak, akik helyszínt, eszközöket és hathatós segítséget nyújtottak a kísérletek megvalósításához.

A dolgozatban ismertetett kutatómunka a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP- 23-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Ku-

tatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



IRODALOM

- [1] G. Gyarmati, L. Bogoly, M. Stawarz, G. Fegyverneki, M. Tokár: Grain refiner settling and its effect on the melt quality of aluminum casting alloys. *Materials*, 2022/15-7679
- [2] J. Campbell: *Complete Casting Handbook 2nd Edition – Metal Casting Processes*. In: Metallurgy, Techniques and Design. Butterworth-Heinemann, Boston, 2015
- [3] J. Wannasin, D. Schwam, J. F. Wallace: Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007/191, 242–246.
- [4] S. W. Hudson, D. Apelian: Inclusion detection in molten aluminum – Current art and new avenues for in situ analysis. *International Journal of Metalcasting*, 2016/10, 315–321.
- [5] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramírez, R. Mackay: *Al-Si Alloys – Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications*, Springer International Publishing, 2017, 237.
- [6] L. Liu, F. H. Samuel: Effect of inclusions on the tensile properties of Al-7%Si-0.35%Mg (A356.2) aluminium casting alloy. *Journal of Materials Science*, 1998/33, 2269–2281.
- [7] P. J. Szabo, I. Kardos: Correlation between grain orientation and the shade of color etching. *Materials Characterization*, 2010/61, 814–817.
- [8] Standard Test Methods for Determining Average Grain Size – ASTM International, Designation: E112–12, 2013
- [9] A. M. Samuel, F. H. Samuel: Various aspects involved in the production of low hydrogen aluminium castings. *Journal of Materials Science*, 1992/27, 6533–6563.
- [10] D. Dispinar, J. Campbell: Critical assessment of reduced pressure test – Part 1. *International Journal of Cast Metals Research*, 2004/17, No. 5, 280–286.
- [11] R. Gallo D. Neff: *Aluminum Fluxes and Fluxing Practice*, ASM Handbook, 2008, Vol. 15 Cast., 230–239.
- [12] T. A. Utigard, K. Friesen, R. R. Roy, J. Lim, A. Silny, C. Dupuis: The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing. *JOM*, 1998/50, 38–43.
- [13] M. Máté, M. Tokár, G. Fegyverneki, G. Gyarmati: The comparative analysis of the inclusion removal efficiency of different fluxes. *Arch. Foundry Eng.*, 2020/20, 53–58.
- [14] C. Li, J. Guo Li, Y. Zhe Mao, J. Cheng Ji: Mechanism to remove oxide inclusions from molten aluminum by solid fluxes refining method. *China Foundry*, 2017/14, 233–243.

A műholdradar-interferometria alkalmazásának lehetőségei a kőbányászati szektorban

InSAR applications for quarry monitoring

KOVÁCS ISTVÁN PÉTER,
interferomertriaszakértő, DATelite Kft.,
7621 Pécs Jókai u. 35. E-mail: ikovacs@datelite.hu

RONCZYK LEVENTE,
műholdradar-szakértő, DATelite Kft., Pécs
ADORJÁN ERIK, földmérő mérnök, Colas Északkő Kft., Recsk

KESZTHELYI ÁDÁM, adatmérnök, DATelite Kft., Pécs

KOVÁCS DÁNIEL MÁRTON, tanársegéd, doktorandusz,
Pécsi Tudományegyetem, Térképészeti és Geoinformatikai Tanszék, Pécs

ORBÁN ZOLTÁN, okl. építőmérnök,
Pécsi Tudományegyetem, MIK Szerkezetek Diagnosztikája és Analízise Kutatócsoport, Pécs

KERTÉSZ BOTOND, földtudományi mérnök, Colas Északkő Kft., Recsk



A hazai kő- és kavicsbányászat az elmúlt évtizedekben fokozatos modernizáción ment keresztül. A bányaterek geometriai változásainak megfigyelésére számos, modern és széles körben elterjedt technológiát használnak, amelyek azonban térbeli, időbeli korlátokkal rendelkeznek. A mikrohullámú távérzékelési technológiák folyamatos, szisztematikus mintavételezést tesznek lehetővé, mivel napszaktól, időjárási körülményektől függetlenül minden egyes műholdáthaladás alkalmával biztosított a felszín felvételezése, így ideális monitoringrendszerként kínálnak. Cikkünkben átfogóan ismertetjük a műholdradar-interferometria kőbányászati felhasználásában rejlő lehetőségeket, valamint a technológia előnyein túl bemutatjuk ennek a megoldásnak a korlátait is. A COLAS Északkő Kft. Recsk bányaiüzemének stabilitás vizsgálatához 2017 és 2023 között az Európai Űrügynökség Copernicus programjának keretén belül készült Sentinel-1 műholdradar-felvételeket dolgoztunk fel négy pályageometriában interferometrikus kötegelő eljárásokkal. A feldolgozások alapján megállapítható volt, hogy pontosan mely üzemterületek mutatnak jelentősebb instabilitást, illetve az instabil üzemrészek mozgásai térben és időben hogyan változtak. Munkánk rávilágít arra, hogy a műholdradarmérések jól integrálhatóak a további stabilitás-vizsgálatokba és hozzájárulnak a geotechnikai vizsgálatok hatékony elvégzéséhez.

Kulcsszavak: InSAR, felszínmozgás, kőbánya, üzemeltetés

The mining industry in Hungary has been gradually modernised over the last few decades. State-of-the-art technologies are now used to monitor geometric changes in quarries. However, these technologies have spatial and temporal limitations. Microwave remote sensing technologies, on the other hand, allow for continuous and systematic observations. They provide surface acquisitions at each satellite pass, regardless of day and night or weather conditions. Therefore, they offer an ideal monitoring system. In this article, we provide a comprehensive overview of the potential of satellite radar interferometry for quarry monitoring, highlighting the benefits of the technology as well as its limitations. To monitor the stability of the Recsk mining operation of COLAS Északkő Ltd. between 2017 and 2023, we processed Sentinel-1 satellite radar images acquired within the framework of the European Space Agency's Copernicus programme in four orbital geometries using cutting-edge interferometric stacking techniques. The processing results allowed the identification of unstable parts of the quarry and the observation of their spatial and temporal development. Our research demonstrates that satellite radar measurements can be effectively integrated into stability studies and contribute to efficient geotechnical investigations.

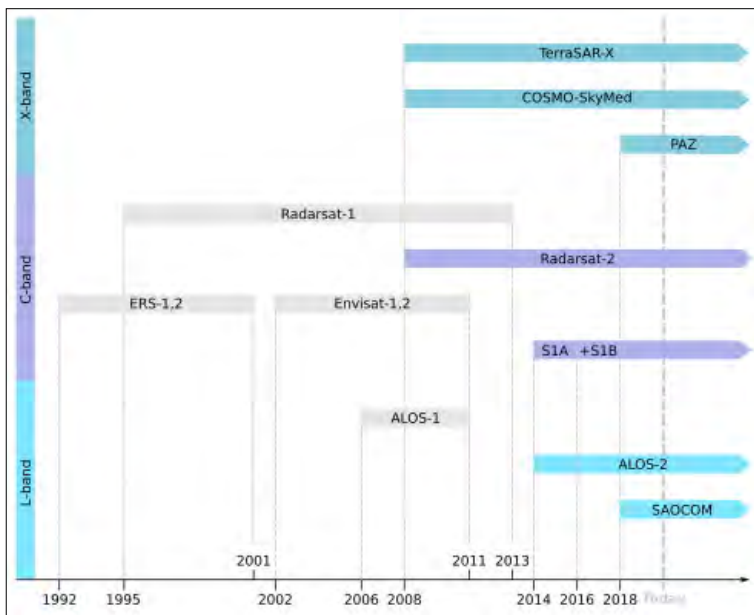
Keywords: InSAR, surface displacements, quarry, operation

1. Bevezetés és célkitűzés

A hazai kő- és kavicsbányászat az elmúlt évtizedekben fokozatos modernizáción ment keresztül. Igaz, ez nem olyan látványos és köztudott, mint az infokommunikációs technológia fejlődése, amely mindennapjaink szerves részévé vált, de ugyanakkor jelentős hatással van az építőipar termelékenységére. A külszíni bányaterekben a felszín átalakításával létrehozott mesterséges lejtők és sík felszínek stabilitása eltér az eredeti környezet állékonyságától, valamint a bányatérben végzett termelés további hatással van az esetleges felszín mozgásokra. A bányaterek geometriai változásainak megfigyelésére éppen ezért számos, mára már általánosan elterjedt technológiát használnak (Segalini et al. 2017), úgymint a földi geodézia, DGPS felmérés, drónokkal történő felvételezés (fotogrammetria), lézershakkelés stb. Emellett számos egyéb olyan tudományterület – pl. a geofizika – eszköztára is rendszeresen alkalmazást nyer, ami hozzájárul a stabilitási kérdések komplex vizsgálatához. Ellenben a felsorolt módszerek nem alkalmasak költséghatékonyan minden üzembiztonsági kérdés megválaszolására. Alapvetően a hagyományos mozgásvizsgálati módszerek térbeli, időbeli korlátokkal rendelkeznek, amelyeknek az áthidalása jelentős költségvonzattal jár.

Az elmúlt három évtized tudományos és technológiai fejlődésének köszönhetően napjainkban már elérhetőek azok az űrtávérzékelési technológiák, amelyek hatékonyan hozzájárulhatnak a bányaterek alakváltozásának monitoringozásához. Külön ki kell emelni egy megoldást, a mikrohullámú távérzékelést, amely folyamatos, szisztematikus mintavételezést tesz lehetővé, mivel napszaktól, időjárási körülményektől függetlenül, minden egyes műholdáthaladás alkalmával biztosított a felszín felvételezése, így ideális monitoringrendszerként kínál. A SEASAT műhold 1978-as

rövid működését követően csak az 1990-es évek elejétől kezdve végeztek megfigyeléseket olyan speciális szintetikus apertúrájú radarok (SAR), amelyek segítségével a földfelszín milliméteres/centiméteres nagyságrendű elmozdulásai térképezhetővé váltak. Ezek közül az Európai Űrügynökség (ESA) European Remote Sensing Satellite (ERS) műholdcsaládja a '90-es években, majd annak utódja, az Envisat műholdcsalád a 2000-es években rendszeresen pásztázta a földfelszínt. A mikrohullámú felvételeik napjainkban is jól használhatóak retrospektív elemzésekhez, ha egy adott terület, bánya vagy egyedi objektum több évtizedre visszanyúló mozgástörténetét szeretnénk feltárni (Dobos et al. 2022). 2014-ben, a Copernicus program kereteiben felbocsátott Sentinel-1 műhold örökölte az ERS és Envisat műholdak C hullámhosszon (5,4 GHz) működő, már továbbfejlesztett szenzorát (Kovács et al. 2022). Az új műhold(család) immáron nagyobb térbeli felbontással (15 m) és frekvenciát (6–12 napos) visszatérési idővel, két (le- és felszálló) pályageometriából rendszeresen felvételezi hazánk teljes területét. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az ország egy adott tetszőleges pontját már több százszor felvételezték a Sentinel-1 műholdak (Ronczyk et al. 2022). Az ESA adatdisszeminációs politikájának köszönhetően mára ezek a felvételek szabadon hozzáférhetőek, akár csak a korábbi szenzorok adatai is. A 2000-es évektől megjelenő nagyobb térbeli felbontást biztosító (X és L hullámhosszon dolgozó) szenzorok felvételezése ezzel szemben csak néhány frekvenciát helyen rendszeres hazánkban, és a felvételek beszerzése jelentős költséggel is jár (1. ábra). Elmondható, hogy a kezdeti tudományos (Proof of Concept) küldetést az ERS műhold képviselte. Ennek biztató eredményei több kereskedelmi és katonai műhold pályára állítását eredményezték. A technológiát továbbfejlesztő a Sentinel-1 műhold után, napjainkban egyre



1. ábra. A napjainkban elérhető, szabadon hozzáférhető és kereskedelmi műholdak

több vállalkozás épít kereskedelmi műholdradarflotákat.

A felvételezést végző szenzorok innovatív megoldásai mellett a feldolgozási technikák és algoritmusok szintén jelentős fejlődésen mentek keresztül. A '90-es években kifejlesztett interferometrikus eljárásokkal (SAR interferometria = InSAR) domborzatmodellek (DEM) készültek, valamint nagy kiterjedésű és általában több centiméteres elmozdulásokat térképeztek (differenciálinterferometria = DInSAR). A DInSAR-eljárások továbbfejlesztett változataiként születtek meg azok a kötegelő eljárások, amelyeket

ma a felszín kismértékű, lassú (maximum néhány cm/éves sebességgel mozgó) elmozdulásainak nagy pontosságú (az éves mozgássebesség pontossága gyakran szubmilliméteres) meghatározásához használunk. Ezek közül két legalapvetőbb kötegelési eljárás az állandó szórópontok módszere (Persistent Scatterers = PS) és az osztott szórópontok módszere (Small BAseline Subset). Ezeket azóta már számos, a fentiek kedvező tulajdonságait ötvöző hibrid algoritmus (SqueeSAR, E-PS, E-SBAS stb.) fejlesztése követte. Azonban a PS és SBAS eljárások napjainkban is elfogadott sztenderdek, amelyek használata széles körben elterjedt.

Cikkünk célja, hogy átfogóan ismeresse a műholdradar-interferometria kőbányászati felhasználásában rejlő lehetőségeit, valamint a technológia előnyeinek túl bemutatassuk ennek a megoldásnak a korlátozottságát azzal a szándékkal, hogy a szakma minél részletesebb betekintést kapjon a mindennapi felhasználásról.

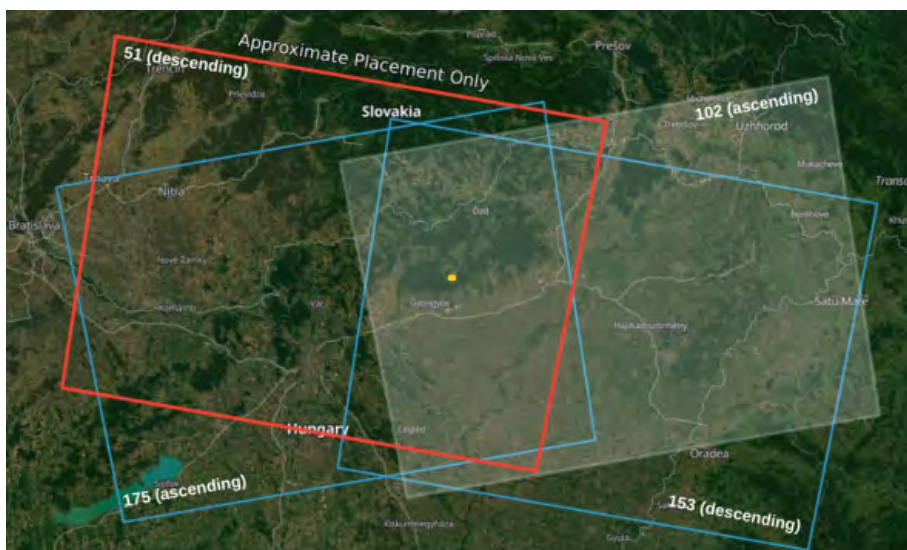
2. Módszertan

2.1. A vizsgálati terület bemutatása és problémafelvetés

A Colas Északkő Kft. az elmúlt években jelentős felszínmozgást észlelt a recski bányüzemében (2. ábra), amely befolyásolta annak mindennapi működését és a megnövelte a karbantartási költségeket. Az üzemet



2. ábra. A COLAS Északkő Kft. recski bányüzeme és annak területi felosztása



3. ábra. A felvételek által lefedett terület és relatív pályaaazonosítójuk

2016 végén korszerűsítették, jelenlegi formájában 2017 áprilisa óta működik. Az átalakítás során megújult a teljes bányauzem, a feldolgozó berendezések, az osztályozó és a futószalagpályák. Átalakult a depó tér, a szervizutak és új mérlegház került kialakításra. A szinte mindenre kiterjedő terep- és üzemrendezés sokkal hatékonyabb termelést és működést tett lehetővé. Az átfogó változások új térszerkezetet eredményeztek a bányauzemben, aminek a felmérése, dokumentálása a hatályos szabályozások szerint megindult. Az új kompakt technológia megbízható működése mellett elkezdtek jelentkezni olyan nem technológiai eredetű problémák, amelyeket az üzemeltető a bányatelek földtani, geotechnikai állapotával hozott kapcsolatba.

A működési rendellenességek a bányatelek technológiával érintett térszínein jelentek meg, növelve az alapanyag-termelés költségeit és kockázatát. Az észlelt kedvezőtlen változások sok esetben nem közvetlenül jelentkeztek, és nem voltak olyan egyértelmű jelek, amelyek rávilágítottak volna e változások valódi okára. A szerteágazó bizonytalanságok kezelésére a hagyományos módszerek nem voltak alkalmasak, mert nem volt olyan hatékonyan bevethető módszer, amely a teljes bányauzemre megbízható méréseket, számszerű adatokat eredményezett volna, és mindemellett képes lett volna a 2017-től kezdődő folyamatok, problémák térbeli és időbeli dinamikáját átfogó-

an feltárni. Ilyen kihívások esetén a műholdradarok által biztosított InSAR-felmérés képes érdemi adatokat szolgáltatni, és olyan támogatást nyújtani, ami problémák szisztematikus kezelését segít elő. Ennek a felismerésnek köszönhető a Sentinel-1 műholdradar alkalmazása a bányauzem stabilitásvizsgálata során. A fő elvárás egy térben minden üzemszre kiterjedő, időben pedig az új bányauzem kialakításáig visszamenő felmérés volt.

2.2. SAR-adatfeldolgozás

2.2.1. Az InSAR-elemzéshez használt adatok

Az InSAR-elemzéshez a Sentinel-1 műhold (S1) C-sávon készült felvételeit használtuk két felszálló (műholdpálya-azonosító: 175 és 102) és két leszálló (műholdpálya-azonosító: 51 és 153) geometriában (3. ábra). A felvételeket az Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>) Vertex szerveréről töltöttük le. Az adatok idősora körülbelül 5,9 évet ölelt fel (1. táblázat).

A felvételek az idősor kezdetén hatnaponta készültek, azonban a Sentinel-1B műhold 2021.12.23-i meghibásodása után a felvételezési gyakoriság 12 napra csökkent. Ez utóbbi tényről függetlenül a felvételek időbelisége ideálissá teszi az adatokat az InSAR-elemzéshez.

1. táblázat. Az elemzés során felhasznált felvételek adatai

Műholdpálya száma	Kezdő dátum	Végdátum	Időbeli lefedettség	Felvételek száma
51	02. 04. 2017	12. 02. 2023	~5.9 év	307
102	05. 04. 2017	15. 02. 2023		318
153	03. 04. 2017	27. 03. 2023		311
175	04. 04. 2017	08. 02. 2023		320

2.2.2. Az InSAR-adatfeldolgozás módszertana

A recski bányauzemben zajló elmozdulások elemzéséhez a fent említett SAR-felvételeken az SBAS és PS kötegelő eljárásokat futtattunk. A két algoritmus alkalmazása nagyban függ a helyszíni körülményektől és a vizsgált objektumoktól. A bánya összetett szerkezete és a megrendelő speciális, különböző típusú célpontokra fókuszáló igénye miatt mindkét eljárást igénybe vettük. Ezek a módszerek a különböző típusú szórópontok (állandó, osztott) detektálásán keresztül jól kiegészítik egymást, együttes alkalmazásukkal a bányaterek komplexen térképezhetőek.

A legkorábban kifejlesztett kötegelő algoritmus az állandó szórópontok (persistent scatterers = PS) módszere (Ferretti et al. 2000, Ferretti et al. 2001). Az eljárás olyan PS szórópontokat azonosít, amelyek jól meghatározható geometriával rendelkeznek és fázisstabilitásuk hosszú távon fennáll (Pasquali et al. 2014). Ezek általában az épített környezet elemei (házak, egyéb épületek, szállítószalagok stb.) vagy stabil növényzettel nem borított felszínek, szálban álló kőzetkibukkanások stb. Az algoritmus eredményeként a vizsgált terület szórópontjainak vektoros ponttérképe és az egyes pontok mozgástörténete kerül előállításra.

A Small-BASeline Subset (SBAS) algoritmust a PS megjelenését követően fejlesztették ki (Berardino et al. 2002). Az SBAS nagy pontossággal képes mérni a geometriailag kevésbé jól definiálható pixelek elmozdulását is (osztott szórópontok = distributed scatterers, DS). Tipikusan ilyen osztott szórópontként jelentkeznek a bányaterek növényzettel nem borított felszínei (bányaudvar, szervízutak, depóniák stb.).

Mindkét eljárás esetén az egyes szórópontok mért elmozdulásai az első felvételhez képest (referenciámérés 0 mm elmozdulással) kerülnek meghatározásra. Ezek az értékek a műholdpályához viszonyítva értelmezhetőek (látóirányú, sugárirányú elmozdulás = LOS). Amennyiben a fel- és leszálló pályageometriában detektált szórópontok között térbeli kapcsolat van, akkor ezek kombinációjából a kelet–nyugati és függőleges elmozdulások ugyancsak meghatározhatóak. A radarok geometriája miatt (azimut irányú haladás) az észak–déli elmozdulások kevésbé, csekély mértékben észlelhetők, csak a műholdpályára merőleges mozgáskomponensek rendelkeznek megfelelő karakterisztikával. Mindkét módszer szubmilliméteres pontosságot ér el az éves sebességértékek meghatározásában és ca. 5 mm-es pontosságot az idősoron belüli egyes műholdas mérések közötti elmozdulások vonatkozásában (Cigna et al. 2021).

A képfeldolgozáshoz az ENVI 5.6.3 szoftver SARscape 5.6.1 (sarmap SA, Caslano, Svájc) modulját, illetve az ebben elérhető PS és SBAS algorit-

musokat használtuk fel. A mérések pontosításához a bánya fotogrammetriai eljárásokkal előállított nagy felbontású domborzatmodelljét az általánosan alkalmazott SRTM-1 domborzatmodellbe integráltuk, és ezt a javított hibrid domborzatmodellt használtuk az elemzésekhez.

A térbeli lefedettség és az eredmények minőségének megőrzése érdekében az InSAR-méréseket összevetettük a bányauzem részegységeivel, és csak a legjobb eredményeket biztosító műholdpálya adataival folytattuk a vizsgálatokat. Mint említettük, ezek a két algoritmus különböző célpontok detektálására használatosak, ennek megfelelően a bányaudvar és a depótér elmozdulásának felmérése SBAS alapú, míg a technológia deformációit PS algoritmussal vizsgáltuk. A szervízút esetében mindkét megközelítés eredményeit figyelembe vettük.

3. Eredmények

3.1. Az InSAR-feldolgozások eredményeinek általános áttekintése

Az InSAR-feldolgozások eredményeit áttekintve, világossá vált, hogy a 153-as műholdpálya felvételei egyik megközelítéssel sem szolgáltatnak kielégítő térbeli lefedettséget. Mivel van egy olyan leszálló pálya (51-es), amely ráadásul sokkal jobb PS és DS pontsűrűséget biztosít, a 153-as műholdpálya felvételeit és az azokból számított eredményeket a továbbiakban nem vettük figyelembe. Az összes többi geometriát és feldolgozást megtartottuk további elemzésre (2. táblázat).

3.2. A technológiai terület elmozdulásainak felmérése

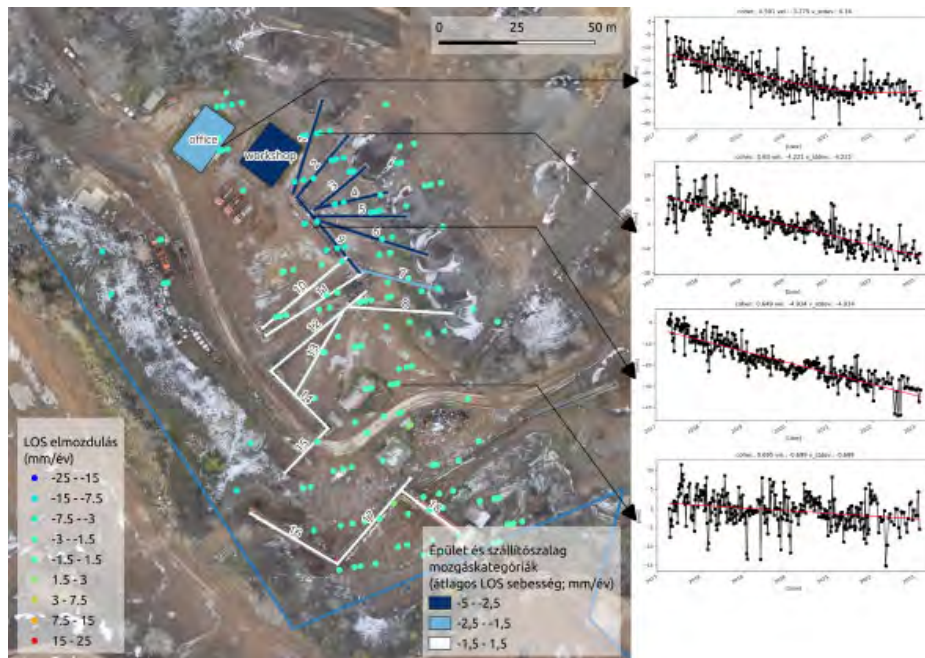
A vizsgálat során a bánya technológiai területe állt az ügyfél figyelmének középpontjában, mivel itt jelentős elmozdulásokat észleltek, amelyek mind az épületeket (iroda és műhely), mind pedig a szomszédos szállítószalagokat érintették. A helyszínt csak a 102-es és 175-ös felszálló geometriájú PS pontok fedik le, ezért itt csak LOS- (sugárirányú) adatok állnak rendelkezésre. Az 102-es és 175-ös geometriai adatai jól mutatták, hogy az éves PS sebességek +2 és –6 mm/év között váltakoznak, és a negatív elmozdulások (műholdtól való távolodás) gyakoriak a helyszínen.

Jól látható, hogy a szállítószalag-rendszer északi része intenzíven mozog, míg a déli része sokkal stabilabb (4. ábra). A LOS-sebességértékek itt –4 és –6 mm/év érték között ingadoznak. A szórópontok időbeli változását figyelembe véve megállapítható, hogy az irodaépület 2017 és 2020 között intenzíven mozgott, de a következő években stabilizálódott. Sajnos az idősor végén a szerkezet elmozdulásának ismételt gyorsulása mutatható ki (4. ábra), azonban egy a ké-

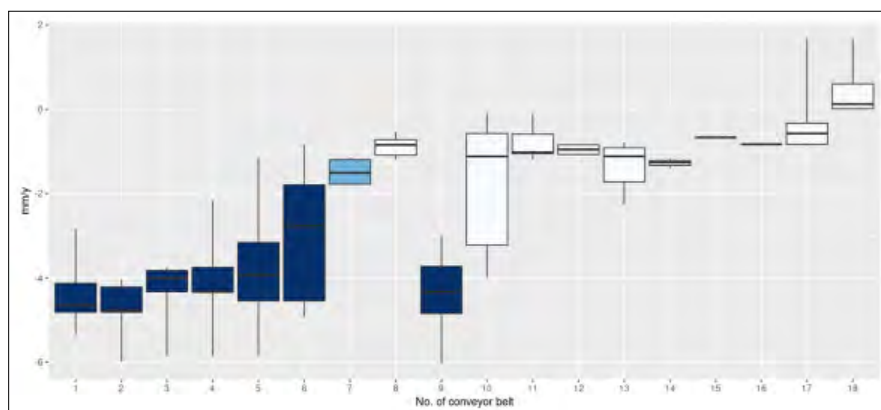
2. táblázat. A bánya különböző helyszínein alkalmazott InSAR-megoldások, és a felhasznált adatok

Relatív orbit (pályageometria-azonosító)	Algoritmus típusa	Technológia	Szervizút	Bányaudvar	Depótér
102	PS	✓	✓		
	SBAS				✓
175*	PS	✓	✓		
	SBAS		✓	✓	✓
153	PS				
	SBAS				
51*	PS		✓		
	SBAS			✓	✓

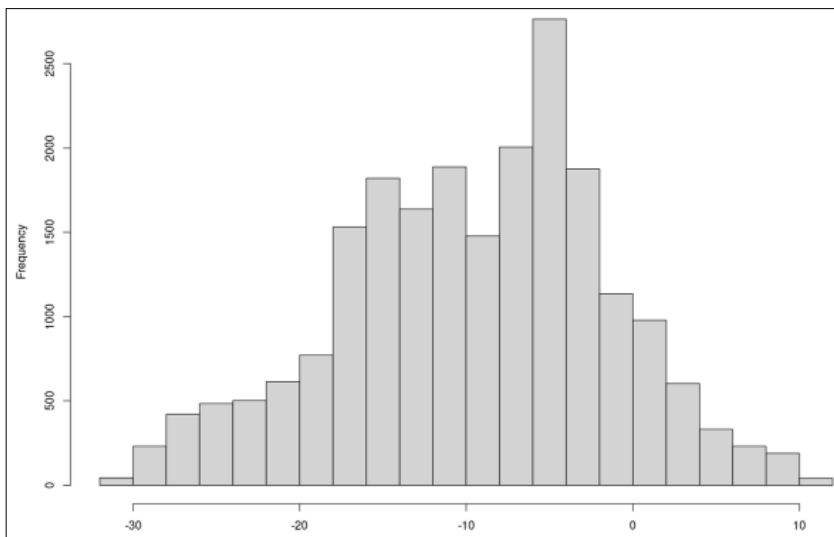
* A szervizúton az 51-es és 175-ös geometriájú adatok PS pontjait, míg a bányaudvarban ugyanezen geometriák SBAS LOS-adatait kombináltuk, így kelet–nyugati és függőleges elmozdulási adatok is rendelkezésre állnak.



4. ábra. A technológiai helyszín látóirányú elmozdulásai és a különböző szerkezetek elmozdulási kategóriái (LOS-adatok a 175 és 102 felszálló műholdpálya PS pontjai alapján)



5. ábra. A szállítószalagok éves elmozdulásának boxplotja. (Az ábra x tengelye a szalagok számozását mutatja, míg azok térbeli helyzete a 4. ábrán látható)



6. ábra. A technológiai helyszín kumulatív LOS-elmozdulásának hisztogramja (102 és 175 geometriájú PS pontok alapján)

sőbbi feldolgozás rávilágíthat majd arra, hogy ennek az elmozdulásnak a mértéke szignifikáns-e vagy sem. A területen mozgásban lévő egyéb elemek nem mutatnak további gyorsulási trendeket.

A szállítószalagokra eső szórópontok sebességének várható értéke alapján (5. ábra) jól azonosíthatók azok a szalagok, amelyek az elmúlt években intenzívebben mozogtak.

A szállítószalaghoz hasonlóan az irodát és a műhelyt is érintik az elmozdulások, és ezek jelentősen mozgó épületenként azonosítottuk.

Az éves elmozdulási sebességeken túl a szórópontok által megtett abszolút elmozdulások is jól tükrözik a technológia mozgástörténetét. Itt az elmúlt kb. 6 év kumulatív elmozdulásai -40 mm és $+10$ mm közé tehetőek (6. ábra). A legjelentősebb elmozdulási zóna a szállítószalag-rendszer északi részén alakult ki (7. ábra). Mivel csak látóirányú adatokat vizsgáltunk, az elmozdulások rendelkezhetnek vízszintes és függőleges komponensekkel is, melyek a tényleges elmozdulás mértékét befolyásolhatják.

Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a -30 mm-es érték kelet–nyugati elmozdulásra vagy süllyedésre egyaránt utalhatnak. Ez utóbbi sokkal valószínűbb, de nem bizonyítható teljes mértékben a leszálló geometriában detektálható PS pontok hiánya miatt. A további elmozdulási zónák kevésbé köthetőek a technológiát ténylegesen érintő mozgásokhoz, csak helyi jelentőséggel bírnak. A $+10$ mm-es elmozdulású déli zónában felszín kompaktálódása zajlik, a nyugati negatív elmozdulási zónát pedig valószínűleg a talajkúszás okozza.

3.3. A bányaudvarban zajló elmozdulások felmérése

A bányaudvar területe ideális volt az SBAS-mérésekhez a nyílt terep és a növényzet hiánya miatt.

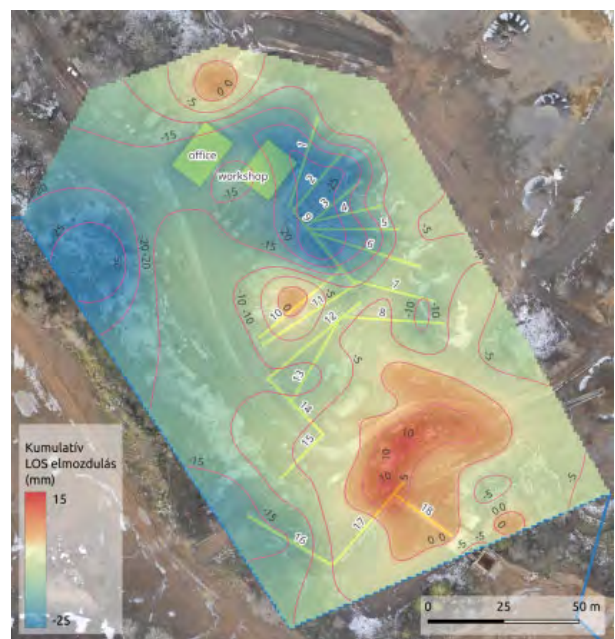
Mindkét geometriában számos mérési pontot azonosítottunk. A két geometria jó átfedésének köszönhetően a kelet–nyugati és függőleges elmozdulások kiszámítása is sikeresen megtörtént. A kelet–nyugati elmozdulások nagysága kevésbé tekinthető jelentősnek a bányaudvar területén. A függőleges elmozdulások a bányaudvarban -100 és $+30$ mm között fluktuálnak, míg az átlagos függőleges elmozdulás -30 mm körüli értéket mutat (8. ábra).

A bányaudvar északi részén lévő depónia 40 – 50 milliméternyit süllyedt, ami a felhalmozott anyag tömörödéséből fakadhat. A függőleges falak mentén (20 – 40 mm) a süllyedést ismét a falak

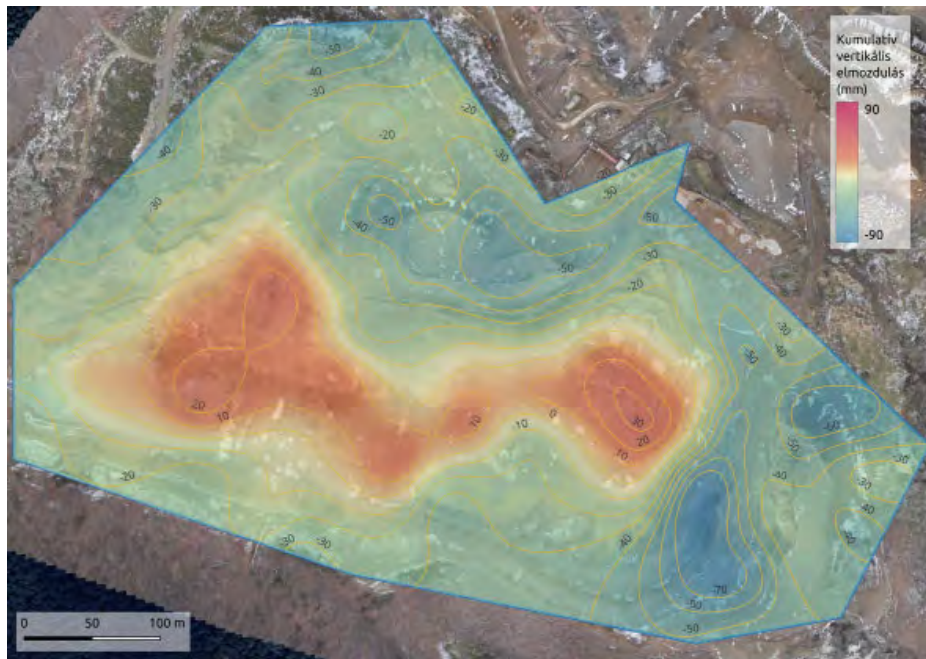
degradálódása okozhatja. A bánya délkeleti része azonban ezeknél gyorsabban (50 – 70 mm) süllyed. Érdekes jelenség, hogy a bányaudvar középső része 10 – 20 mm-t emelkedett az elmúlt hat évben. Ezen a terület az alapkőzet a felszínre bukkan, a detektált mozgást valószínűleg duzzadó agyagok okozzák.

3.4. A szervízút elmozdulásainak felmérése

A technológiai területen tapasztalt mozgásokon túl, a szervízút elmozdulásai voltak a legjelentősebbek a bányaudvarban. Az intenzív elmozdulások nyomainak a terepi megfigyelések során is láthatóak; a felszín egye-



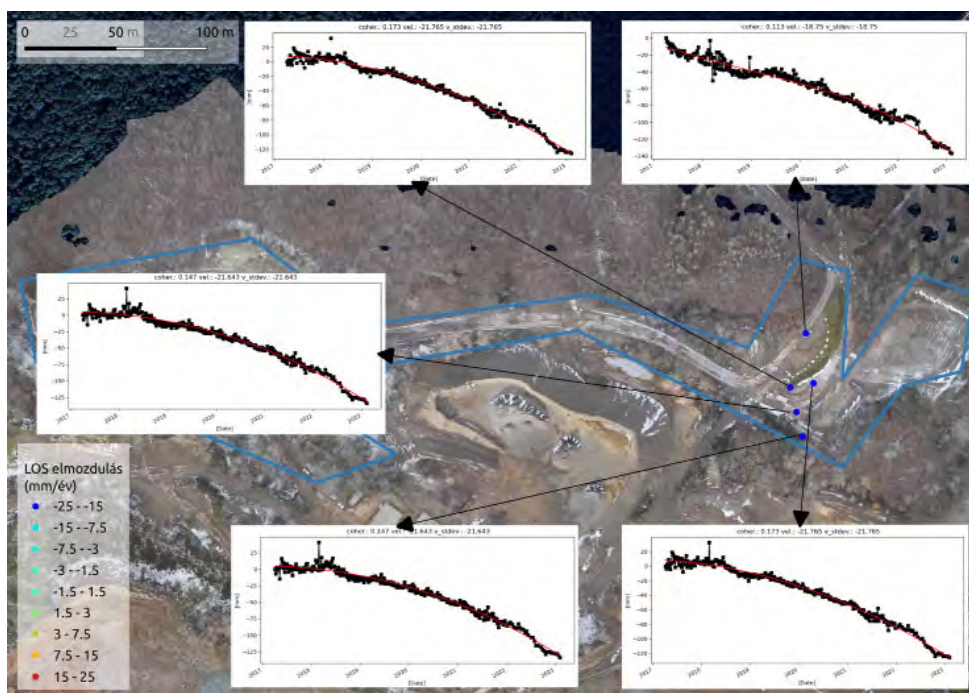
7. ábra. A technológiai telephely kumulatív látóirányú elmozdulása (102 és 175 geometriájú PS szórópontok alapján). A szállítószalagok sárga színnel vannak kiemelve



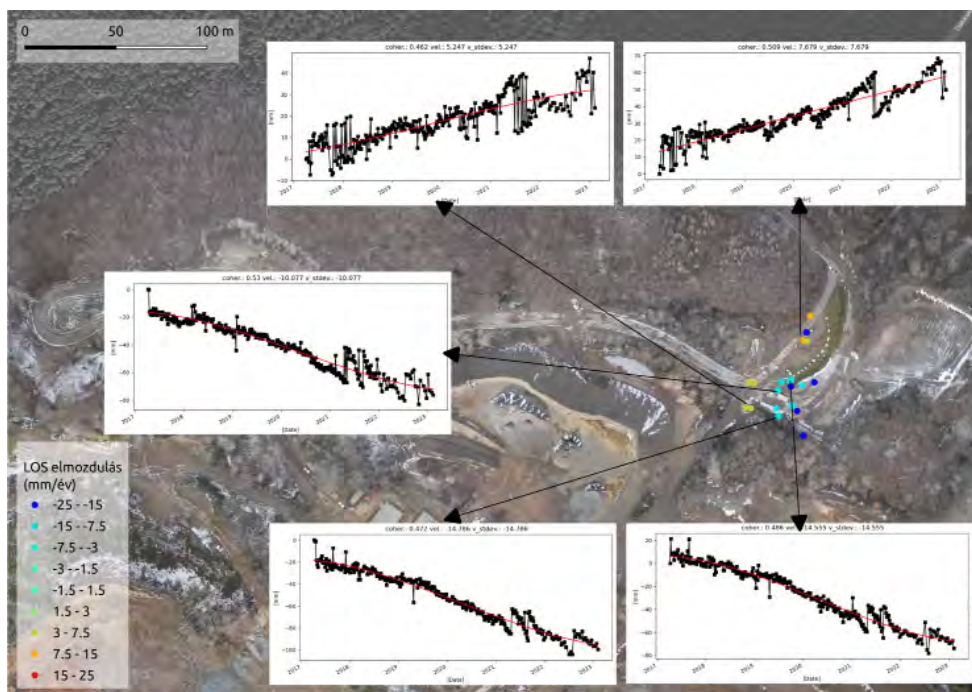
8. ábra. A kumulatív kelet–nyugati elmozdulások ábrázolása a bányaudvarban (az 51-es és 175-ös műholdpálya adatainak SBAS-feldolgozásai alapján)

netlenségei, valamint kiterjedt repedései gyakoriak voltak a mérlegház környezetében. Az S1 175 pályájának felvételeiből számított DS pontok egyértelműen mutatják ezeket az elmozdulásokat. Az éves DS sebességek -18 és -30 mm/év közötti értéket vesznek fel. A DS pontok relatív stabilitása 2018-ban megváltozott, és a mozgások ezt követően felgyorsultak. 2022 első negyedétől egy második gyorsulási szakasz is megfigyelhető, amely a közelmúltig tart (9. ábra).

A PS algoritmusnak köszönhetően a PS pontok itt is elérhetők a 102-es, 175-ös felszálló és az 51-es leszálló geometriában. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy a PS-mérés pontossága itt rendre alatta marad az SBAS-énak. Jól látható, hogy az elmozdulásban kimutatható gyorsulási fázisokat a PS algoritmus nem tudta lekövetni, és így több fázisugrás is jelen van az idősorokban (10. ábra). Ezek a fázisugrások kontrollmérésekkel (pl. terepi felmérés) visszafejthetőek.



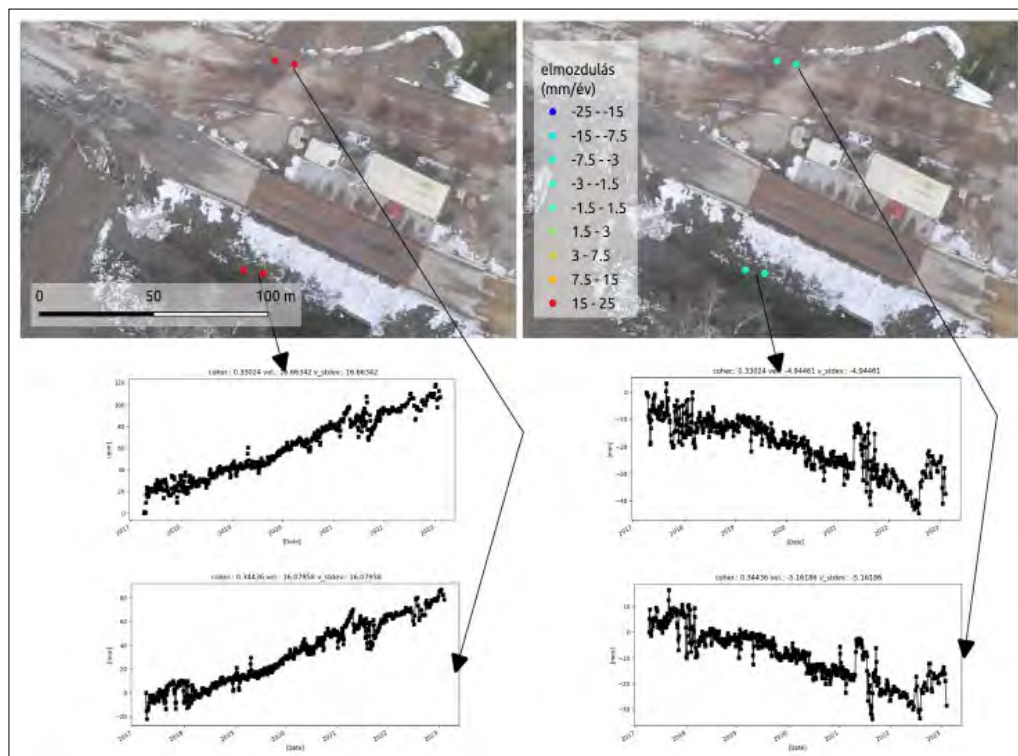
9. ábra. A szervizút DS szórópontjainak LOS-elmozdulásai (éves sebességértékek és idősorok a 175-ös felszálló műholdpálya felvételeinek SBAS-feldolgozása alapján)



10. ábra. A szervizút PS pontjainak LOS-elmozdulásai (éves sebességértékek és idősorok, a 175, 102 felszálló és 51 leszálló geometria alapján)

A fent említett mérések alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a legjelentősebb mozgások a mérlegháztól északra detektált keleti irányú elmozdulások (11. ábra). Ezek mintegy háromszor nagyobbak (összesen 120 mm-es mozgás kelet felé a teljes

vizsgált időszakban), mint a legnagyobb mért süllyedés (–40 mm). Továbbá, a keleti irányú csúszás is több mint kétszer nagyobb (összesen 80 mm), mint a süllyedés (–30 m), a mérlegházról délre eső területen. Ezek alapján a keleti irányú elmozdulások mértéke és



11. ábra. A kelet–nyugati (bal oldalon) és függőleges elmozdulások (jobb oldalon) a mérlegház körül (éves sebességértékek idősorai mm/év-ben) a szervizút PS pontjai alapján (175, 102 felszálló és 51-es leszálló geometriák adataiból összesítve). Az értékek alulbecsültek lehetnek

jelentősége még akkor is egyértelműen bizonyítható, ha figyelembe vesszük, hogy a mért értékek alulbecsültek lehetnek.

3.5. A depótér elmozdulásainak felmérése

Az inaktív depótér esetén a DS szórópontok elhelyezkedése egyenetlen teljes térbeli lefedettséget egyik algoritmus használatával sem tudtunk elérni, ezért a két geometria kombinációja nem lehetséges a bányüzem ezen részén. A LOS éves elmozdulási sebességek -60 és $+20$ mm/év között ingadoznak, a negatív értékek nyilvánvaló dominanciájával, amelyek mindkét geometriában megmutatkoznak. Van azonban egy délkeleti fekvésű lejtő, ahol pozitív irányultságú elmozdulásokat detektáltunk leszálló (51) geometriában. Ez utóbbit feltételezhetően az anyag lejtőn történő mozgása okozza, míg más DS pontok értékei tükrözhetik a deponált anyagok kompaktálódását vagy kúszását is.

4. Összefoglalás

Egyértelműen kijelenthetjük, hogy a műholdradar-interferometria érdemi hozzájárulást adott a bányüzemben zajló felszínmozgások térbeli kiterjedésével és időbeli dinamikájával kapcsolatban. Az InSAR-feldolgozások után megállapítható, hogy pontosan mely üzemterületek mutatnak jelentősebb instabilitást. Ezeknek változik-e a trendje; lineáris vagy gyorsuló, lassuló-e az elmozdulás. Ezek összegzésével következtethetünk arra, hogy melyek az üzemterület legkritikusabb pontjai. Az így kapott területeken milyen egyéb adatgyűjtési eljárásokkal tudunk hozzájárulni a bányában zajló felszínmozgások további pontosításához. A műholdradar segít tisztázni, hogy milyen cselekvési tervre van szükség ahhoz, hogy egy geotechnikus szakértő komplex felmérést tudjon végrehajtani a döntéshozók számára. Fontos kiemelni, hogy a vizsgálatból egyértelműen megállapítható, hogy a lejtős tömegmozgások nem veszélyeztetik a környező településeket. A legközelebbi lakott épületek a recski bánya esetében 1300 méterre vannak a bányüzemtől.

Ebből a nézőpontból nem maguk a recski üzembe tett megállapítások a lényegesek, hanem hogy egy új technológia hogyan épül be a kőbányászattal foglalkozó vállalat irányítási folyamatokba. További kutatás tárgyát kell képeznie annak, hogy a műholdradar adatok hogyan integrálhatóak egy már létező problémakezelési módszertanba. A mozgásadatok figyelembevételével egy bányüzem, milyen többlet információhoz jut a beavatkozások költségét, ütemezést tekintve. Példánkkal arra kívánunk rávilágítani, hogy egy összetett kihívás feltérképezésében minden egyes új megoldás – amely információt hordoz egy átfogó jelenség fő jellemzőivel kapcsolatban – hasznos eszköz lehet.

Mindemellett nem szabad elfelejteni, hogy az InSAR-monitoring rendszerrel adatvagyonot építünk, ami egyre komplexebb elemzésekre ad majd lehetőséget az adattudomány fejlődésével (művelési, meteorológiai, IoT-adatok fúziója). Gyakorlatban olyan intelligens bányüzemeltetési rendszerek fejleszthetők, amelyek hosszú távon képesek tárolni, integrálni és biztosítani a szakmai háttérrel egy cég fenntartható működéséhez. Az üzem működése nem egy-egy alkalmazott személyes tudásához kötődik, hanem mind horizontálisan, mind vertikálisan könnyen elérhető digitális rendszerben rögzítik az adatokat a cégen belül.

Végezetül megállapíthatjuk, hogy a műholdradar mérései geofizikai feltárással párhuzamosan, képesek olyan komplex képet kialakítani, amelyre alapozva a geotechnikai vizsgálat megindulhat a bányaterületen. Kizárhatók a stabil térszínek, így a költségesebb terepi munkák célzottabban kivitelezhetőek, gyorsabban megvalósíthatóak, mintha a teljes bányüzemet kellené feltárni.

IRODALOM

- Berardino P. et al. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.
- Cigna F. et al. (2021): Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*, 13, 4800.
- Dobos E. et al. (2022): Surface deformation monitoring and risk mapping in the surroundings of the Solotvyno Salt mine (Ukraine) between 1992 and 2021. *Sustainability*, 14, 7531. <https://doi.org/10.3390/su14137531>
- Ferretti A. et al. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212.
- Ferretti A. et al. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Kovács I. P. et al. (2022): Do we need a higher resolution? Case study: Sentinel-1-based change detection of the 2018 Hokkaido landslides, Japan. *Remote Sensing* 14, 1350. <https://doi.org/10.3390/rs14061350>
- Pasquali P. et al. (2014): Mapping of ground deformations with interferometric stacking techniques. In: *Land Applications of Radar Remote Sensing*. Holecz F., Pasquali P., Milisavljevic N. (eds.) InTechOpen: London, UK, pp. 231–258.
- Ronczyk L. et al. (2022) Nationwide, operational Sentinel-1 based InSAR monitoring system in the cloud for strategic water facilities in Hungary. *Remote Sensing* 14, 3251. <https://doi.org/10.3390/rs14143251>
- Segalini A., Carri A., Savi R. (2017): The role of geotechnical monitoring: state of the art and new perspectives. *Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina GEO-EXPO 2017 Sarajevo, October 26th and 27th, 2017.*

A vasúti kerék mozgásegyenleteiről és stabilitásáról

On the equations of motion and the stability of the railway wheelset

FINTA ERVIN,

tanszéki mérnök, E-mail: finta.ervin@sze.hu,

Széchenyi István Egyetem, Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar,

Alkalmazott Mechanika Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1.



A vasúti kerékpár kialakításával és mozgásával kapcsolatos vizsgálatok közel másfél évszázados múltra tekintenek vissza, és napjainkban is jelentős számú az ezzel kapcsolatos új eredmény. A szakirodalomban általános gyakorlatnak számít, hogy a vasúti kerékpárt – a merev test modellből vártnál kevesebb – két szabadságfokú rendszerként írják le, azonban ennek kimerítő magyarázata hiányzik az irodalomból. A tanulmányban a vasúti kerékpár mozgásegyenleteinek felírásából megmutatjuk, hogy lineáris esetben bizonyos egyenletek miért nem befolyásolják a rezgéseket, és milyen módon magyarázzák a két szabadságfokú modell használatát.

A rezgő kerékpár többnyire egy meghatározott, kritikus sebesség elérésekor válik instabillá, amely sebesség függ a kerék, valamint a jármű paramétereitől. Célunk megmutatni, hogy milyen paraméterek változtatásával lehetséges növelni a kritikus sebességet, hogy a stabilitásvesztés ne következzen be a jármű üzeme alatt. A tanulmányban vizsgáljuk a kerék kúposságának és a rugalmas felfüggesztés merevségének hatását.

Kulcsszavak: vasúti kerék, kigyózó mozgás, stabilitás

Studies on the geometry and motion of railway wheelsets go back nearly a century and a half, and there are still a significant number of new findings. It is common practice to describe the railway wheelset as a two degree of freedom system, less than expected from the rigid body model, but an exhaustive explanation of this is lacking in the literature. In this paper, we form the equations of motion of the railway wheelset and show why certain equations do not affect the vibrations in the linear case and how the use of the two degree of freedom model can be explained.

A vibrating wheelset usually becomes unstable when a certain critical speed is reached, which speed depends on the parameters of the wheel and the vehicle. Our aim is to show how the critical speed can be increased by varying the parameters so that the loss of stability does not occur during the vehicle's operation. In this paper we investigate the effect of the conicity of the wheels and stiffness of the suspension.

Keywords: railway wheelset, hunting motion, stability

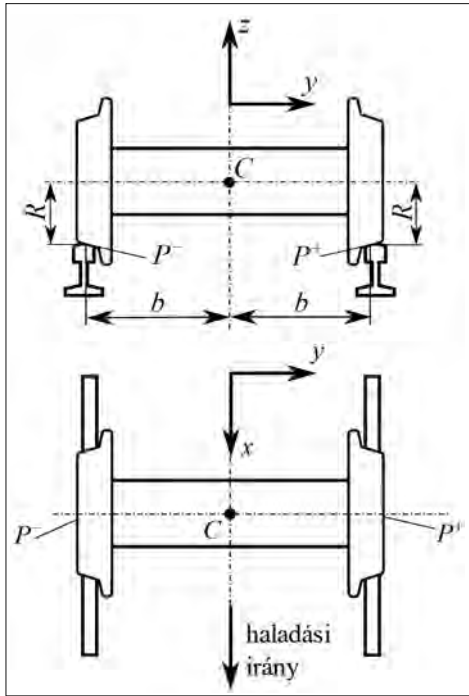
1. A vasúti kerék jellemzése

A vasúti járművek gördülését tengellyel mereven összekapcsolt kerekek, úgynevezett kerékpárok biztosítják (1. ábra). A szerelvények pályán maradása a kerekek enyhén kúpos kialakításából adódóan lehetséges, azonban ezzel együtt jellegzetes rezgések lépnek fel bizonyos határsebesség, kritikus sebesség elérésekor. A kerékpár mozgásának megértéséhez szükséges mértékben sorra vesszük a vasúti kerékpár néhány jellegzetességét a szakirodalom segítségével. A téma egyes részeiről áttekintést adnak az [1–4] források, azonban ezekben az irodalmakban nem talál-

ható az alábbi formában lévő összefoglalás. Az egyes részleteknél az oda vonatkozó forrásokat külön jelezzük. A tanulmány összefoglaló jellegű, a részletes levezetések a szerző [5] munkájában olvashatók.

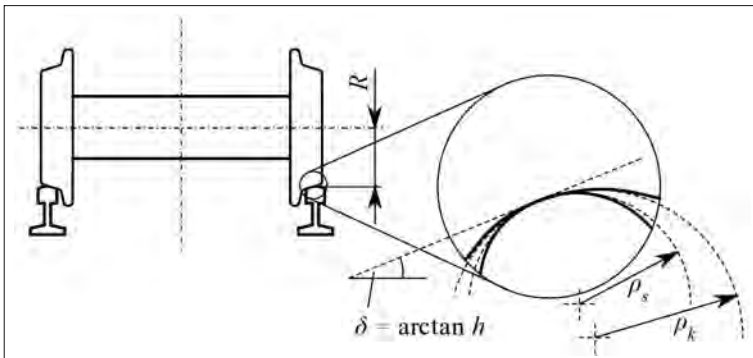
1.1. A kúposság és következményei

A vasúti kerékpár modellje az 1. ábrán látható előnézetben, illetve felülnézetben. Koordináta-rendszerként Descartes-féle derékszögű koordináta-rendszert használunk, amelynek x tengelye a vasúti szerelvény haladási irányában, az y tengelye a sínekre merőlegesen, a haladási irányból nézve balra, a z tengely pedig felfelé mutat.

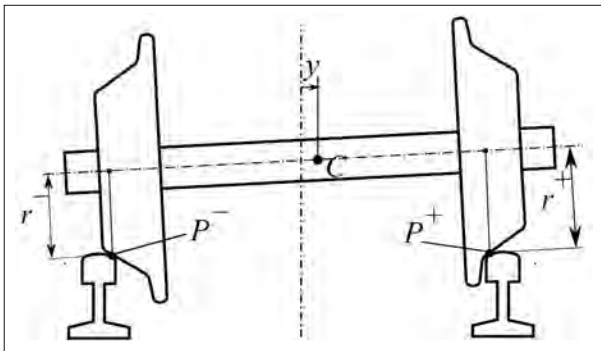


1. ábra. A vasúti kerékpár modellje elől- és felülnézetben

P^- és P^+ a két kerék érintkezési pontját jelöli a sínkel úgy, hogy az $y < 0$ helyen lévő kerékre P^- , az $y > 0$ helyen lévő kerékre pedig P^+ vonatkozik. A továbbiakban a mennyiségek felső indexébe tett „-” jelölés mindig az $y < 0$ oldali, a „+” jelölés pedig mindig az $y > 0$ oldali kerékre vonatkozik. Az ábrán C jelöli a kerékpár geometriai középpontját. A továbbiakban az



2. ábra. A kerék és a sín görbületi sugarai [1]



3. ábra. A vasúti kerékpár a centrális helyzetből való elmozdulása esetén [1]

y -nal jelölt elmozdulás alatt a C pont y tengely irányába történő elmozdulását értjük. R a kerekek görbülőkörének névleges sugarát jelenti (más néven a futókör sugarát). A P^- és P^+ pontok, azaz az érintkezési pontok távolságát nevezzük a futókörtávolságnak, ezt $2b$ -nek vesszük.

A 2. ábrán a görbült kerékprofil szemléltetjük, ρ_s a sín, ρ_k a kerék görbületi sugarát jelöli, a h névleges kúposág a δ kúpszög tangense, amely tisztán kúpos kerékprofil esetén megfelelő leírást ad. A h tényező értéke a szakirodalom alapján 0,05–0,1 közötti, azonban nagy sebességű járműveknél ez az érték 0,02–0,025 között mozog [6]. A tapasztalatok alapján görbült kerékprofil esetén a kúposágot a kerék, illetve a sín görbületi sugarának függvényében a

$$h^* = h \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_k - \rho_s}} \quad (1)$$

összefüggés szerint tudjuk leírni, ahol h^* az úgynevezett egyenértékű kúposág [7]. Látszik a képletből, hogy ha a sín görbületi sugara elhanyagolható a kerékéhez képest, akkor az egyenértékű kúposág a névleges kúposághoz közelít. A kopással azonban a görbületek változása miatt az egyenértékű kúposág jelentősen eltérhet a névlegestől.

Fontos kiemelni, hogy a b és R mennyiségek a kerékpár úgynevezett centrális helyzetét jellemzik, amikor nem lép fel keresztirányú elmozdulás. Ebben az esetben mindkét kerék sugara megegyezik a névleges sugárral. Keresztirányú elmozdulás esetén a kerekek sínrel érintkező sugarai eltérnek egymástól, és ez az, ami segít pályán tartani a vasúti szerelvényt. A kerék centrális helyzetből történő elmozdulását a 3. ábrán szemléltetjük. Látható, hogy a P^- pontnál r^- , a P^+ pontnál pedig r^+ lett a két kerék tényleges futókör sugarai.

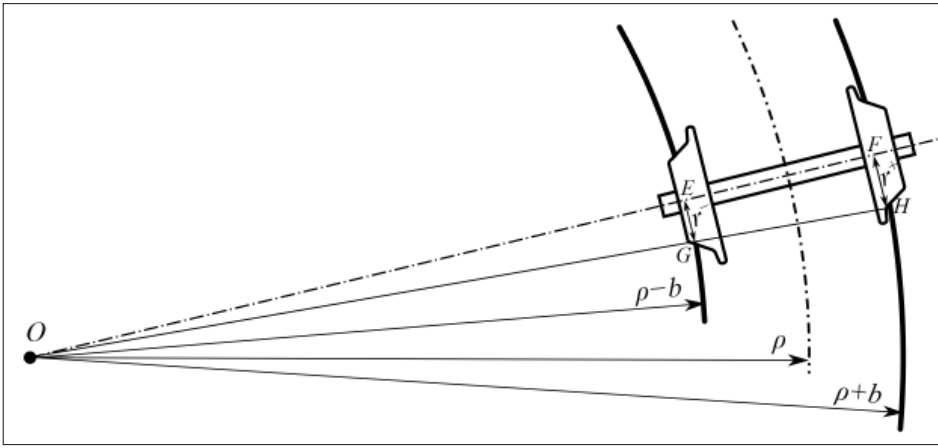
Ezeket a mennyiségeket leírhatjuk az

$$\begin{aligned} r^- &= \tilde{r}(-y) = R - h^* y + \mathcal{O}^2(y), \\ r^+ &= \tilde{r}(y) = R + h^* y + \mathcal{O}^2(y) \end{aligned} \quad (2)$$

összefüggésekkel, ahol $\mathcal{O}^2(y)$ a másodfokú, illetve másodfokúnál nagyobb fokszámú, y -tól függő tagokat jelöli. Az $\tilde{r}(y)$ függvény a kerék- és sínprofil geometriájából határozható meg analitikusan, numerikusan, vagy mérésel. A függvény $y = 0$ körüli Taylor-sorában a lineáris együttható éppen a h^* egyenértékű kúposág [2]. A két futókör sugárkülönbségét a

$$\Delta r = r^- - r^+ = -2h^* y + \mathcal{O}^3(y) \quad (3)$$

módon definiáljuk. A (2) egyenletekből látszik, hogy a páros hatványú tagok megegyező, míg a páratlan hatványúak ellentétes előjelűek. Ezért kivonásnál a



4. ábra. A vasúti kerékpár kanyarodása

páros hatványú tagok kiesnek, a páratlan hatványúak megmaradnak, így nem szerepel a (3) összefüggésben másodfokú tag.

A 4. ábrán a vasúti kerékpár látható kanyarodás közben ρ görbületi sugarú pályán. A jellegzetes pontokat bejelölve látható, hogy az OGE háromszög hasonló az OHF háromszöghöz.

A hasonlóság miatt felírható a

$$\frac{\rho+b}{r^+} = \frac{\rho-b}{r^-}$$

aránypár, amelyet átrendezve az

$$(r^- + r^+)b = (r^+ - r^-)\rho$$

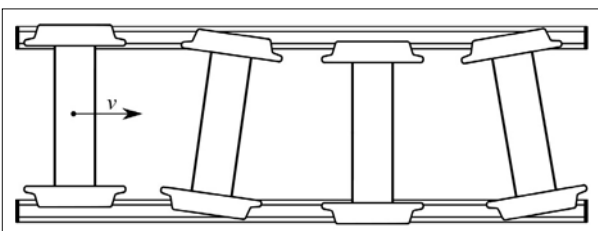
egyenletre jutunk. A (2) összefüggésekből adódóan a két sugár összegét $2R$ -rel közelítjük, hiszen az $\mathcal{O}^2(y)$ tagok legalább másodrendben kicsinyek R -hez képest. A (3) egyenletet felhasználva és a $\kappa = 1/\rho$ görbületet bevezetve az y irányú kitérésre az

$$y = Rb\kappa/h^* \quad (4)$$

összefüggést kapjuk. Ez azt jelenti, hogy minél nagyobb a pálya görbülete, annál nagyobb keresztirányú kitérés várható, vagy másképp: adott maximális y elmozdulás ismeretében megadható, hogy mekkora az a legkisebb görbületi sugarú pálya, amely szükséges a kanyarodáshoz.

1.2. Kinematikai rezgések

A vasúti kerékpár jellegzetes kigyózó mozgását az 5. ábra szemlélteti. Más szóhasználattal ezt a jelen-



5. ábra. A vasúti kerékpár kigyózó mozgása [1]

séget szinuszfutásnak is nevezik, mivel a kigyózó mozgással bejárt út szinuszfüggvénnyel közelíthető. Az ábrán az az eset szerepel, amikor a vasúti jármű egyenletes v sebességgel halad a sínen, és az érintkezés a kerék és a sín között tiszta gördülésnek tekinthető.

Ekkor a centrális helyzettől való periodikus eltéréseket kinematikai rezgésnek nevezük.

Az elnevezés – mint azt később látni fogjuk – onnan ered, hogy tiszta gördülés feltételezésével pusztán a kinematikai összefüggések segítségével egyértelműen leírható a mozgás. Ehhez két változót használunk, az y tengely irányú elmozdulást, valamint a z tengely körüli elfordulást, amelyet ψ -vel jelölünk.

Kis elmozdulások és elfordulások esetén érvényes az

$$\dot{y} = v\psi \quad (5)$$

összefüggés. Emellett Klingel [8] már korán megállapította a kerekek kúposágára vonatkozó számításai alapján, hogy a ψ időbeli megváltozása

$$\dot{\psi} = v \frac{\Delta r}{2bR} = v \frac{-hy}{bR}. \quad (6)$$

Ennek érvényességéhez a fentiek mellett azt is feltételeznünk kell, hogy a kúposág értéke kicsi. A Klingel-féle összefüggésekből felírható a kinematikai rezgést leíró

$$\ddot{y} + \omega_{\text{Kli}}^2 y = 0 \quad (7)$$

differenciálegyenlet [3], ahol

$$\omega_{\text{Kli}} = v \sqrt{\frac{h}{bR}}$$

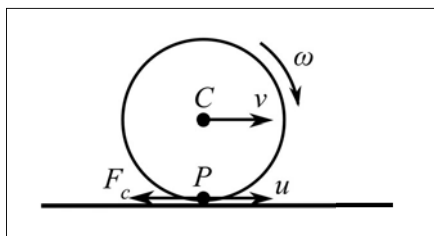
a Klingel-féle sajátkörfrekvencia. A (7) differenciálegyenlet megoldása $y(t) = A \sin(\omega_{\text{Kli}} t)$ alakú, ahol A a rezgés amplitúdója. Így ez egy állandó amplitúdójú, csillapítatlan rezgés, a centrális helyzet a stabilitás határán van. A szakirodalom nem ad magyarázatot arra, hogy a kerékrezgés jellemzéséhez miért elegendő az (5) és (6) egyenletekkel leírható két szabadságfokú modell használata.

1.3. Kúszás

A vasúti kerék bonyolult alakú, térbeli test, ezért a modellalkotás szempontjából ebben az alfejezetben a kereket egy koronggal helyettesítjük, s így a korong

síkon történő mozgását vizsgáljuk. Ha a korong tisztán gördülne, akkor sebessége $v = \omega R$ szerint alakulna, ahol ω a korong szögsebessége, R a sugara. Tapasztalati úton viszont már Reynolds [9] vizsgálta fémhenger gumiasztalon történő mozgását, ahol a henger súly alatti deformációja miatt nem csupán egy pontban érintkezik az asztal síkjával.

A megfigyelés az volt, hogy a henger mozgása hasonlít a csúszáshoz, a sebesség pedig a $v = \omega R + u$ összefüggéssel adható meg, ahol v a henger geometriai középpontjának sebessége, u a kúszási sebesség (6. ábra). A kúszás jelenségét tehát az érintkező testek deformációja okozza a P érintkezési pont környezetében. Fémtestek esetén csupán a lokális, azaz a P pont kis környezetében fellépő deformáció jelentős. Emiatt használhatjuk a merev test modellt azzal, hogy a kúszás hatását az érintkezési pont látszólagos csúszásával, a kúszási sebességgel vesszük figyelembe.

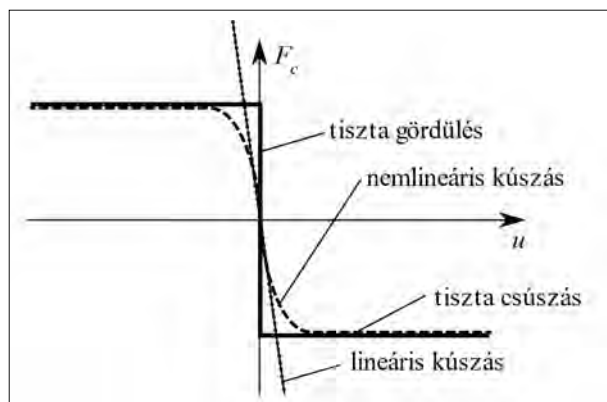


6. ábra. A kúszási sebesség értelmezése

A 7. ábrán látszik, hogy a kúszási sebesség és a kontaktpontban ébredő F_c kúszási erő közötti kapcsolat nagy kúszási sebességeknél jól közelíthető a Coulomb-súrlódás modelljével, kis kúszási sebességeknél pedig egy lineáris függvénnyel, amelynek meredeksége a c kúszási tényező:

$$F_c = -cu. \quad (8)$$

A szakirodalom jellemzően a $\zeta = u/v$ creepage (kúszás mértéke, aránya, de a hazai szaknyelvben nem jelenik meg különbség az angol creep, illetve creepage között) mennyiséget használja a kúszás leírására, amely segítségével a kúszási erő $F_c = -C\zeta$ alakra hoz-



7. ábra. A kúszási sebesség és a kúszási erő kapcsolatának közelítő jelleggörbéje [1]

ható, ahol $C = cv$ sebességfüggetlen kúszási tényező. Ennek a felírásnak az előnye, hogy C csupán a kerékek és a sín érintkezési pontjában fellépő normál erőtlől, a kerék és a sín anyagától, valamint a kontakt geometriától függ, így meghatározása mérések, valamint ismert összefüggések alapján lehetséges (lásd például [10]).

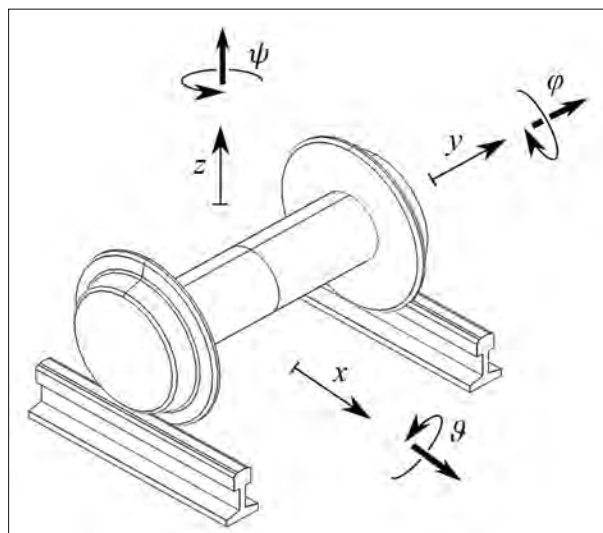
A vasúti kerékpár az előbbieket felhasználásával felírt mozgásegyenleteit számos helyen vizsgálták (például [11–14]). Az egyenletekben közös, hogy a merevtestmodellből vártnál kevesebb, két szabadságfokú rendszerként veszik figyelembe a kerékpárt, ennek kimerítő indoklása azonban nem jelenik meg az irodalmakban. Így a következőkben a vasúti kerékpár egyszerűsített modelljét felhasználva vizsgáljuk a hiányzó szabadságfokok kérdését.

2. Mozgásegyenletek

Ebben a fejezetben a vasúti kerék modelljének bemutatását követően megadjuk a mozgását leíró Newton–Euler-egyenleteket. Érdekességképpen kitérünk a kinematikai rezgés esetére, majd magyarázatot adunk a két szabadsági fokú dinamikai rendszerre.

2.1. A vasúti kerék modellje és a geometriai kényszerek

A továbbiakban egyetlen vasúti kerékpár vizsgálatára szorítkozunk, amelynek mechanikai modelljét tekintve egyszerűsítésekkel kell élnünk. Először is, a kerékpárt merev testként vesszük figyelembe, azt feltételezzük, hogy a test pontjainak távolsága a mozgás során egymáshoz képest nem változik meg. A sín és kerék érintkezésénél fellépő deformációtól tehát eltekintünk, a kontakt hatását a kúszási erővel vesszük figyelembe. A második feltételezés az, hogy a vasúti szerelvény egyenes vágányon, egyenletes sebesség-



8. ábra. A vasúti kerékpár modellje és az általános koordináták [1]

gel mozog. A kanyarodás vonatkozásaira később még kitérünk.

Merev testnek térbeli esetben hat szabadsági foka van, így első megfontolásból a probléma leírásához az 8. ábrán látható hat általános koordinátára van szükség. A kerékpár x , y , illetve z tengelyek irányába mutató elmozdulását x -szel, y -nal, valamint z -vel, a kerékpár szimmetriatengelye körüli elfordulását φ -vel, a szimmetriatengelyre merőleges, az x tengellyel párhuzamos tengely körüli elfordulást ϑ -val, a z tengely körüli elfordulást pedig ψ -vel jelöljük. A nemlineáris leíráshoz szükséges az elforgatások sorrendjének megadása az Euler-féle szögek módszerével. Linearizált egyenleteknél a forgatások sorrendjének nincs jelentősége.

A sín a kerekre normál irányú geometriai kényszerként hat, ez összesen két szabadsági fokot köt le. Ha az x , y , φ és ψ általános koordinátákat tartjuk meg, akkor lineáris közelítésben z és ϑ kifejezhető [15] alapján az előbbi négy általános koordináta segítségével:

$$g(y, \psi) = \frac{h}{b - hr} y + \mathcal{O}^2(y, \psi),$$

$$z(y, \psi) = 0 + \mathcal{O}^2(y, \psi).$$

Az elfordulás figyelembevételével két jellegzetes helyvektort adunk meg a P^- és C , valamint a P^- és a P^+ pontok között:

$$\mathbf{r}_{P^-C} = \begin{bmatrix} -b \sin \psi \\ b \cos \psi \\ r^- \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_{P^-P^+} = \begin{bmatrix} -2b \sin \psi \\ 2b \cos \psi \\ \Delta r \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2.2. Kinematikai leírás

Először a test kinematikáját vizsgáljuk. A 9. ábrán jeöltük C középpont és az érintkezési pontok sebességét, ez utóbbiak a kúszási sebességek. Összefoglalva ezek a mennyiségek a

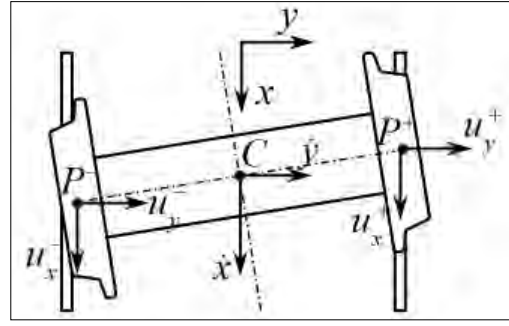
$$\mathbf{v}_C = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_{P^-} = \begin{bmatrix} u_x^- \\ u_y^- \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_{P^+} = \begin{bmatrix} u_x^+ \\ u_y^+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

vektorokkal írhatóak fel, ahol \dot{x} és \dot{y} az általános koordináták deriváltjai. Mivel a test egyenletes sebességgel halad, fennáll az $\dot{x} = v$ összefüggés.

Tekintsük úgy, hogy a kerékpár először a z tengely körül fordul el. Ezután a kerek elfordulása már a ψ -vel elfordult szimmetriatengely körül következik be, így a test szögsebessége

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} -\dot{\varphi} \sin \psi \\ \dot{\varphi} \cos \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

alakban adódik.



9. ábra. A középpont és az érintkezési pontok sebessége

Az összefüggések egyszerűsítéséhez érdemes bevezetnünk az x és y irányú kúszási sebesség-komponensek helyett az

$$u_a = \frac{u_x^+ - u_x^-}{2} \quad (12)$$

aszimmetrikus (longitudinális) kúszási sebességet, az

$$u_s = \frac{u_x^+ + u_x^-}{2} \quad (13)$$

szimmetrikus (longitudinális) kúszási sebességet, valamint az

$$u_l = \frac{u_y^+ + u_y^-}{2} \quad (14)$$

laterális kúszási sebességátlagot. A merev test modellből adódóan P^- és C , illetve P^- és P^+ pontok közötti

$$\mathbf{v}_C = \mathbf{v}_{P^-} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{P^-C},$$

$$\mathbf{v}_{P^+} = \mathbf{v}_{P^-} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{P^-P^+}$$

sebességredukciós összefüggéseket adhatjuk meg. Az egyenletekbe (9)–(11) mennyiségeket beírva, alkalmazva a (12)–(14) kúszási sebességeket, és végül a kis elmozdulások és a haladási sebességhez képest kis kúszási sebességek feltételezésével y , ψ , u_a , u_s és u_l szerint linearizálva a

$$\dot{\psi} = -\frac{u_a}{b} - \frac{vh^*}{Rb} y, \quad \dot{\varphi} = -\frac{u_s}{R} + \frac{v}{R}, \quad (15)$$

$$\dot{y} = u_l + \psi v, \quad \dot{x} = v$$

négy egyenletből álló differenciálegyenlet-rendszert kapjuk. Látszik, hogy a rendszer állapota hét változóval írható le (a négy általános koordináta deriváltjával és a három kúszási sebességgel), azonban csupán négy egyenletet kaptunk. Így erre az általános esetre a kinematikai összefüggések nem elegendők, figyelembe kell vennünk a test dinamikáját is. Megjegyezzük, hogy a levezetés közben a keresztirányú kúszási sebességek egymással megegyező nagyságúnak és irányúnak adódtak, ez megfelel a szakirodalomban gyakran használt feltételezésnek.

Kúszásmentes esetben a (15) egyenletrendszerben az u_a , u_s és u_l kúszási sebességek nullák. Az összefüggések a

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= -\frac{vh^*}{Rb}y, & \dot{\phi} &= \frac{v}{R}, \\ \dot{y} &= \psi v, & \dot{x} &= v\end{aligned}\quad (16)$$

formára alakultak át. Érdemes kiemelni, hogy a (16) egyenletrendszer első és harmadik egyenlete leválasztható az egyenletrendszerről, és külön vizsgálható, periodikus rezgést írnak le. Ezek az összefüggések megegyeznek a Klingel-féle (5) és (6) képletekkel (természetesen h kúposág esetén). A kinematikai rezgés elnevezés onnan ered, hogy az összefüggéseket az erők figyelembevétele nélkül, pusztán a test adott pontjainak sebessége közötti kapcsolatból vezettük le.

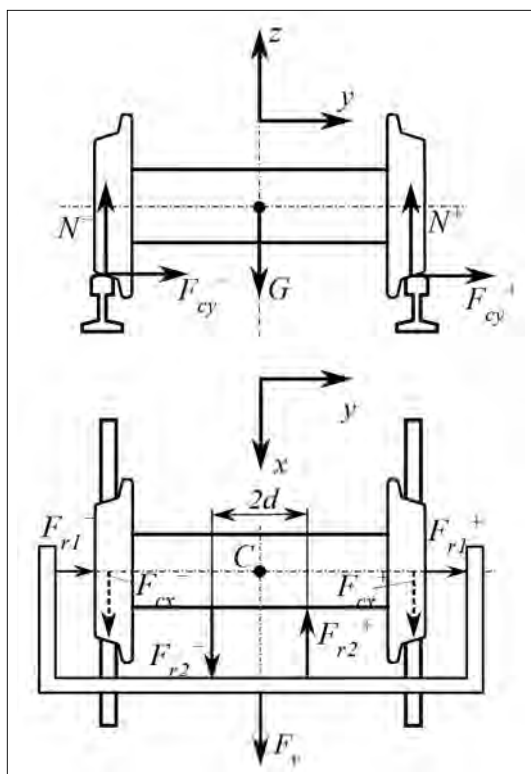
Ha az egyensúlyi helyzetből a test nem tér ki, azaz y és ψ zérus, akkor a

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= 0, & \dot{\phi} &= \frac{v}{R}, \\ \dot{y} &= 0, & \dot{x} &= v\end{aligned}$$

stacionárius, rezgés nélküli tiszta gördülés egyenleteit kapjuk.

2.3. Dinamikai leírás

Ahhoz, hogy az általános, kúszást tartalmazó esetet leírjuk, szükségünk van további összefüggésekre, amelyet a test dinamikájából kapunk meg. A kerékpár a 10. ábrán látható módon egy merev kerethez kapcsolódik, összesen négy rugóval. Ezek közül kettő a



10. ábra. A vasúti kerékpárra ható erők

kerekek középpontjába van bekötve, és merőlegesek a haladási irányra. A másik két rugó a haladási irányban megegyező irányú, a C ponttól d távolságra kapcsolódnak a kerekeket összekötő tengelyhez. A keresztirányú rugókban F_{r1}^- és F_{r1}^+ nagyságú, míg a longitudinális rugókban F_{r2}^- és F_{r2}^+ nagyságú rugóerők ébrednek. Ez egy, az irodalomban szokásos lehetőség a rugalmas felfüggesztés modellezésének (például [16]). Bármely felfüggesztés helyettesíthető összesen két, a C pontban bekötött rugóval: egy k_y egyenértékű merevségű, y irányú rugóval, valamint egy z tengely körül forgató, k_ψ egyenértékű merevségű torziós rugóval.

Az y irányú rugó $F_y = -k_y y$ erőt (az erő iránya ellentétes a kitérés irányával), a torziós rugó pedig $M_\psi = -k_\psi \psi$ nyomatékot fejt ki, a rugómerevségek tartalmazzzák a gravitációs merevséget [4] alapján.

A merev kereket az F_y erő vontatja az x tengely irányába. A kerékpárra nehézségi erő hat, valamint a vonat súlyából származó erő nyomja, ezek eredőjét a kerékpár tömegközéppontjába, a C pontban ható, G nagyságú erővel vesszük figyelembe. A kerekek és a sín érintkezési pontjaiban ébredő reakcióerők normálirányú komponenseit N^- és N^+ , x irányú komponenseit

$$F_{cx}^- = -c_x u_x^-, \quad F_{cx}^+ = -c_x u_x^+,$$

az y irányú komponenseit

$$F_{cy}^- = -c_y u_y^-, \quad F_{cy}^+ = -c_y u_y^+$$

jelöli, az x és y irányú erők a kúszóerők (8) alapján.

A dinamikai összefüggéseket az

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= m\mathbf{a}_C, \\ \mathbf{M}_C &= \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega})\end{aligned}\quad (17)$$

Newton–Euler-egyenletek felírásával nyerjük, ahol \mathbf{F} a testre ható erők eredője, m a kerékpár tömege, \mathbf{a}_C a C pont gyorsulása, \mathbf{M}_C a C pontra számított nyomatékok eredője, \mathbf{J} a kerékpár tehetetlenségi nyomatéki tenzora, $\boldsymbol{\varepsilon}$ a test szöggyorsulása. A részletes levezetést mellőzve, a (17) egyenleteket egyesítve (15) első és harmadik összefüggésével a

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= -\frac{u_a}{b} - \frac{vh^*}{Rb}y, & \dot{y} &= u_l + \psi v, \\ \dot{u}_l &= \left(\frac{v^2 h^*}{Rb} - \frac{k_y}{m} \right) y + \frac{v}{b} u_a - \frac{2}{m} c_y u_l, \\ \dot{u}_a &= \left(-\frac{v^2 h^*}{R} + \frac{k_\psi b}{J_{s\psi}} \right) \psi - \frac{vh^*}{R} u_l - \frac{2b^2}{J_{s\psi}} c_x u_a, \\ \dot{u}_s &= -\frac{2R^2}{J_{s\phi}} c_x u_s\end{aligned}\quad (18)$$

egyenletrendszerre jutunk, amely teljeskörűen leírja a test dinamikáját. Az összefüggésekben $J_{s\psi}$ a z ten-

gelyre, $J_{s\varphi}$ a kerékpár szimmetriatengelyére számított tehetetlenség nyomaték.

A (18) egyenletrendszer tekintve megállapítható, hogy u_s dinamikája nem befolyásolja a többi változót, valamint a többi változó sem befolyásolja u_s -t. Így külön vizsgálható (18) utolsó egyenlete. Ez egy közönséges, elsőrendű, homogén, lineáris differenciálegyenlet, amely önmagában is megoldható. Így a szimmetrikus kúszási sebesség az

$$u_s(t) = u_s(t=0) \cdot \exp\{-(2R^2/J_{s\varphi}) \cdot c_x t\} \quad (19)$$

összefüggésnek megfelelően alakul. Látható, hogy ez egy exponenciálisan lecsengő függvény, így adott idő

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{y} \\ \dot{u}_l \\ \dot{u}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{vh^*}{Rb} & 0 & -\frac{1}{b} \\ v & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{v^2 h^*}{Rb} - \frac{k_y}{m} & -\frac{2}{m} c_y & \frac{v}{b} \\ -\frac{v^2 h^*}{R} + \frac{k_\psi b}{J_{s\psi}} & 0 & -\frac{vh^*}{R} & -\frac{2b^2}{J_{s\psi}} c_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi \\ y \\ u_l \\ u_a \end{bmatrix} \quad (20)$$

mátrixalakra. A (20) egyenlet jobb oldalán álló első mátrix a rendszer együtthatómátrixa. Az egyensúlyi helyzet akkor (aszimptotikusan) stabil, ha az együtthatómátrix mindegyik sajátértéke negatív valós részű. A sajátértékek meghatározása negyedfokú egyenlet megoldására vezet, viszont mivel konkrét értékekre nincs szükségünk (csupán valós részük előjelére), elegendő a Hurwitz-kritériumot alkalmazni. A levezetés részleteit mellőzve a stabilitásvesztés kritikus sebességére

$$v_{\text{krit}} = \sqrt{\frac{(\gamma_\psi + \gamma_y)(\alpha_y^2 \gamma_\psi + \alpha_\psi^2 \gamma_y)}{(\gamma_\psi + \gamma_y)^2 \zeta - (\alpha_\psi^2 - \alpha_y^2)^2}} \quad (21)$$

adódik, ahol

$$\gamma_y = 2 \frac{C_y}{m} = 2 \frac{c_y v}{m}, \quad \gamma_\psi = 2 \frac{C_x b^2}{J_{s\psi}} = 2 \frac{c_x v b^2}{J_{s\psi}}$$

normalizált kúszási tényezőket,

$$\alpha_y^2 = k_y/m, \quad \alpha_\psi^2 = k_\psi/J_{s\psi} \quad (22)$$

az y irányú, valamint a z tengely körül forgató rugók sajátkörfrekvenciáját, és

$$\zeta = h^*/bR \quad (23)$$

normalizált kúposágot vezettük be a kifejezés egyszerűsítése végett.

A következőkben azt vizsgáljuk, hogy a kúposág, valamint a rugómerevségek miként befolyásolják a rendszer kritikus sebességét. A kúposág hatása egyértelműen látszik a (21) és (23) összefüggésekből,

után u_s nem befolyásolja a jármű mozgását. Vissza tekintve (13)-ra validálható a szakirodalomban használt feltételezés, miszerint a longitudinális kúszási sebességek megegyező nagyságúak és egymással ellentétes irányúak. Ezzel beláttuk, hogy a jármű dinamikája leírható két szabadságfokú rendszerrel.

3. Stabilitási jellemzők

A vasúti kerékpár mozgásegyenleteinek ismerete lehetővé teszi a stabilitásvesztés kritikus sebességére vonatkozó összefüggés felállítását. Ehhez a (18) egyenletrendszer első négy egyenletét átírjuk a

a kúposág csökkentésével növelni lehet a kritikus sebességet. A szemléltetéshez [13]-ból származó

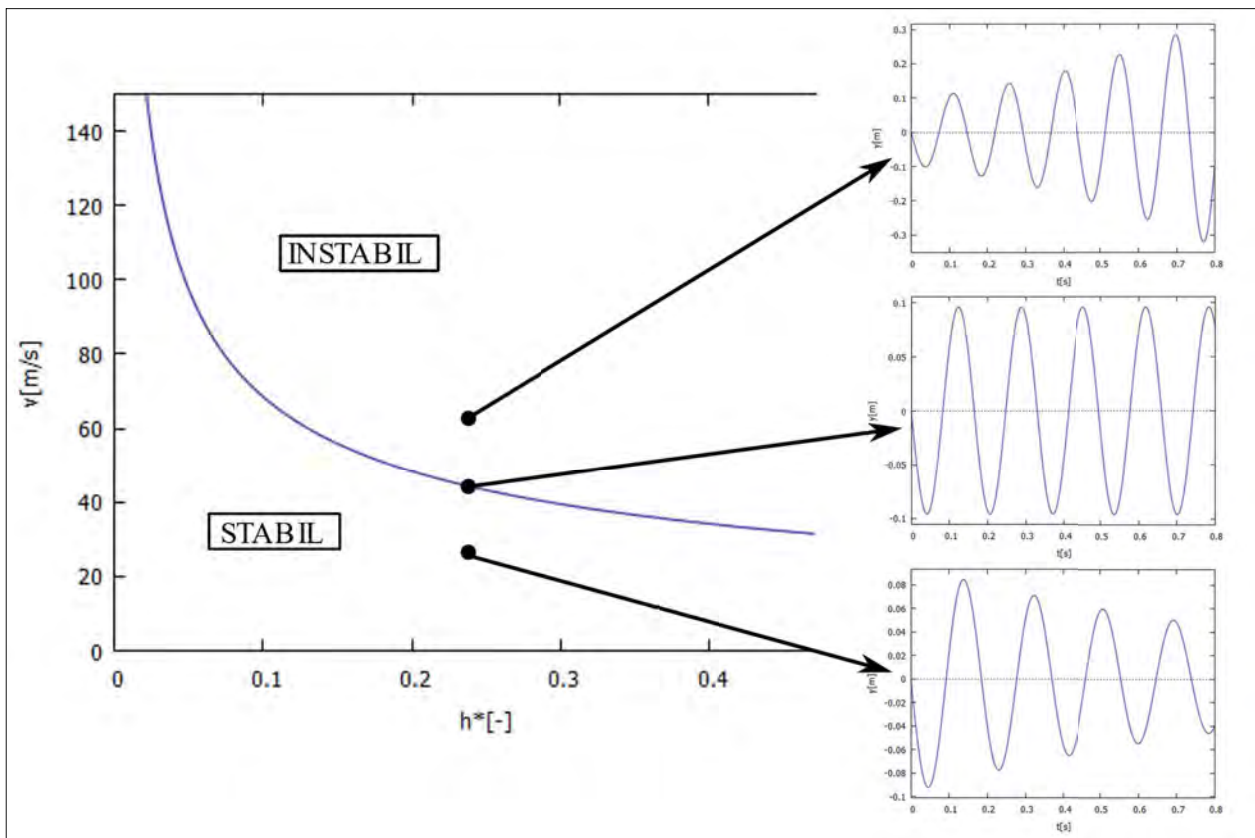
$$\begin{aligned} R &= 0,43 \text{ m}, & J_{s\psi} &= 685 \text{ kgm}^2, \\ b &= 0,7456 \text{ m}, & C_x &= 8,9 \cdot 10^6 \text{ N}, \\ m &= 2000 \text{ kg}, & C_y &= 8,8 \cdot 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

paramétereket használjuk fel. A rugómerevségeket

$$k_y = 2 \cdot 10^6 \text{ N/m}, \quad k_\psi = 1,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

értékekre megválasztva a 11. ábrán látható diagram adódik. Az ábrán bejelöltük a stabil és az instabil tartományt, a (21) függvény a stabilitás határát adja. Ezen a ponton periodikus rezgések jellemzők. Ha a jármű sebességét növeljük, és a haladási sebesség meghaladja az adott kúposágra vonatkozó kritikus sebességet, akkor a rezgések amplitúdója idővel növekszik, tehát a kitérések egyre nagyobbak lesznek, a rendszer instabillá válik. Adott kúposágnál, a kritikus sebességnél alacsonyabb haladási sebesség esetén a rendszer stabil, azaz ha kitérítjük az egyensúlyi helyzetből, akkor a rezgés idővel csillapodik, a kitérések csökkennek. A kúposág csökkentésének korlátját a (4) összefüggésből láthatjuk. Kanyarodásnál létezik egy olyan maximális kitérés, amely a sín-pálya fizikai jellemzőiből adódik, ez pedig egy minimálisan megszabott kúposágot jelent.

A (21) összefüggésből a rugómerevségek hatása nem triviális. Megmutatható azonban, hogy a fizikailag releváns paraméterek esetén a sajátfrekvenciák (tehát valójában (22) alapján a rugómerevségek) növelése a



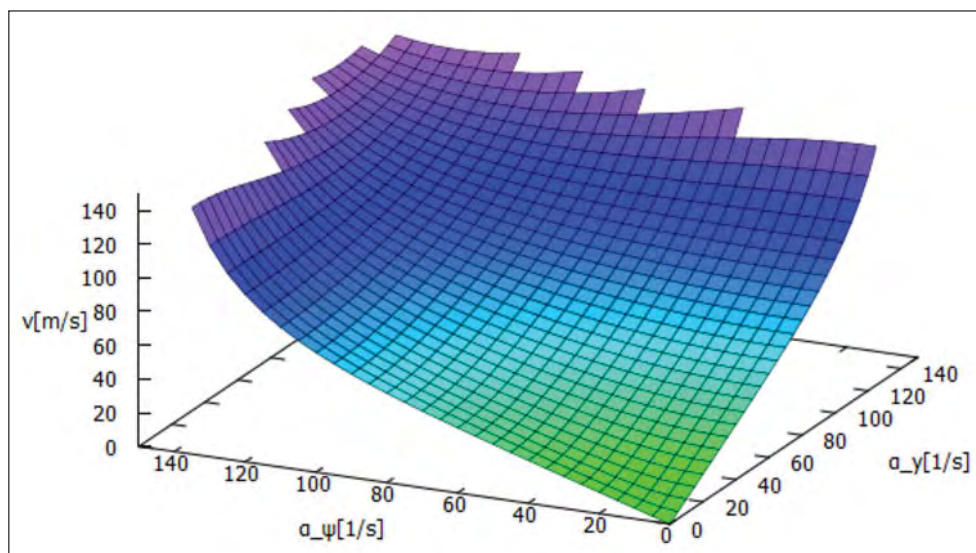
11. ábra. A kúposág hatása a kritikus sebességre

kritikus sebesség növekedését eredményezi. Szemléltetésként esetén a 12. ábrán látható függvény adódik.

4. Összefoglalás

A tanulmányban a vasúti kerékpár mozgásegyenleteit írtuk fel a jármű kinematikai és dinamikai jellemzőiből. Láttuk, hogy kúszásmentes esetben a kialakuló rezgéseket pusztán a kinematikai összefüggések is leírják, a kinematikai rezgések függetlenek a kerék

kezdeti helyétől és szimmetriatengelye körüli elfordulásától. A dinamikai vizsgálatból megmutattuk, hogy a szimmetrikus kúszások lecsengő jellegűek, nem befolyásolják a mozgást. Emiatt a dinamikai rendszer két szabadsági fokkal leírható. Meghatároztuk a stabilitásvesztés kritikus sebességét leíró összefüggést, és kimutattuk, hogy a kerék kúposágának csökkentésével, valamint a felfüggesztések merevségének növelésével lehetséges a kritikus sebesség növelése.



12. ábra. A sajátkörfrekvenciák hatása a kritikus sebességre

Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni dr. Antali Máténak, aki hasznos észrevételeivel és javaslataival sok segítséget nyújtott a tanulmány megírásához.

Irodalomjegyzék

- [1] Antali M.: *Dynamics of Dual-Point Rolling Bodies*. PhD-értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2018
- [2] Wickens A. H.: *Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics*. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, 2007, 300 p.
- [3] Wickens A. H.: A History of Railway Vehicle Dynamics. In: Iwnicki S., Spiryagin M., Cole C., McSweeney, T. (eds.): *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press, Boca Raton, 2019, 5–38.
- [4] Iwnicki S.: Simulation of wheel-rail contact forces. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26/10 (2003) 887–900.
- [5] Finta E.: *Tervezési és gyártási paraméterek hatása vasúti kerék rezgéseire*. Szakdolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2023
- [6] Orlova A., Boronenko Y.: The anatomy of railway vehicle running gear. In: Iwnicki S., Spiryagin M., Cole C., McSweeney T. (eds): *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press, Boca Raton, 2019, 40–83.
- [7] Heumann H.: Lauf der Drehgestell-Radsätze in der Geraden. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, 92 (1937) 149–173.
- [8] Klingel J.: Über den Lauf von Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, 38 (1883) 113–123.
- [9] Reynolds O.: On rolling friction. *Philosophical Transactions*, 166 (1876) 155.
- [10] Mousavi S. A., Shirazi K. H., Fatahi L.: Effect of dynamic creep coefficients and external load on hunting velocity in a railway vehicle. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19/6 (2022) 143–161.
- [11] Szabó Zs., Lóránt G.: Parametric excitation of a single railway wheelset. *Vehicle System Dynamics*, 33/1 (2000) 49–55.
- [12] Meijaard J. P.: The motion of a railway wheelset on a track or on a roller rig. *Procedia IUTAM*, 19 (2016) 274–281.
- [13] Wu X., Chi M.: Parameters study of hopf bifurcation in railway vehicle system. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 10/3 (2015) 031012.
- [14] Guo J., Shi H., Luo R., Zeng J.: Bifurcation analysis of a railway wheelset with nonlinear wheel–rail contact. *Nonlinear Dynamics*, 104 (2021) 989–1005.
- [15] Antali M., Stépán G.: On the nonlinear kinematic oscillations of railway wheelsets. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 11/5 (2016) 051020.
- [16] Lóránt G., Stépán G.: The role of non-linearities in the dynamics of a single railway wheelset. *Machine Vibration*, 5 (1996) 18–26.



3B | **3B Hungária Kft.**
H-8900 Zalaegerszeg, Wlassics Gyula u. 13. • Tel.: +36 92/549-033
info@3bh.hu • www.3bh.hu

HIVATALOS MAGYARORSZÁGI **metso** KÉPVISELET



A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből

1. Az akkumulátor gyártáshoz használt kritikus ásványi nyersanyagok rövid áttekintése

From the Critical Raw Materials Marathon data collections

1. Brief review of critical mineral raw materials for battery production

MOHAMED BADAWI¹, PhD-hallgató,
LESKÓNÉ MAJOROS LÍVIA¹, PhD-hallgató,
EVANE CÉSAR JOÃO DE CUÑHA¹, PhD-hallgató,
ELYAS HADDAD¹, MSc-hallgató,
AHMAD SAIFO¹, MSc-hallgató,
SAMUEL AYIPA ARTHUR², MSc-hallgató,
RAYHAN ALDIZAN FARRENZO², MSc-hallgató,
FÖLDESSY JÁNOS¹, Professzor emeritusz,
¹TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem
²TIMREX Course, Miskolci Egyetem

A Miskolci Egyetem TEKH Természeti Erőforrás Kutatása és Hasznosítása Szakkollégiumának magyar és nemzetközi hallgatói csapata vállalkozott egy saját tervezésű projekt keretében a kritikus és stratégiai nyersanyagoknak, valamint ezek magyarországi lehetséges előfordulásainak adatgyűjtésére és előzetes értékelésére. Elsőként az elektromos energiátároláshoz szükséges alapvető nyersanyagokra vonatkozó globális körképet dolgoztuk ki és tesszük közzé. Az akkumulátorfémek az EU-ban a kritikus és stratégiai nyersanyagok csoportjába tartoznak. Ebben a csoportosításban még kevésbé ismertek Magyarországon. Különösen hiányzanak olyan ismeretek, amelyek ezeknek az anyagoknak a hazai földtani környezetekben való előfordulására vonatkoznak. Az ország ugyanakkor kiemelt nemzeti stratégiai célként jelölte meg, hogy világszínvonalú akkumulátorgyártó ipart fejleszt. Ehhez véleményünk szerint a nyersanyagok hazai forrásainak ismerete, kutatása és fejlesztése is szükséges. Az adatgyűjtemény és az erre alapozható értékelések hatékonyan segíthetik az ország új szemléletű ásványi nyersanyag-erőforrás lehetőségeinek felmérését.

Az áttekintés az adatbázisban szereplő adatok alapján készült. Ezek külön adatlapokon érhetők el, a cikkünkben olvashatónál bővebb, részletes formában. Ehhez a TEKH weboldalára kell látogatni [2]. Az adatlapokról továbblépve még bővebb háttérinformációk (pl. részletes geochemiai adatok, publikációs hivatkozások listája, fényképek, kutatási jelentések stb.) érhetők el.

Kulcsszavak: EU, kritikus nyersanyagok, Magyarország, akkumulátorfémek

A team of Hungarian and international students from the Faculty of Natural Resources Research and Utilization of the University of Miskolc, TEKH, undertook the data collection and preliminary evaluation of critical and strategic raw materials, as well as their potential occurrences of mineral raw materials in Hungary, within the framework of a project. First of all, we have drawn up and published here a global overview of the basic raw materials required for electrical energy storage. Battery metals belong to the group of critical and strategic raw materials in the EU. In this grouping, they are still little known in Hungary, and there is a particular lack of knowledge regarding the occurrence of these materials in Hungarian geological environments. At the same time, the country has identified developing a world-class battery manufacturing industry as a priority national strategic goal. In our opinion, this requires knowledge, research and development of domestic sources of raw materials. The data collection and the evaluations that can be based on it can effectively help the assessment of the country's mineral resource resources with a new approach.

The overview is based on the data in the database. These are available on separate data sheets, in more detailed form than can be read in our article. To do this, visit the TEKH website [2]. Further background information (e.g. partial geochemical data, list of publication references, photographs, research reports, etc.) is available by moving further using the links provided on the data sheets.

Keywords: EU, critical raw materials, Hungary, battery metals

Bevezetés

A Miskolci Egyetem Föld- és Környezettudományi Kar TEKH Természeti Erőforrás Kutatása és Hasznosítása Szakkollégiumának 2024. évi munkaterve az EU elfogadása előtti parlamenti vitában szereplő Kritikus Nyersanyagok Törvény javaslatának szellemében, az előre látható nemzeti feladatok előkészítése érdekében alakul. A nemzetközi körképet és a hazai információkat hallgatói csoportok dolgozzák fel oktatók irányításával egy sokoldalú adatgyűjteménnyé és ebből tanulmányokká. A bevezető cikk a *Bányászati és Kohászati Lapok* előző számában jelent meg [1].

A cikk, összegzése a címben is említett adatgyűjtemény információinak. Az adatgyűjtemény nyilvános, és az érdeklődő olvasók, kutatók és szakmai felhasználók szolgálatában áll [2].

Az információk forrásai

Legfontosabb, ugyanakkor csak ritkán elérhető adatforrásnak az egyes alapanyagokra vonatkozó hazai statisztikai, földtani és bányászati adatokat tartottuk. Kiegészítésként a Criticel program publikációit [3], valamint a programban 2012–2014 folyamán összegyűjtött, rendszerezett és még nem publikált alapadatokat vettük figyelembe. Ez akkor 14 fajta kritikus alapanyagot érintett, a lista azóta 34 tételre bővült. A nemzetközi adatokhoz az EU Joint Research Centre által közzétett SCRREEN adatlapokat vettük első információforrásnak [4], amelyet kiegészítettünk az USGS nyilvános összefoglalóiból, az ipari szövetségek jelentéseiből és a megjelent közép-európai információkból származó információkkal.

Az adatértékelések másik ágaként a nyersanyagok ismert hazai előfordulásait értékeljük. Ezekből szintén adatlapok születnek (4. táblázat) az előfordulások legfontosabb jellemzőinek ismertetésével. Szintén nagyobb csoportokba összevonva ismertetjük ezeket külön közleményekben a *Bányászati és Kohászati Lapokban*.

Akkumulátorfémek, kémiai elemek – hazai helyzet

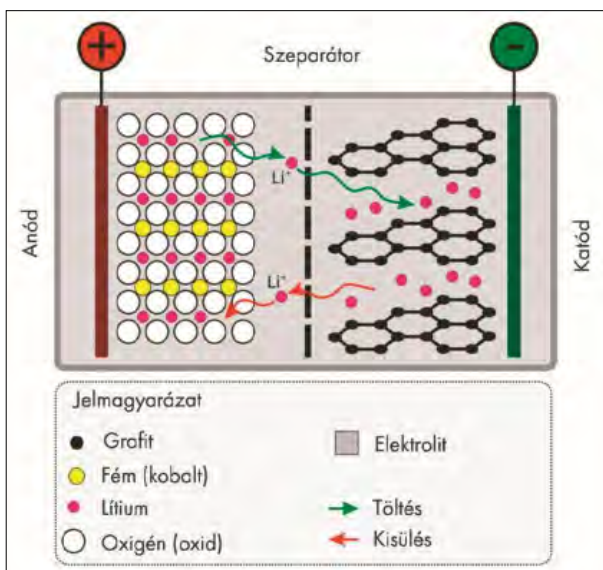
Az akkumulátorok építéséhez szükséges nyersanyagok világszerte kiemelt figyelmet élveznek az autógyártás fejlesztési irányjaival párhuzamosan. Az elektromos hajtáslánc nélkülözhetetlen eleme az energiatárolás, ebben van ezeknek az anyagoknak igen fontos szerepük. 2022-ben meghirdetett Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégiával összhangban Magyarország számos erőfeszítést tett a gyártókapacitások (Samsung, CATL, LG stb.) bővítésére külföldi befektetések bevonásával és a beruházások állami támogatásával.

A magyar akkumulátoripar döntően import nyersanyagokat használ fel, s ezek mindegyike túlnyomórészt tengerentúli forrásból származik. A 2020-as évek elejétől sorakozó események rámutattak arra, hogy a szállítási útvonalak bármilyen okból csökkenő biztonsága egész iparágak leállítását vonhatja maga után. 2024. januári példa erre az esztergomi Suzuki gyár ideiglenes leállítása az Ádeni-öbölben és a Vörös-tengeren teherhajók elleni terrortámadások következtében fellépő szállítási nehézségek miatt. A nyersanyagok egy részével kapcsolatban ismerünk feltáratlan hazai természetes forrásokat is, ezek értékeléséhez szükséges nemzetközi kitekintést szolgálja tanulmányunk.

Az akkumulátorok az autógyártás mellett fejlett technológiai termékek hosszú sorában kapnak szerepet (az autóktól a fűtési rendszerekig), ezekben a készülékekben az akkumulátorok egy tartozékcsoportot alkotnak. Az akkumulátorokat gyártó nagyvállalatok többsége kínai, és a teljes értékláncot is az ázsiai országok dominanciája jellemzi. A legfontosabb alapanyagok feldolgozásának 60–80%-a Kínában történik. A dél-koreai, kínai és japán cégek a vezető gyártók hazánkban. (Dél-koreai SK On Iván-csa, Komárom, Samsung SDI Göd, a japán GS Yuasa: Komárom, Miskolc). A hazai beszállítók hosszú sora kapcsolódik ezekhez az üzemekhez. A már megépült három magyarországi nagy akkumulátorgyárra az állam 138,6 milliárd forintnyi közvetlen támogatást fordított (2022-es adatok) [5]. Ezzel szemben nem jutott állami pénz nyersanyagforrások feltárására, illetve a kapcsolódó nyersanyag feldolgozási technológiák fejlesztésére.

Az akkumulátorgyártás ellátási láncát öt ásványi nyersanyaggal kezdődik, ezek a lítium, nikkel, kobalt, grafit és mangán. Mind az öt anyag szerepel az EU 2023-ban közzétett kritikus és stratégiai elemek listáján. Magának a nyersanyagnak a biztosítása csak az első előfeltétel, ezen kívül sok más (pl. műanyag, vegyi alapanyag) is elengedhetetlen a gyártáshoz. A nyersanyagok bányászati kitermelését követi a vegyi feldolgozás, finomítás tiszta végtermékké (rendszerint fémme, fémoxidokká), majd a cella alkatrészek gyártása, összeszerelése és vezérlése, akkumulátor-csomagba helyezése, majd beszerelése, az ártalmatlantítás és újrahasznosítás.

Az egyes akkumulátor fémek piaci kereslet-kínálata időben és földrajzi térben is erősen változó. Ezeket a tendenciákat képezi le a globális földtani kutatási ipar is, ásványvagyon hatter, a nyersanyagkészletek megkutatásával, bővítésével. Az öt nyersanyagról vázolható mai pillanatképet mutatják be a következő bekezdések. A nyersanyagok adatlapjai tartalmazzák a begyűjtött és értékelt részletes információkat [2]. Ezeket a tervek szerint a TEKH félévente tekinti át és aktualizálja.



1. ábra. A Li-ion akkumulátor metszete a jellemző nyersanyagok feltüntetésével. Forrás: autotechnika.hu

A hazai előfordulásokról itt csak néhány azonosító adatot közlünk, és a *Bányászati és Kohászati Lapok* későbbi számaiban jelenik majd meg összefoglaló értékelés.

Lítium, Li

Alkáli fém, a földkéregben átlagos gyakorisága 21 g/t [6]. Stratégiai/kritikus elem minősítést azért kapott 2020-tól az EU-ban, mert mind a nyersanyag készletek, mind a jelenlegi termelés döntően tengerentúli országokban összpontosulnak (1. és 2. táblázat), és a bővülő európai autógyártás rövid- és középtávon csak ezekre a külső importforrásokra támaszkodhat.

A lítiumion akkumulátorokban hagyományosan az elektrolit szerepét tölti be (1. ábra). A lítiumot és vegyületeit számos más ipari alkalmazásban is használják, pl. hőálló üvegek és kerámiák, a repülőgépipari ötvözetek előállítására.

A fém egyik jellemzője a rendkívüli reakcióképesség. Ehhez kapcsolódik fokozott tűzveszélyessége, illetve tűz esetén az oltással kapcsolatos nehézségek is, mivel a lítium akár az oltóvízzel is hevesen reagál. Ez egyúttal az alkalmazási lehetőségeket is behatárolja.

A lítium több geológiai környezetben alkot jelentős előfordulásokat:

Földtani helyzet	Fő lítiumtartalmú összetevők
Gránit pegmatitok	spodumen $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Vulkanogén agyagos üledékek	hektorit $\text{Na}_{0,4}\text{Mg}_{2,7}\text{Li}_{0,3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Salar sós tó, evaporitok	Li-karbonát, Li_2CO_3
Termálvizek	oldott Li-sók

A lítiumpiac az autóipar villamosításával párhuzamosan globális kérdéssé vált. Az árak olyan ingadozóak, mint a kereslet előrejelzése. Jelentős csúcsra szöktek az árak a COVID utáni időszakban a termelő kapacitások egyidejű újrandulásával, majd komoly áresés volt tapasztalható, a lítium ára a 60 000 USD/tonna közeli csúcsertékről 13 000 USD/tonna körüli csúcsra csökkent. Ennek oka elsősorban a megnövekedett lítiumkutatás és az alternatív energiatároló rendszerek keresése, valamint az elektromos autók gyártásának lassabb üteme, a mérsékelt piaci kereslet, illetve, az árszűcs vonzotta befektetések bővítő hatása a felderített ásványvagyron források szegmensében. A pillanatnyi fémárak mellett a 10 USD/tonna érc helybeli értéket a kb 750 g/t Li-tartalom jelenti.

A világon mind az ásványvagyronok listáján, mind az elsődleges ásványi nyersanyagtermelés területén Chile, Ausztrália és Kína vezet, a kitermelés több mint 90%-át adva. Európában a 2010-es évek elején megnövekedett piaci kereslet hatására számos lítiumérc-kutatási projekt indult Írországban, az Egyesült Királyságban, Franciaországban, Spanyolországban, Németországban, Ausztriában, Csehországban és Finnországban. Németországban kísérleti stádiumban van a geotermikus magas sótartalmú mélységi vizekből kinyert lítiumtermelés. 2024-ben várhatóan több bányászati projekt lép termelésbe Európában, a legfontosabbak a Cinovec (Németország, Cseh Köztársaság), a United Downs (Egyesült Királyság) lelőhelyei [4].

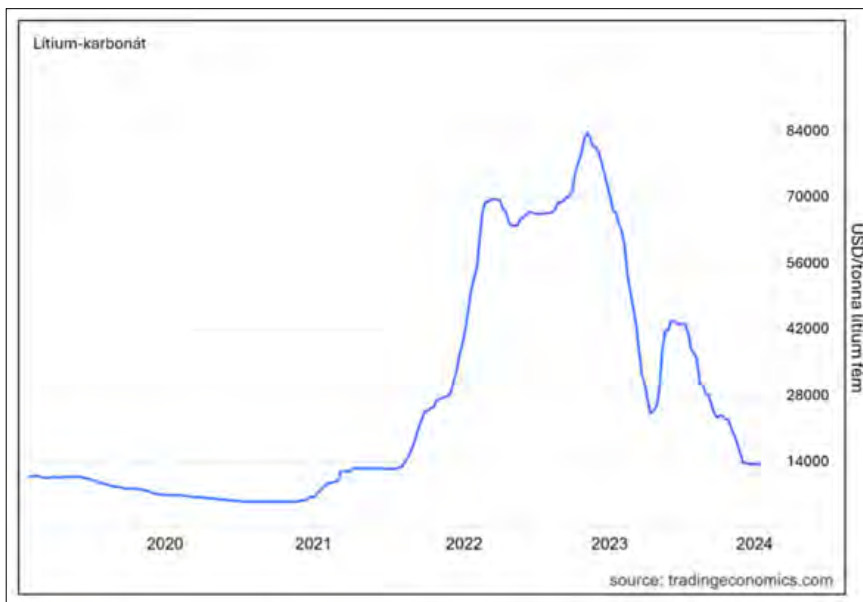
Magyarországhoz legközelebb Szerbiában található a Jadar előfordulás tartalmazza Európa legnagyobb lítiumérc ásványvagyont, de ennek fejlesztése jelenleg a kitermeléssel kapcsolatos környezetvédelmi kérdések rendezéséig felfüggesztették.

A Miskolci Egyetem bevonásával sikeresen lezárultak (CHPM 2030) vagy jól haladnak a sótartalmú termálvizekből történő kitermelésre irányuló nemzetközi kutatási programok, mint például a Brine-RIS [7]. Hazai előfordulások közül az alföldi termálvizekben mutatkoztak első ígéretes eredmények [8] (4. táblázat).

Mangán, Mn

A mangán a külső kontinentális kéreg gyakorisági listáján a 12. legnagyobb mennyiségben előforduló elem, körülbelül 0,1 tömegszázalékos átlagos mennyiségével [6].

Azért került fel az EU stratégiai nyersanyagai közé, mert nagy tisztaságú, szennyeződésmentes mangánként a Li-ion-akkumulátorok katódjának fő komponense (Ni és Co elemekkel együtt). A termelt mangán több mint 90%-át a kohászati iparban használják fel, ahol erős redukálószer, elengedhetetlen az acélgégyártásban. Jelentős mennyiségben ferromangán ötvözetként kerül a piacra. Legfontosabb nem kohá-



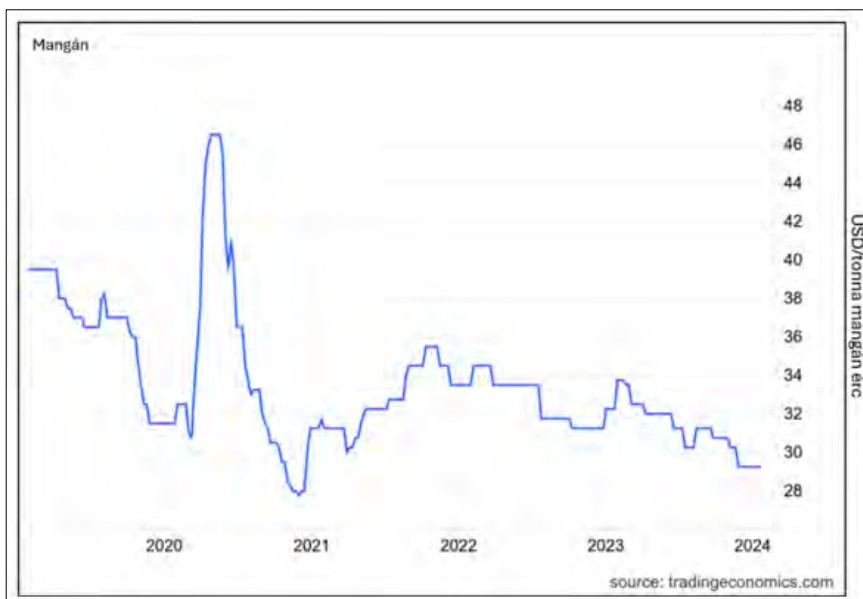
2. ábra. A lítium-karbonát világpiacon áráinak alakulása 2019–2024 között

szati célú felhasználása a szárazelemek gyártása, ahol mangán-dioxid formájában alkalmazzák. Emellett számos más gazdasági ágban is felhasználják, mint például nyomdafestékek, vegyipar, mezőgazdaság (műtrágyák, gombaölők stb.), alumíniumötvözetek gyártásában.

A kereskedelmi szempontból mangánércként forgalmazott nyersanyag MnO 44% referenciaminőségű [11].

A mangánérctelepek négy főbb csoportra oszthatók [12]:

- ❑ magmás képződményekhez kapcsolt,
- ❑ üledékes mangánérctelepek,
- ❑ szerkezeti zónák ércei és
- ❑ metamorf (többnyire az üledékes típus átalakulásával létrejött) dúsulások.



3. ábra. A mangánérc piaci áráinak alakulása 2019–2024 között

Számos ásvány tartalmaz mangánt, de ezek közül csak néhány fontos a fő ércásványként: ezek a piro-luzit (MnO_2), a pszilomelán ($Ba \cdot (H_2O)Mn^{3+}_5O_{10}$), rodok-rozít ($MnCO_3$), a manganit $MnO(OH)$, hausmannit ($Mn^{3+}_3O_4$), braunit ($Mn^{2+}Mn^{3+}_6SiO_{12}$).

A mangán áringadozása az acél iránti kereslet változásait tükrözi. 2020 elején a kínai elektrolitikus mangánpiac összesített működési üteme jelentősen csökkent a COVID-19 világjárvány idején bevezetett szigorú intézkedések miatt, de jó támogatást mutatott a mangánárak későbbi, 2021-es korrekciójához.

A világ legjelentősebb mangánérc ásványvagyónál Dél-Afrika, Ausztrália és Gabon rendelkezik. Európában Ukrajna ásványvagyona jelentős. Koszovóban és kisebb mértékben Romániában és Magyarországon jelentős kiaknázatlan készleteket tartanak nyilván. A mangánérc legnagyobb globális termelői és exportőrei szintén Dél-Afrika, Gabon és Ausztrália. Európában Ukrajna mangánérc-termelése volt jelentős, de Bulgária is ide számít (2021) [4].

A piaci forgalomban a mangánérc 4–6 USD/tonna érc (44% MnO) tartományban mozgott 2016–2021 között [9]. Jóval magasabb árfekvésű az akkumulátorfém minőségű (nagy tisztaságú) mangán piaca (elektrolit mangán 1750 USD/tonna).

Magyarország két leállított mangánérc lelőhelye Urkút és Eplény, egyúttal ritka földfémek és kobalt jelentős dúsulását is tartalmazza, és átértékelésre szorul [3].

Kobalt, Co

Átmeneti fém, a felső kontinentális kéregben átlag koncentrációja 17 ppm.

A teljes akkumulátorellátási lánc kulcsfontosságú nyersanyaga, az akkumulátorokban a katódhoz szükséges egyik fém, így elektromos járművek és a hordozható elektronika gyártásában nélkülözhetetlen szerepet tölt be. 2011 óta szerepel a kritikus elemek listáján [10].

A kobalt ércként a természetben három földtani környezetben alkot jelentős előfordulásokat [4]:

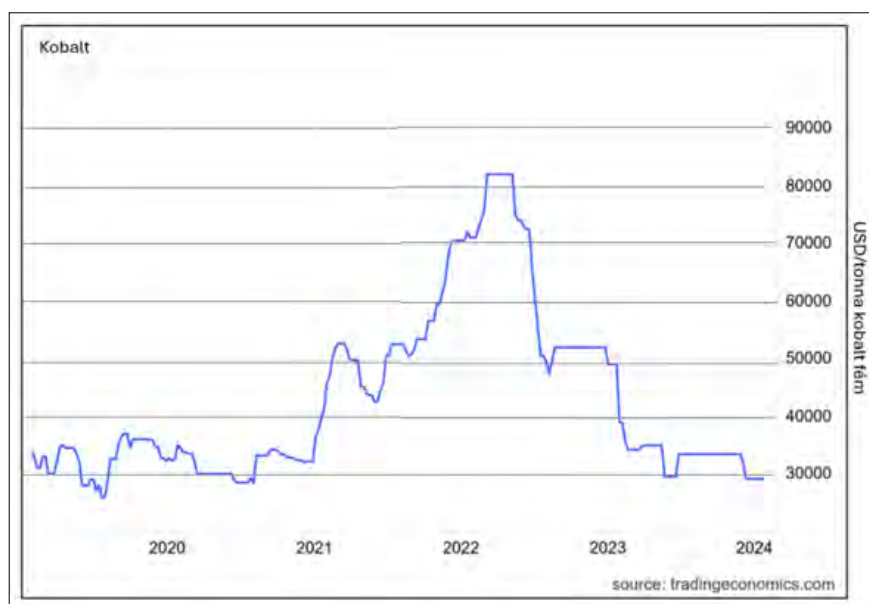
- ❑ Rétegvöető Cu-Co lelőhelyek – Katanga (DR Congo), Talvivaara (Finnország)
- ❑ Ni-Co lateritek ultramafikus kőzetek, különösen peridotit és szerpentin felszíni mállása nyomán (Brazília, Kamerun, Kuba, Új-Kaledónia, Indonézia és a Fülöp-szigetek, Ausztrália, az Egyesült Államok, Madagaszkár és Oroszország).
- ❑ Magmás Ni-Cu (-Co-PGE) szulfid ércetek, köpeny eredetű magmás kőzetekben Kiemelkedő példák: Sudbury (Ontario, Kanada) és Nor’ilsk (Szibéria, Oroszország).

Gyakori kobalt tartalmú ércképző ásványok szulfidok és szulfoarzenidek: kobaltin (CoAsS), karrollit ($\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$), eritrit ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) és szkutterdit ($(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{3-x}$).

Az elmúlt öt év ártrendje a 4. ábrán látható. A kobalt fém jelenlegi világgpiaci ára körülbelül 30 000 USD/tonna.

A országokénti kobaltérc ásványvagyonglistát Kongó, Ausztrália és Kuba vezeti. A Kongói Demokratikus Köztársaság rendelkezik a világ legnagyobb megkutatott kobalt érckészletével. A világ legnagyobb termelője is Kongó, melyet Indonézia és Oroszország követi (2021). A világszerte kitermelt kobalt nagy része (98%) egyéb érc (pl. nikkel) bányászatából származó melléktermék, önállóan a kobalt mindössze 2%-ban fordul elő, 38% nikkel-kobalt ércből, valamint 60% réz-kobalt ércből származik. A finomított kobalt fém kohászati előállítását Kína uralja (76%).

A kobalt esetében meg kell említenünk az etikus bányászat problémáját. A kongói illegális kobaltérc-bányákban gyakran alkalmazott gyermekmunka miatt



4. ábra. A kobalt fém világgpiaci árának változása 2019–2024 között

a kongói bányászati termékek bojkottját, illetve visszaszorítását kezdeményezik. Kongónak a piacon elfoglalt erős pozíciója miatt ez jelentős globális ellátási kockázatot jelent.

Görögországban a laterites nikkellelőhelyekről bejelentett előfordulások körülbelül 95 000 tonna kobaltot tartalmaznak. A Lengyelországban felsorolt készletek 75 000 tonna kobaltot tartalmaznak. Európában 104 kobaltlelőhelyet azonosítottak, amelyek többsége Finnországban, Norvégiában, Svédországban és Görögországban van. Jelentős, de még feltáratlan lelőhelyek Svédországban és Spanyolországban találhatóak [13]. Szlovákiában Hodkovce és Dobsina a két legígéretesebb előfordulás [14].

Az EU-n belül az elmúlt öt évben 140–2300 tonna kobaltot (a világtermelés 1-2%-át) bányásztak ki, mindet Finnországból. Európa legnagyobb üzemelő bányája a Talvivaara Ni-Cu-Zn-Co-szulfid ércelelep Finnországban. További jelentős finnországi előfordulások: Hannukainen Fe-Cu-Au, Kevitsa Ni-Cu-PGE, Sakatti Ni-Cu-PGE, Hautalampi Ni-Cu-Co és Juomasuo Au-Co.

Magyarországon több, még nem kutatott, de anomális kobaltdúsulás ismert, Reesk, Úrkút, Eplény, Répáshuta szerepel a listán (4. táblázat).

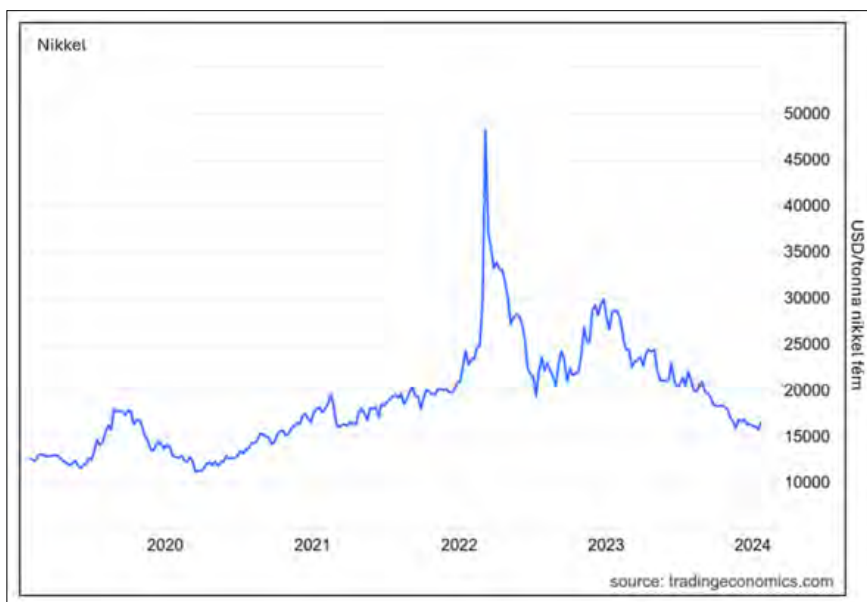
Nikkel, Ni

Átmeneti fém, közeli rokonságban az arzén, antimon, kobalt elemekkel. Átlagos koncentrációja a felső kontinentális kéregben 47 g/t.

2020 óta stratégiai nyersanyagként szerepel az EU listáján az akkumulátorhoz szükséges minőségű (az 1. osztályú, >99.8% tisztaságú Ni) változat. A hibrid járművekben használt akkumulátorok katódja egyik fő komponenseként (Ni-Mn-Co, Ni-Cd és nikkel-fém-hidrid akkumulátorok) egyre növekszik az alkalmazása. Más ágazatokban főleg ötvözetek, például rozsdamentes acél előállítására használják. Mivel a nikkel ellenáll a korróziónak, ezért más fémek bevonatolására is használják, korrozióvédelem céljából.

Az ásványi nyersanyagként bányászott nikkelérc két fő típusba sorolható [15]:

- ❑ Ni-lateritek, ebben a fő ércásványok a nikkeltartalmú limonit $[(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH})]$ és a garnierit $(\text{Ni},\text{Mg})_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – trópusi éghajlaton, bázisos és ultrabázisos kőzeteken keletkezett laterit,

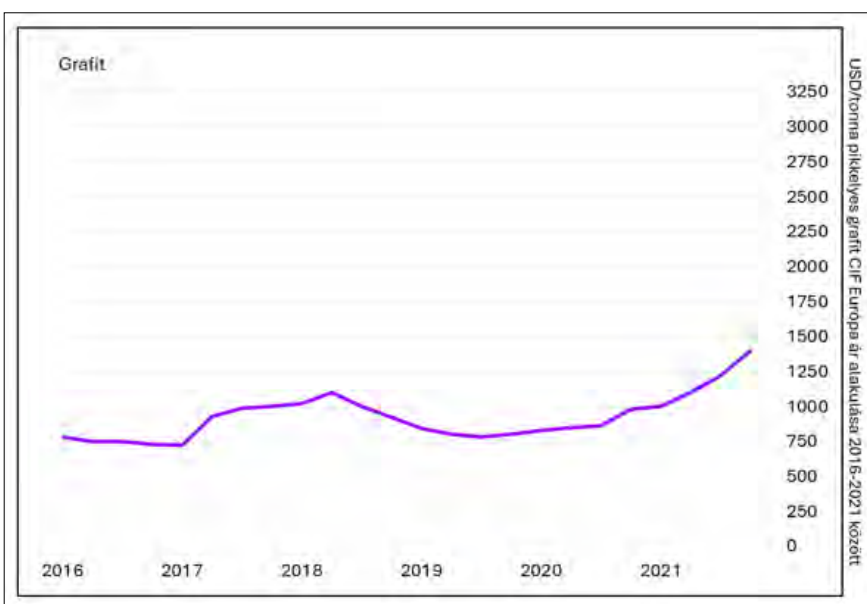


5. ábra. A nikkelfém árának alakulása 2019–2024 között

- magmás szulfid érctelepek, bázisos és ultrabázisos kőzetekben ahol a fő ércásványa a pentlandit [(Ni,Fe)₉S₈].

A nikkelfém a fémtözsdek egyik jelentős szereplője. Az elmúlt 10 évben a nikkelfém értékesítési ára 10 000 és 20 000 USD/tonna között ingadozott, jelenleg az azonnali ára 16 000 USD/tonna.

A nikkelfém érc ásványvagyoni listáján egyre inkább a laterit típusú előfordulásokkal rendelkező országok foglalják el az első helyeket (Indonézia, Fülöp-szigetek, Új-Kaledónia), míg a hagyományos nikkelfém érc termelői (Oroszország, Ausztrália, Kanada) hátrébb szorulnak (2. táblázat)



6. ábra. A nagy-kristályos grafit ára Európában 2016–2021 között. Forrás: [16]

A nikkelfém készletek globálisan 94 millió tonnára becsülhetők. A listát itt Indonézia (22,4%), Ausztrália (21,3%), Brazília (17%) vezeti. Európában a kitermelésre alkalmas nikkelfém készletei javarészt Finnországban találhatóak, kisebb előfordulásokat Spanyolországban, Görögországban, Törökországban, Macedóniában, Koszovóban és Ukrajnában tartanak nyilván (3. táblázat).

A globális termelés néhány országra koncentrálódik. 2022-ben a világtermelés több mint fele Ni-laterit lelőhelyekből származott (Indonézia, Fülöp-szigetek, Új-Kaledónia,

Kuba stb.). Az EU-ban három ország számolt be nikkelfém termeléséről a 2016–2020 közötti időszakban: Finnország (38 kt), Görögország (18 kt), Lengyelország (1 kt).

Magyarországon anomális nikkelfém dúsulások ultrabázisos képződményeinkben ismertek, Felsőcsatáron, Tornakápolnán (4. táblázat).

Grafit, C

A grafit a szén polimorf változata. Fémessé válik, kiváló hő- és elektromos vezető, inert, hőálló és jó kenőképeségű.

A nyersanyag 2011 óta minősül kritikusnak az EU-ban. Fő alkalmazási területei az acélgyártás (32%), az akkumulátorok (25%) és a kenőanyagok (13%). A grafitot kopórétegek kialakításában, ceruzákban, elektronikai eszközökben, égésgátló anyagokban és üzemanyagcellákban is használják. A természetes grafit fémessé és nemfémessé tulajdonságainak kombinációja miatt igen változatosan felhasználható.

A grafit kialakulása a széntartalmú anyagokban gazdag üledékes kőzetek metamorfózisának eredménye. Az ércitust az ipari osztályozásban amorf, kristályos vagy teleres grafitnak minősítik a kristályosodás foka, szemcsemérete és morfológiája szerint (az

1. táblázat. A világ legjelentősebb akkumulátorfém ásványvagyonával rendelkező országai

	Lítium	Mangán	Nikkel	Kobalt	Grafit
	2021	2022	2021	2021	2021
1	Ausztrália	Dél-Afrikai Közt.	Indonézia	Kongói Dem. Közt.	Kína
2	Chile	Gabon	Fülöp-szigetek	Oroszország	Brazília
3	Kína	Ausztrália	Oroszország	Ausztrália	Mozambique
4	Argentína	Kína	Új-Kaledonia	Fülöp-szigetek	Oroszország
5	Brazília	Ghana	Ausztrália	Kanada	Madagaszkár
6	Zimbabwe	India	Kanada	Kuba	Ukrajna
7	Portugália	Brazília	Kína	Papua New Guinea	Norvégia
8	Kanada	Ukrajna	Kuba	Madagaszkár	Észak-Korea
9	USA	Malaysia	Brazília	Marokkó	Kanada
10		Cote d'Ivoire	Dél-Afrikai Köztársaság	Indonézia	Vietnam
Source	[11]	[11]	[4]	[11]	[11]

amorf a legolcsóbb, a nagykristályos teléres grafit a legdrágább változat).

A grafit minőségét két paraméterrel jellemzik. Az egyik a TCG (Total Carbon as Graphite) – összes széntartalom grafit formában, a másik a kristályméret – amorf, 1 mm alatti, 1–6 mm közötti, illetve 6 mm feletti kristályméretek osztással. A nyersanyagoknak nincs jól követhető világpiaci ár jegyzése. A különböző változatok ára szélsőséges tartományokban mozog, A kristályos grafit európai ára a 2016–2021 közötti időszakban 750–1250 USD/tonna körül ingadozott [16].

Az ásványvagyonlistán a grafit esetében Kína, Brazília és Mozambik szerepel a dobogós helyen. Európában Oroszország, Ukrajna és Norvégia forrásai említendők. Termelőként Kína (67%) (2018-ban termelése 1,25 millió tonna), Brazília (8%), Mozambik (5%), India (5%) és Észak-Korea (5%) fedi le a világtermelés közel 90%-át. Az Európai Unió, a természetes grafit esetében 97%-ban importfüggő.

Jelenleg két aktív mélyművelésű bánya működik az EU-ban: az ausztriai Kaisersberg és a németországi Kropfmühl. Az európai kontinensen a legnagyobb grafitbánya az unión kívül az észak-norvégiai Skotlandban található, ahol kiváló minőségű kristályos grafitot állítanak elő, évente körülbelül 10 000 tonna grafitérből.

Romániában a múltban kiaknázták a grafitlelőhelyeket, ilyen volt pl. a Catalinu és Ungurelaşu bánya. Kristályos grafit előfordulások ismertek Szlovákiában, Kokova nad Rimavicouban és Hodkovceban [14].

Magyarországon az Upponyi hegység és a Szendrői hegység területén van adat grafitelőfordulásról (4. táblázat).

Összesített globális, európai és hazai körkép

Európa a világ egyik élenjáró autógyártó országcsoportja. Az elektromos hajtásra való fokozatos áttérés az akkumulátorgyártáshoz szükséges nyersanyagok forrásainak ismeretét nélkülözhetetlenné teszi. Kiemelten igaz ez a hazai gyártásunkra, amely jelenleg semmilyen belföldi ásványi nyersanyag háttérrel nem rendelkezik.

Az ásványvagyon bizonyos szinten már megismert, gazdaságos kitermelésre feltehetően alkalmas természeti erőforrást jelent. Egy jövőbeli ásványi nyersanyagtermelés alapját ennek az erőforrásnak a technológia, gazdaságosság és környezeti hatás szempontjából értékelt része, a készlet jelenti. Ezekről nem állnak rendelkezésre megbízható, összevethető globális adatok. Ennek oka elsősorban a kategorizálás eltérő szabályozása. Az akkumulátorfémek legnagyobb ásványi erőforrásaival rendelkező országok listája azonban összeállítható (1. táblázat). Az anyagfajtánként az első tíz országot felsoroló listánkon 29 ország szerepel, 5 Ázsiából, 9 Afrikából, 6 Amerikából, 6 Óceániából, 3 Európából (ebből csak egy az EU-ból). Az összes anyagra a legnagyobb ásványvagyon-háttérrel Ausztrália, Kína, Oroszország és Brazília rendelkezik. Európában csak Ukrajna (mangán és grafit), Norvégia (grafit), Portugália (lítium) van a nyersanyagokként nyilvántartott első tíz legnagyobb ásványvagyonnal rendelkező ország között. Mivel Európa a Zöld Átmenet hosszú távú stratégiáját tűzte zászlajára, kitettsége és sérülékenysége a megvalósításhoz szükséges nyersanyagellátás területén igen jelentős és nagyrészt biztonsági kérdés is. Ez a jelenlegi, hosszadalmas vitán áteső Kritikus Nyersanyag Törvény háttere is.

2. táblázat. Az akkumulátorfém ásványi nyersanyagkészletek nagysága és minősége az európai országokban (2022)

	Bizonyított	Minőség	Bizonyított	Minőség
	kt	%	kt	%
Lítium				
Ausztria	4 320	0,7	3 120	0,8
Csehország			432	0,7
Finnország	1 140	1,1	6 260	0,2
Németország	16 500	0,7	14 700	0,6
Portugália	10 700	1,1		
Mangán				
Koszovó	790 836	22,2	596 350	
Románia	1 000		17 000	
Ukrajna	1 851 000		2 500 000	
Nikkel				
Spanyolország	1	0,6		
Finnország	100	0,6	1 500	0,3
Oroszország	15 000			
Macedonia	5 600	1,0		
Koszovó	8 812	1,2		
Törökország	29 700	1,1		
Kobalt				
Finnország	525	0,0	72	0,0
Spanyolország	3	0,0		
Grafit				
Svédország	63 580	15,0		
Finnország	26 700	4,8		
Norvégia	1 780	22,0		
Ausztria	160			
<i>Forrás: [4]</i>				

Hasonló, de még élesebb kitétség jellemzi a hazai helyzetet, ahol a feldolgozó autó-, akkumulátorgyártási ipari centrumok kiépültek, a nyersanyagellátás hazai forrásainak kutatása viszont több évtizede szünetel. Az akkumulátorfémek csoportjában egyedül a mangánércből rendelkezünk kimutatott ásványvagyonnal, de az akkumulátorgyártáshoz szükséges ércfeldolgozási és kohászati technológia nélkül. A kutatási lemaradások pótlására, a hazai földtani információk újraértékelésére van sürgősen szükség.

A megkutatott és ipari felhasználásra alkalmas ásványi nyersanyagkészletek európai összesítésében

(2. táblázat) a skandináv országok, az Ibériai félsziget országai, és a Balkán térsége szerepel az élen. A jelentős lítiumkészletekkel rendelkezők között szerepel Ausztria és Németország (geotermális mélységi vizek jövőbeli hasznosításával).

Ebben az összegzésben sem a másodnyersanyagokkal, sem az újrahasznosítással nem foglalkozunk. Az egyes ásványi nyersanyagok átfogó, részletes elemzése is terjedelmi korlátokba ütközne, de az érdeklődő olvasó további geológiai, bányászati és gazdasági információkat érhet el az egyes nyersanyagokról a honlapunkon [2].

3. táblázat. A világ és Európa legfontosabb akkumulátorfém ásványi nyersanyagtermelői (2022)

	Lítium	Mangán	Nikkel	Kobalt	Grafit
	2022	2022	2022	2022	2022
Ország	tonna				
Argentína	6 200				
Ausztrália	61 000	3 300 000	160 000	5 900	
Brazília	2 200	400 000	83 000		87 000
Kanada	500		130 000	3 900	15 000
Chile	39 000				
Kína	19 000	990 000	110 000	2 200	850 000
Kongó Dem. Közt.				130 000	
Cote D'Ivoire		360 000			
Kuba				3 800	
Gabon		4 600 000			
Ghana		940 000			
India		480 000			8 300
Indonézia			1 600 000	10 000	
Dél-Korea					17 000
Madagaszkár				3 000	110 000
Malájzia		360 000			
Marokkó				2 300	
Mozambik					170 000
Új-Kaledonia			190 000		
Norvégia					10 000
Papua New Guinea				3 000	
Fülöp-szigetek			330 000	3 800	
Portugália	600				
Oroszország			220 000	8 900	15 000
Dél Afrikai Közt.		7 200 000			
Tanzánia					8 000
Törökország				2 700	
Ukrajna		400 000			
USA	939		18 000	800	
Zimbabwe	800				
Többi ország	136	970 000	440 000	5 200	9 700
Világ összesen	130 474	20 000 000	3 281 000	190 000	1 300 000

4. táblázat. Akkumulátorfémek ismert magyarországi dúsulásai

Irányítószám	Helység	CRM	Irányítószám	Helység	CRM
5919	Pusztaföldvár	Li	3559	Répáshuta	Co
7300	Komló, Sikonda	Li	8082	Gánt	Bauxit, Co
8409	Úrkút	Mn, Co, REE	9794	Felsőcsatár	Ni
8413	Eplény	Mn, Co, REE	3761	Tornakápolna	Ni
3395	Demjén	Mn	3622	Uppony	Grafit
3245	Recsk	Cu, Co, Sb, As, PGE	3752	Szendrő	Grafit
	REE = ritka földfémek PGE = platina fémek	Forrás: [2]			

A globális termelési adatok azt tükrözik, hogy melyek az európai és egyúttal hazai akkumulátor gyártásának lehetséges import nyersanyagforrásai (3. táblázat). Kiemeltük nyilvántartásokban megjelenő és a nyilvános listákon szereplő néhány európai termelő országot. Megállapítható, hogy az európai termelők egyetlen nyersanyag esetében sem érik el a piac teljes méretének 2%-át.

A jelentősebb európai termelők túlnyomórészt nem EU-országok (Törökország, Norvégia, Ukrajna). A nyersanyagforrások többsége pedig távoli tengerentúli régiókban van, vagy közelebb ugyan, de a jelenlegi geopolitikai helyzetben elérhetetlen helyzetben (Oroszország, Ukrajna).

Az akkumulátorfémek lehetséges magyarországi előfordulásait a 4. táblázat tartalmazza. Ezeket az előfordulásokat külön adatlapokon ismertetjük, melyek a TEKH honlapján érhetők el. Az azonosítás érdekében a települések irányítószámait feltüntettük. Részletes értékelésüket külön cikkben fogjuk ismertetni.

Összefoglalás

Az akkumulátorfémek ásványi nyersanyagai kevésbé ismertek Magyarországon, miközben az ország nemzeti célként jelölte meg, hogy világszínvonalú akkumulátorgyártó ipart fejleszt ki a közeljövőben. Ehhez véleményünk szerint a nyersanyagok hazai forrásainak kutatása és fejlesztése is szükséges. Az áttekintésünk és az összegyűjtött adatok segíthetik az ország több ismert hagyományos ásványlelőhelyének ilyen célú korszerű erőforrás-felmérését. Az információkat a kritikus és stratégiai elemek külön adatlapjai alapján összesítettük, amelyek a TEKH honlapján érhetők el. Ezekről az adatlapokon további információk (geokémiai adatok, publikációs hivatkozások stb.) találhatóak.

Irodalomjegyzék

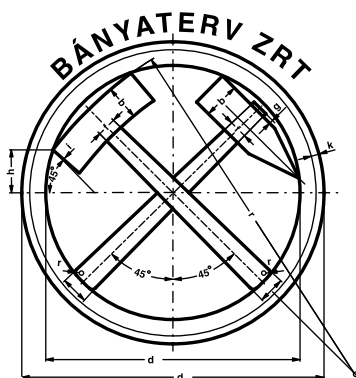
- [1] Földessy J., Márai F. (2023): Bevezető egy új sorozathoz: Kritikus és stratégiai nyersanyagok az Európai Unióban és Magyarországon – multimédia-adatgyűjtés építése a Miskolci Egyetemen. Bányászati és Kohászati Lapok, 156, 25-31, https://ombke.hu/wp-content/uploads/2023/12/BKL_2023-4.pdf
- [2] <https://tekh.uni-miskolc.hu/>
- [3] Földessy J. (szerk.) (2014): Basic research of the critical raw materials of Hungary. Milagrossa, Miskolc, 159 p. https://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/egyetem10_vegso_okt26.pdf
- [4] <https://screen.eu>
- [5] <https://novekedes.hu/elemezsek/terkepre-tettuk-a-hazai-akkumulatoripart>
- [6] Rudnick R. L., Gao S. (2003): Composition of the continental crust. Treatise of Geochemistry, 4, 1–64. Elsevier, Amsterdam. ISBN 0-08-044338-9.
- [7] https://brine-ris.eu/wiki/Main_Page
- [8] <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/11/mol-fontos-dontesek-elott-all-a-litiumprojekt>
- [9] <https://www.statista.com/statistics/247633/manganese-price-forecast/>
- [10] <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>
- [11] <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/>
- [12] Pál-Molnár E., Bíró L. (szerk.) (2013): Szilárd ásványi nyersanyagok Magyarországon. 249 p. Geolitera, Szeged.
- [13] Horn S., Gunn A. G., Petavratzi E. (2021): Cobalt Resources in Europe and the Potential for New Discoveries. Ore Geology Reviews, 130. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103915>
- [14] Baco P., Bacova Z., Németh Z., Repciak M. (2015): Potential occurrence of selected, mainly critical raw materials at the territory of the Slovak Republic in respect to EU countries needs. Slovak Geol. Mag., 15, 87–120.
- [15] Dill H. (2010): The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. Earth Science Reviews, 100, 1–420. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2009.10.011
- [16] <https://www.northerngraphite.com/about-graphite/graphite-pricing/>



BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK

Az Országos Magyar Bányászati és
Kohászati Egyesület lapja
ALAPÍTOTTA PÉCH ANTAL 1868-BAN

„Lektorált lap” – MTA Magyar Tudományos Művek Tára
Indexeli az EBSCO Publishing, Inc.



Bányaterv Mérnökiroda Zrt.

- Bányászati tervezés
- Földtani szakértői,
hites bányamérői,
felelős műszaki
vezetői szolgáltatás

Cím: 1054 Budapest,
Honvéd utca 8. I. em. 2.
Telefon: +36-20-4897781
E-mail: drvigh@banyaterv.hu

HIVATALOS MAGYARORSZÁGI  KÉPVISELET



3B Hungária Kft.

H-8900 Zalaegerszeg, Wlassics Gyula u. 13. • Tel.: +36 92/549-033
info@3bh.hu • www.3bh.hu

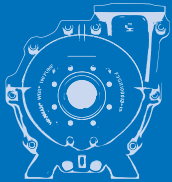


WEIR Minerals Sand Wash Plant

A global market leader providing trusted technology and services
which make your operations more productive and profitable



Hat vezető iparági termék.



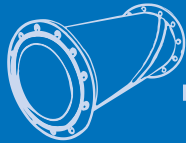
Warman®
zagszivattyúk

+



Cavex®
hidrociklonok

+



Linatex®
tömlők

+



Enduron®
rosták

+



Linatex®
gumi

+



Isogate®
szelepek

=



Egy Megbízható Forrás.

A Weir nagy szakértelemmel megtervezett homokmosó berendezései kis helyigényűek és a Weir saját világszínvonalú gépegységeiből épülnek fel melyek igen magas kopásállóságú anyagokból készülnek ezért hosszú élettartam mellett maximális kinyert hasznos homok mennyiséget garantálnak.

Mindez kiegészül a Weir elkötelezett terméktámogatás csapatával, projekt mérnökeivel, szervízálózatával, egyszerű kopóalkatrész hozzáféréssel nem csak Magyarországon, de a világ 170 pontján...

A döntés az Ön kezében van.

Tudjon meg többet weboldalunkon: sandwashplant.weir

Copyright © 2020, Weir Minerals Australia Limited. All rights reserved. 202003/AU1114

WEIR
Minerals

Az acélipar zöld átállásának technológiai áttekintése, annak műszaki gazdasági vonatkozásai

Technological overview of the green transition of the steel industry and its techno-economic implications

BURÓ BEÁTA

CEng, MIMMM, Projekt manager, Doktorandusz,
SteelTech-Center Hungary, H-3530 Miskolc, Egyetemváros
E-mail: beata.buro@uni-miskolc.hu



A vas- és acélipar felelős a világ üvegházhatású gázkibocsátásának több mint 7%-áért. A Párizsi Megállapodás hőmérsékleti céljainak elérése érdekében a CO₂-kibocsátás drasztikus csökkentésére van szükség. Számos alacsony vagy nulla CO₂-kibocsátású vas- és acélgyártási projekt van tervben vagy folyamatban a zöldacél előállítás érdekében. Számos megközelítés létezik a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének elérésére az acéliparban, mint körforgásos gazdaság, illetve az egyes technológiák CO₂-csökkentésére és közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése is. A vas- és acélipar zöld átállásának viszont számos műszaki-gazdasági vonatkozása van a technológia, infrastruktúra, tőke, működési költségek, kereslet és a politikai irányelvek szempontjaiból. Az átállás globális kihívást jelent, amely globális választ tesz szükségessé.

Kulcsszavak: szén-dioxid-kibocsátás, alacsony szén-dioxid-kibocsátású fejlesztés, zöld vas- és acélipar, gazdasági kapcsolat

The purpose of the Paris Agreement is to coordinate the global response to climate change caused by global warming. Global greenhouse gas emissions must fall by 33–41 Gt CO₂e (Gigatons of CO₂ equivalent) by 2030 and by 8–20 Gt CO₂e by 2050 to meet the Paris Agreement's temperature target. Steel is an essential material in modern life. Although the iron and steel industry is responsible for more than 7% of the world's greenhouse gas emissions. A number of low- or zero-carbon steelmaking projects are planned or underway to reduce carbon footprints and produce green steel. However, achieving drastic reductions in CO₂ emissions requires a new, transformative approach to iron and steel production.

Globally, the largest share of steel greenhouse gas emissions from the iron and steel industry comes from integrated processes, where coal, coke and gas is used to reduce iron ore to produce pig iron. The other significant proportion of the emission comes from the power generation required to operate electric arc furnaces (EAF) and rolling mills. There are several approaches to achieving significant reductions in carbon dioxide emissions in the steel industry. The main approaches can be grouped as circular economy, technologies for CO₂ reduction and avoidance of direct carbon dioxide emissions. The green transition of the iron and steel industry, on the other hand, has many technical and economic aspects: technology, infrastructure, capital, operating costs, demand and policies. The transition is a global challenge that requires a global response and will require collaboration between countries, public and private stakeholders.

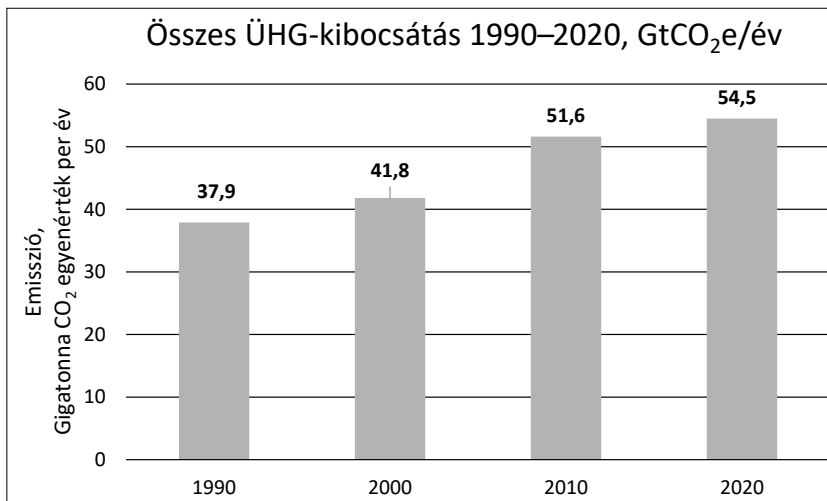
Keywords: carbon dioxide emissions, low carbon development, green iron and steel industry, economic implication

1. Bevezetés

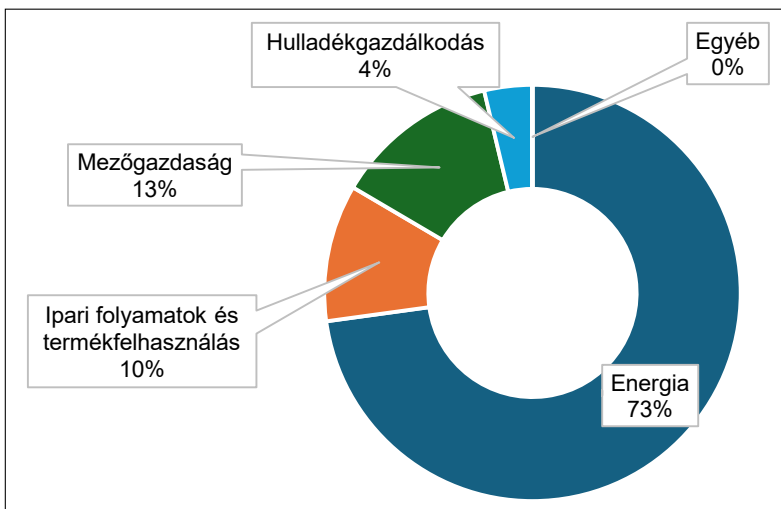
Az üvegházhatású gázok (ÜHG-k) azok a gázok, amelyek megkötik a hőt a légkörben, és üvegházhatást okoznak. A megnövekedett üvegházhatás okozta globális felmelegedés jelentős környezeti kockázatok elé állítja a Föld bolygó lakóit (Griffin 2021).

A Párizsi Megállapodás célja a globális felmelegedés okozta klímaváltozásra adott globális válasz koordinálása, hét üvegházhatású gázra vonatkozik (CO₂ – szén-dioxid, CH₄ – metán, N₂O – dinitrogén-oxid, HFC – fluor-szénhidrogén, PFC – perfluor-karbon, SF₆ – kén-hexafluorid, NF₃ – nitrogén-trifluorid). (KSH 2023) A CO₂ a világ összes ÜHG-kibocsátásának 81%-át teszi ki, ezért a klímaváltozás és a globális felmelegedés kezelésének kulcsa a CO₂-kibocsátás csökkentése (Wang 2021).

Az 1. ábra mutatja az összes ÜHG-kibocsátást 1990, 2000, 2010 and 2020-ban. A globális ÜHG-



1. ábra. Teljes nettó ÜHG-kibocsátás. Forrás: saját szerkesztés UN-dokumentum alapján (UN 2023)



2. ábra. Globális üvegházhatású gázok kibocsátása szektorokként. Forrás: saját szerkesztés OECD.Stat-adatok alapján (OECD.Stat, 2023)

kibocsátás 2022-ben rekord magas értéket ért el, 57,4 GtCO₂e (Gigatonna CO₂-egyenérték), ami 50% emelkedés a 1990-es értékekhez képest.

A globális üvegházhatású gázok kibocsátásának 2030-ra 33–41 GtCO₂e-re, 2050-re pedig 8–20 GtCO₂e-re kell csökkennie, hogy elérje a Párizsi Megállapodás hőmérsékleti célját (UN 2023).

Világszerte a legtöbb ország már elkötelezte magát a CO₂-kibocsátás csökkentésére a közelmúltban bejelentett gyorsított céloknak megfelelően. Az EU az üvegházhatást okozó gázok 1990-es nettó kibocsátásának 55%-os csökkentését tűzte ki célul 2030-ra és a nettó nulla kibocsátást 2050-re (European Commission 2023),

Az USA ismét csatlakozott a Párizsi Megállapodáshoz (Blinken 2021), és kötelezettséget vállalt arra, hogy 2030-ra 50–52%-kal csökkenti a nettó ÜHG-kibocsátást a 2005-ös szinthez képest (US Department of State 2021), valamint kötelezettséget vállalt a nettó nullakibocsátás mellett 2050-re. Kína célja, hogy a csúcskibocsátás 2030-ban lesz, és eléri a nettó nulla emissziót 2060-ra (Zhang 2023).

E kötelezettségvállalásokhoz való igazodás érdekében a vas- és acéliparnak alapvető átalakulásra van szüksége a zöld átmenet elősegítése érdekében.

Ennek a tanulmánynak a célja, hogy a vas- és acélipar zöld átmenet technológiai szempontjait áttekintse és különböző publikációkból azonosítsa a zöld átmenet műszaki-gazdasági vonatkozásait.

2. Acélipari áttekintés

Az acél a modern életben nélkülözhetetlen anyag és kulcsfontosságú eleme a dekarbonizációnak is, mivel alapvető szerepet tölt be a különféle technológiákban, például az elektromos járművekben és a szélturbinákban.

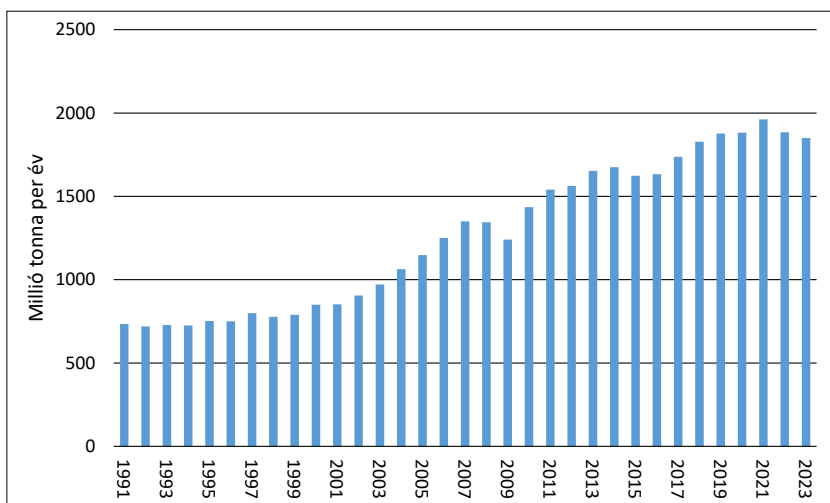
A 2. ábra az ÜHG-kibocsátás megoszlását mutatja a különböző szektorok szerint. A vas- és acélipar az energia kategóriába tartozik és a világ üvegházhatású gázok kibocsátásának több mint 7%-áért felelős.

Globális dinamika mutatkozik a karbonsemleges és fenntartható acélgyártás, az úgynevezett „zöld acélgyártás” megvalósításának irányában. Az, hogy egy acéltermék zöld legyen,

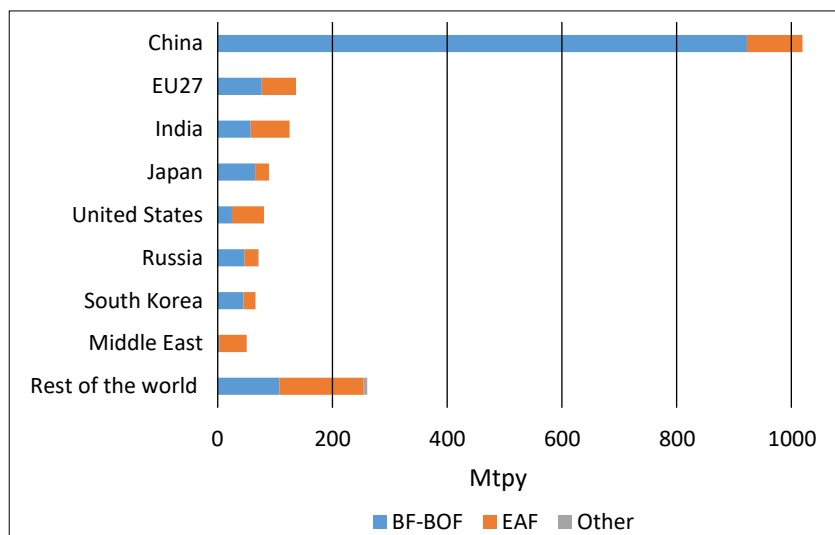
elsősorban a karbon lábnyoma vagy a magában foglalt karbonkibocsátás határozza meg (Muslemeni 2021). Ezért számos alacsony vagy nulla CO₂-kibocsátású acélgártási projekt van tervben vagy folyamatban a karbonlábnyom-csökkentése és a zöldacél előállítás érdekében. A CO₂-kibocsátás drasztikus csökkentésének eléréséhez azonban a vas- és acélgártás új, átalakuló megközelítésére van szükség.

2.1. Nyersacéltermelés

A nyersacél teljes termelése 2023-ban 1850 millió tonna volt (WorldSteel Association 2023). A 3. ábra a nyersacél előállításának időbeli, történelmi alakulását mutatja be. A nyersacéltermelés az elmúlt húsz évben csaknem megduplázódott, különösen a kínai termelés növekedése miatt (WorldSteel, WorldSteel Association 2023).



3. ábra. Nyersacéltermelés. Forrás: saját szerkesztés WorldSteel Association (WorldSteel Association 2023)



4. ábra. A nyersacéltermelés technológia szerint 2022-ben, millió tonna/év. Forrás: saját szerkesztés a WorldSteel alapján (WorldSteel WorldSteel Association 2023)

2.2. Nyersacéltermelés technológia szerint

A világ acélszükségletének nagy részét továbbra is integrált úton állítják elő, nagyolvasztó és konverter- (BF-BOF) technológiával, amely az iparág legnagyobb CO₂-kibocsátását eredményezi. A primer acélgártási folyamat során a vasércet a nagyolvasztóban koksszal vagy szénnel elegyítve redukálják nyersvasvá, amelyet ezt követően a konverterben nyersacéllá finomítanak.

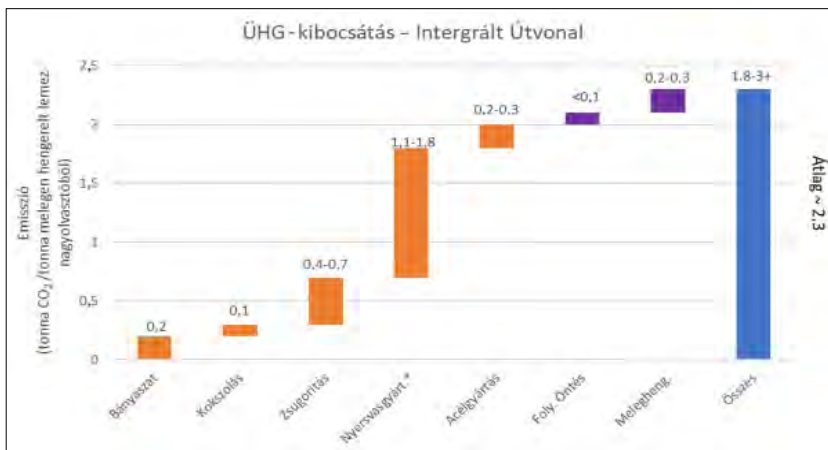
Az acél az egyik legnagyobb arányban újrahasznosított anyag a világon, mivel az acélhulladékok legnagyobb részét az elektromos ívkemencékben (EAF) hasznosítják újra. Amikor a „minimill”-ek (kis kapacitású lineárisan elrendezett, kizárólag újrahasznosításra létesült acélművek) először megjelentek, alacsony költségű, hulladék alapú alternatívát kínáltak a főleg érc alapú integrált acélgártás helyett.

Manapság vasszivacs (Direct Reduced Iron – DRI és Hot Briquetted Iron – HBI) alapú EAF üzemek is működnek. A DRI egy alternatív nyersanyag az acélgártásban a hulladék helyett, és a vasérc szilárd halmazállapotú közvetlen redukciójából (azaz teljes átolvasztás nélkül) redukálószerrel, például földgázzal, szintézisgázzal vagy szénnel állítják elő. HBI a vasszivacs brikettálásával állítható elő.

2022-ben a világ acéltermelésének körülbelül 71,5%-át nagyolvasztó és konverter- (BF-BOF) technológiával, körülbelül 28,8%-át pedig EAF útvonalon állították elő (WorldSteel Association 2023). A 4. ábra a nyersacéltermelést mutatja be technológiák és országok szerint. A grafikonon jól látható, hogy bár egyes országokban az EAF technológia a domináns, a legnagyobb acélgártók, mint például Kína, integrált, BF-BOF útvonalon állítják elő a nyersacél nagy részét (WorldSteel Association 2023).

2.3. Üvegházhatású gázok kibocsátása technológia szerint

Az üvegházhatású gázok kibocsátása kategóriákba sorolható. A közvetlen (Scope 1) ÜHG-kibocsátások, amelyek egy vállalat



5. ábra. Üvegházhatású gázok kibocsátása az integrált acélgéztés lépéseiben (* min. tartalmaz biokarbonhelyettesítőt). Forrás: saját szerkesztés Carbon Trust alapján (Carbon Trust 2023)

tulajdonában vagy ellenőrzése alatt álló forrásokból származnak. A közvetett ÜHG-kibocsátás (Scope 2) a vállalat által felhasznált vásárolt villamosenergia-termelésből származó ÜHG-kibocsátást jelenti. A rendszer további kiterjesztésének lehetősége a „Scope 3” kategória bevonása, amely lehetővé teszi az összes többi közvetett kibocsátás kezelését, de ez a tanulmány a közvetlen és közvetett kibocsátásra összpontosít (World Resources Institute 2004).

Globálisan a vas- és acéltipar üvegházhatású gáz-kibocsátásának legnagyobb hányada az integrált acélgéztéshez köthető, ahol a szénből, kokszból és gázból származó szén-monoxidot vasérc redukálására, azaz nyersvas előállítására használják fel, majd azt dolgozzák fel folyékony acéllá a folyékony nyersvas oldott kísérőelem tartalmának, főleg karbon eltávolításával, ami további CO₂-kibocsátást okoz. A kibocsátás másik

jelentős hányada az elektromos ívkemencék (EAF) működtetéséhez szükséges energiatermelésből és a hengerművek földgáz üzemű hevítőkemencéiből származik, amelyek az acél féltermékek feldolgozására szolgálnak.

Az integrált acélművek közvetlen kibocsátása jellemzően 1,8–3 tonna CO₂/tonna előállított acél (Steelonthenet 2023). Az 5. ábra összegzi a BF-BOF technológia átlagos becsült kibocsátásait.

A hulladék alapú elektromos ívfényes kemencével gyártó (EAF) üzemek kibocsátása többnyire közvetett. A CO₂-kibocsátást többségét nem közvetlenül az acélgéztés termeli,

hanem a kemencét villamos energiával ellátó villamosenergia-termelők. Egy tipikus EAF esetében a közvetlen kibocsátás általában 0,06–0,1 tonna CO₂/tonna acél, a közvetett kibocsátások pedig további jellemzően 0,4 tonna CO₂-t jelenthetnek egy tonna acél esetén (Steelonthenet 2023).

A vasszivacs alapú EAF-ek CO₂-kibocsátása becslések szerint 2–3 tonna CO₂/tonna acél, ha az eljárás karbon alapú, vagy 0,7–1,2 tonna CO₂/tonna acél, ha az eljárás gáz alapú (Steelonthenet 2023).

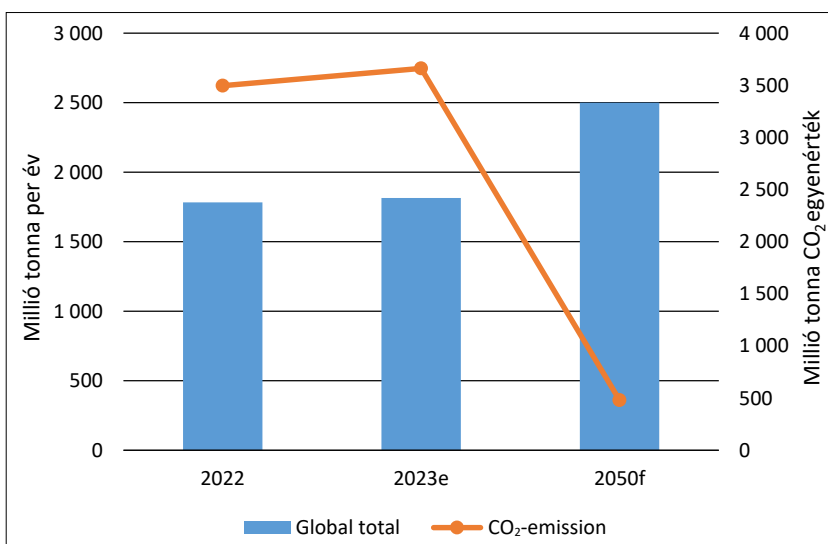
2.4. Acélkereslet

Az acél iránti kereslet 1815 millió tonnára becsülhető 2023-ban (Worldsteel 2023), és becslések szerint 2050-re 2500 millió tonnára emelkedhet (World Economic Forum 2022, IEA 2020), ami körülbelül 40%-os növekedés a mai szinthez képest.

A Worldsteel adatai alapján az acéltipar CO₂-kibocsátása 2022-ben 3,5 milliárd tonna volt. Az iparág változásai nélkül az igények kielégítése érdekében megnövekedett termelés mellett ez a szám körülbelül 4,8 milliárd tonna CO₂ lenne 2050-ben.

A 6. ábra mutatja az acéltipar 2022-es és 2023-as teljes CO₂-kibocsátását és a 2050-ben várható kibocsátást technológiai változtatások nélkül, valamint a Párizsi Megállapodás szerinti CO₂-kötelezettségi szintet.

A Párizsi Megállapodás és hosszú távú céljainak betartása nemcsak marginális fejlesztést



6. ábra. Az acél iránti kereslet és előrejelzés, valamint a CO₂-kibocsátási intenzitás és a vállalt CO₂-szint a Párizsi Megállapodás szerint 2050-ben. Forrás: saját szerkesztés a WorldSteel alapján (WorldSteel, Sustainability Indicators 2022, Hornby 2022)

tesz szükségessé, hanem az uralkodó társadalmi-gazdasági rendszer „alapvető szerkezeti átalakítását” (Mayer 2019). Körülbelül 90%-os CO₂-kibocsátás-csökkentés lenne szükséges az acéliparban. Ezért az ambíciók és a végrehajtás szintjei között megfigyelt szakadék megszüntetése számos kihívással néz szembe (OECD 2022).

2.5. Általános dekarbonizációs stratégiák

Számos megközelítés létezik a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének elérésére az acéliparban. A fő megközelítések csoportosíthatók, ezek a körforgásos gazdaság, technológiák CO₂-csökkentése és közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése.

2.5.1. Körforgásos gazdaság

A körforgásos gazdaság a lineáris üzleti modellekről – amelyekben a termékeket nyersanyagokból állítják elő, majd hasznos élettartamuk végén eldobják – a körforgásos üzleti modellek felé való elmozdulást jelenti, melynek során az intelligens tervezés a termékek vagy alkatrészek javításához, újrafelhasználásához és újrahasznosításához vezet (Forum 2014). Az acélipar már ma is a globális körforgásos gazdaság szerves része, mivel az acél az egyik legtöbbet újrahasznosított anyag a világon.

A 100%-os acélhulladék-alapanyag és a nulla szén-dioxid-kibocsátású villamosenergia-ellátás kombinálása máris csökkenti az ágazat szén-dioxid-kibocsátását. A szennyező elemek felgyülemelése és az acélhulladék korlátozott elérhetősége miatt azonban a teljesen hulladék alapú acélgyártás elterjedése korlátozott (Radloff 2023). Ez azt jelenti, hogy 2050-ig és azt követően is nagy mennyiségű primér vashordozóból előállított acélra lesz szükség. A fő CO₂-kibocsátás a nagyolvasztókból származik a vasgyártás során, ezért ebből a folyamatból származó szén-dioxid-kibocsátás csökkentése a dekarbonizáció legfontosabb első lépése.

2.5.2. CO₂-csökkentésre irányuló technológiák

Ezek a technológiák magukban foglalják a meglévő folyamatokban a karbonfelhasználás csökkentését, a belső folyamatgázok felhasználását, valamint a CO₂ hasznosítását nyersanyagként, kémiai átalakítással (karbonleválasztás és -hasznosítás (CCU) és/vagy karbonleválasztás és -tárolás (CCS)).

A kibocsátás növekedésének jelentős költség nélküli leggyorsabb lassításának kulcstényezője a nagyolvasztó energiahatékonyságának javítása (Holappa, MDPI 2020). A hatékonyság optimalizálása érdekében különféle lehetőségeket vizsgáltak meg:

- új vas-szén agglomerátumok,
- vasszivacs- (HBI) adagolás nagyolvasztóba,
- hidrogénhasználat nagyolvasztóban.

A karbon helyettesítése kihívást jelent, azonban a biomassza, amely megújuló nyersanyag alacsony karbonlábnyommal (dokumentáltan élelciklus során) megoldást jelenthet. Egyes tanulmányok azt találták, hogy az előre feldolgozott biomassza, mint például a faszén használata akár 57%-os CO₂-kibocsátást is elenyészeltethet (Mandova és mtsai. 2018).

A technológiák fejlettségi szintje miatt előfordulhat, hogy a BF-BOF technológia CO₂-kibocsátásának további csökkentése érdemben nem lehetséges (Bhaskar 2022). A további csökkentés eléréséhez szükség van a szén-dioxid leválasztására, hasznosítására és tárolására (Cachola 2023).

Az elmúlt évtizedekben megnőtt az érdeklődés a CCS alkalmazások iránt a különféle iparágakban. Ennek ellenére csak egyetlen, már működő CCS megoldás létezik a vas- és acéliparban, az Emirates Steel Abu-Dhabiban található üzemében (Global CCS 2022).

A CCS nem tekinthető hosszú távú megoldásnak a CO₂-kibocsátás csökkentésére, csak átmeneti módszerként használható. Ennél jobb módszer lehet a szén-dioxid leválasztása, felhasználással kombinálva (CCU) (Holappa, MDPI 2020).

Különféle technológiák is fejlesztés alatt állnak a megkötött CO₂ hasznosítására. A CO₂ kémiai átalakítható más termékekké, például műanyagokká, betonná vagy bioüzemanyaggá, illetve felhasználható az olajkinyerés fokozására (WSA CCUS 2023).

Megemlíthetők még a következő technológiák, úgymint redukciós olvadéktechnológiák és fluidágyas reaktoreljárások.

Az olvadékredukció olyan vasgyártási folyamatok csoportjára használatos kifejezés, melyeknek célja a meglévő nagyolvasztó-útvonal alapvető problémáinak leküzdése, mint például a nagyüzemi működéstől, a koksztól és a dúsított vashordozóktól való függés. A legtöbb ilyen technológia azonban jelentéktelen mértékben csökkenti a CO₂-kibocsátást, és a CCS és CCUS technológiák integrációján alapul (Rhamdhani 2023, Jun Zhao 2020).

A biomassza alkalmazásával is csökkenthető a CO₂-kibocsátás, amely az olvadékredukciós eljárásoknál is használható, mint például a braziliai Vale tulajdonában lévő Tecored technológia (Nodin 2008).

Az olvadékredukciós technológián alapulva léteznek forradalmi áttörést ígérő, azaz „breakthrough” technológiák is, mint például az IBRSR (iron bath reactor smelting reduction), a HIsarna olvadékredukciós reaktor és a HPSR (hydrogen plasma smel-

ting reduction) technológiák (Draxler, Greensteel for Europe 2021).

A HIsarna az EU ULCOS (Ultra Low CO₂ Steel-making) projekt kezdeményezésének része, amelyet a Tata Steel Europe vezetett európai acélipari konzorcium fejlesztett ki (Yan 2023). Az eljárás során a hagyományos vasgyártási módszerekhez képest számos előfeldolgozási lépés kimarad, a vasérc közvetlenül a folyékony nyersvasat és salakot tartalmazó reaktor-terbe kerül, ahol a befűvott karbonnal és reakciógázokkal keveredve megolvad és folyékony nyersvas-sá alakul (Steel 2020, Yan 2023).

Fluidágyas reaktortechnológiák alkalmasak finom méretű anyagok feldolgozására. Számos eljárásból a következő technológiák működtek ipari méretben: FINMET, a CIRCORED és a FINEX (Li 2023). Viszont a legtöbb ilyen technológia alig csökkenti a CO₂-kibocsátást az integrált útvonalhoz képest. Hidrogén és megújuló energia alkalmazásával lényegesen nagyobb mértékű emissziócsökkentés érhető el, mint például HYREX (POSCO, Dél-Korea) vagy HYFOR (Primetals, Ausztria) technológiák. Eddig csak a CIRCORED technológiában használtak kizárólag hidrogént redukálószerként (Lang, Köpf, Valery n.d.), bár az üzem 2006-ban kereskedelmi problémák miatt bezárták (Martin Pei Markus, MDPI 2020).

2.5.3. A közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése

Ebbe a kategóriába a „breakthrough”, azaz áttörést jelentő technológiák tartoznak, mint például a karbon helyettesítése megújuló villamos energiával és/vagy fosszilis karbonmentes redukálószerrel (EUROFER 2019). Ide tartozik még a nagyobb mértékű termelés megújuló energiával, elektromos ívfényes kemencékben, illetve az acél közvetlen elektrolízise (Fleischanderl 2023).

Az acélhulladék újrahasznosítás lényegesen kevesebb CO₂-t bocsát ki, mint a nagyolvasztó és konvertertechnológia, és a termelés elérheti a nulla kibocsátást, ha teljes mértékben megújuló villamos energiát és megújuló karbonhordozókat használnak a technológia üzemeltetéséhez.

Alternatív vasgyártási technológiák közül a gázalapú DRI-gyártás már lényegesen alacsonyabb üvegházhatású kibocsátással és gazdaságosan működhet. A redukációs folyamatban a szén-monoxid mellett a földgázból származó hidrogén is részt vesz – arányának növelését évtizedek óta vizsgálják –, ami csökkenti a CO₂-kibocsátást. Hidrogénes eljárással a CO₂-kibocsátás akár 80%-kal is csökkenthető az integrált acélgyártási útvonalhoz képest (MIDREX 2017).

A három svéd cég, az SSAB, LKAB és a Vattenfall AB által indított HYBRIT kezdeményezés célja, hogy létrehozzák az első fosszilis karbonmentes

értékláncot a bányászattól a kész acélig (Martin Pei Markus, MDPI 2020). A projekt a vasércpellet aknakemencében történő redukcióját valósítja meg a víz elektrolízisével előállított hidrogén- és a fosszilis, karbonmentes tüzelőanyag alapú villamos energia felhasználásával. (Green Steel World Editorial Team 2022). A projekt megkezdte kísérleti működését, és 2021-ben legyártották az első fosszilis karbonmentes acélt.

A hidrogénplazma-olvasztási redukció (HPSR) ionizált hidrogénplazma segítségével, közvetlenül redukálja a vasércet folyékony nyersvas-sá (Rhamdhani 2023, Zarl, Farkas, Schenk 2020).

A Voestalpine Stahl Ausztriában a SuSteel projekt keretében építette fel kísérleti üzemét. Lehetőség van arra, hogy ez a módszer 2050-re áttörést jelentő acélgyártási technológiává váljon.

A lúgos vasérc-elektrolízis (alkaline iron ore electrolysis), vagyis az „electrowinning” eljárás során az áramot, egy inert anódról kis vasrészecskéket tartalmazó, folyékony, lúgos oldaton vezetik át, amikor a részecskék lerakódnak és redukálódnak a katódra alacsony hőmérsékleten (Draxler, Greensteel for Europe 2021). Ezt a technológiát különböző projektek részeként tanulmányozzák laboratóriumi léptékben, mint például az ULCOS és a SIDERWIN (SIDERWIN 2023).

Az Electra egy alacsony hőmérsékletű, zéró szén-dioxid-kibocsátású elektromos eljárás, amellyel alacsony minőségű vasércet finomíthatóak nagy tisztaságú vassá 60 °C-on, bevált ipari méretű elektrokémiai és hidrometallurgiai eljárások felhasználásával (Electra, n.d., John 2023).

Az olvadt állapotú oxid-elektrolízis (Molten Oxide Elektrolízis) elektrometallurgiai technológia a nyersacél előállítására közvetlenül vasércből. Ezt a technológiát jelenleg az EU-ban fejlesztik, főként az ArcelorMittal (ULCOS, IERO és VALORCO projektek), az USA-ban pedig az MIT és a Boston Metal cég (Draxler, Greensteel for Europe 2021). A folyamat gazdasági megvalósíthatósága továbbra is kihívást jelent, főként a megfizethető, karbonmentes anód hiányának tulajdonítható, amely képes ellenállni a korrózív környezetnek (Rhamdhani 2023).

Ezek a technológiák azonban egyelőre nem állnak rendelkezésre, egyesek a kutatás korai szakaszában, mások pedig csak a kísérleti/demonstrációs fázisban vannak (Muslemani 2021, Fan 2021).

3. Műszaki-gazdasági következmények

Globálisan az acélipari vállalatok 14%-a találhatja veszélyben magát gazdasági szempontból, ha nem tudják csökkenteni környezeti hatásukat. Következésképpen a szén-dioxid-mentesítést kiemelt prioritásként kell kezelni a gazdasági versenyképesség és az

iparág működési engedélyének megőrzése érdekében (McKinsey 2020). Ez nemcsak a fenntarthatóság, hanem a vállalatok túlélése szempontjából is kérdés.

Számos tanulmány kiemeli, hogy a vas- és acélágazatban 2050-re a nulla CO₂-kibocsátása technológiailag lehetséges. Ennek eléréséhez több rendelkezésre álló és kialakulóban lévő technológia alkalmazására lesz szükség. A haladás üteme a 2020-as években attól függ, hogy a politikai és vállalati döntések milyen mértékben tudják előre hozni az alacsony kibocsátású acélgyártásra irányuló beruházásokat a következő évtizedben, amikor a kapacitások többségének várhatóan jelentős beruházásokon kellene keresztülmennie (Mission Possible Partnership 2022).

Sok technológia ma nincs ipari méretű szinten, és az áttörést jelentő technológiák nagy részének fejlettségi szintje alacsony. Ezért a CO₂-csökkentések elérése és a közel nulla kibocsátású technológiákra való átállás valószínűleg sokáig eltarthat (IEA 2020). A globális zöld átállás felgyorsítása érdekében számos beruházási igényt kell kielégíteni (Financing the green transition 2023).

Az alacsony károsanyag-kibocsátású iparhoz szükséges infrastruktúrát szinte teljes egészében ki kell fejleszteni. A termelési eszközökbe történő befektetések mellett a szén-dioxid-mentesítési stratégiák alapját képező technológiák legalább kétbillió dollár értékű infrastrukturális beruházást igényelnek, a zöld hidrogéntermelés, a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás, valamint az alacsony kibocsátású energiatermelés terén (World Economic Forum 2022).

Az infrastruktúrába szükséges beruházások relatív mértéke mellett végső soron eltörpülhetnek az acélgyárak saját igényei. Ez az infrastruktúra magában foglalja a hidrogéninfrastrukturát is, amely végül alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrásból származik, és a villamos energiát elegendő mennyiségű zöld hidrogén előállítására, valamint az egyre inkább villamosított eszközbázis igényeinek kielégítésére használja fel. Összességében az acélipar szén-dioxid-mentesítése 5,2 és 6,1 billió dollár közötti kumulatív beruházást igényel, és a beruházások több mint kétharmada az acélgyárakon kívülre hárul (Mission Possible Partnership 2022).

Az acélipar szén-dioxid-mentesítését célzó beruházások a becslések szerint 300 milliárd dollárt tesznek ki a szokásos üzleti befektetéseken felül, azaz 2050-ig körülbelül évi 10 milliárd dollárt. A jelenlegi üzleti helyzet és az alacsony kibocsátású eszközök megtérülése azonban nem ösztönzi az iparági befektetéseket (World Economic Forum 2022). A legtöbb zöldacél-projektet hagyományos projektfinanszírozási modellel vizsgálják. Az olyan újabb technológiák esetében azonban, mint a hidrogén, a karbonleválasz-

tás és az elektrolízis, más megközelítésre lesz szükség (Attwood 2023).

Egy másik tanulmány becslése szerint a nettó nulla eléréséhez szükséges technológiák kereskedelmi forgalomba hozatala és bevezetése jelentős, évente 170–200 milliárd dolláros beruházást igényel az acéliparon belül és kívül (Mission Possible Partnership 2022). A szükséges beruházások jelentősek, de a befektetők és a közvélemény egyre nagyobb érdeklődést mutat a fenntarthatóság iránt (McKinsey 2020).

A működési költségek növekedésének elsődleges oka az alternatív anyagok, például a karbonsemleges biomassa, az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén és a nulla szén-dioxid-kibocsátású villamos energia közötti jelentős árkülönbség a fosszilis tüzelőanyagokhoz képest. Bár ezeknek az alternatíváknak a költségei csökkennek, nem valószínű, hogy az elkövetkező 10–20 évben versenyképesek lesznek a nem csökkenő fosszilis rendszerekkel szemben (Fan 2021). Az alacsonyabb és közel nulla kibocsátású primer acél többé fog kerülni. Szakpolitikai beavatkozásokra és értéklánc-koordinációra lesz szükség ennek a prémiumnak a kezelésére (Mission Possible Partnership 2022).

2050-re az acélgyártás átlagos költsége (a tökegeköltségek nélkül) egy nagymértékben szén-dioxid-mentesített világban még mindig 15%-kal magasabb lehet. Ennek a végső fogyasztóra gyakorolt hatása azonban viszonylag kisebb, mivel az acél féltermékek gyakran csak egy részét teszik ki számos olyan végterméknek vagy szolgáltatásnak, amelyben felhasználják azokat (Mission Possible Partnership 2022).

Az újrahasznosítási arányok és a felhasználás javítása nélkül a hulladék alapú acélgyártásra való áttérés erősen szűkülő acélhulladék-ellátást eredményez. A kilátásokat befolyásolja, hogy a növekvő mennyiségű hulladék milyen gyorsan és hatékonyan gyűjthető össze, válogatható és alakítható át végtermékké (Pickens 2023).

A hidrogén alapú acélgyártás lehetővé tételéhez elengedhetetlen, hogy a zöld hidrogén költsége, amelyet nagyrészt a megújuló villamos energia költsége befolyásol, egyidejűleg csökkenjen, hogy a gazdaságosság elve teljesüljön, összekapcsolva a hidrogénellátás biztonságát a megújuló energiaellátás fontosságával. A hidrogén alapú acélgyártásra való nagymértékű átállás esetén a nyersanyagellátás bizonytalan és emelkedő költségszerkezethez vezethet, illetve negatívan befolyásolva az új gyártási módszerek gazdaságosságát (McKinsey 2020).

Tekintettel a tiszta technológiák magas költségeire, az alacsony kibocsátású acél várhatóan zöld prémiummal, felárral jár majd együtt. Az alacsony CO₂-kibocsátású acél várhatóan 2025-re kerül a piacra, mintegy 25–50%-os zöld prémiummal az acélvásárlók számá-

ra. A befektetések ösztönzése érdekében kritikus fontosságúak az acélvásárlók keresleti visszajelzései. Ehhez meg kell erősíteni az acélvásárlók bizalmát abban, hogy képesek lesznek áthárítani a prémiumot a végfelhasználókra (World Economic Forum 2022). Rendkívül fontosak az átvételi megállapodások, amelyek a zöld acél vásárlására és a partnerségek kialakítására irányulnak még a termelési létesítmények tervezése előtt (Attwood 2023).

A vevői igények is változnak, és a karbonsemleges acéltermékek iránti kereslet nő. Ez a tendencia, amely már megfigyelhető számos iparágban, beleértve az autóiipart is, ahol a gyártók, például a Volkswagen vagy a Toyota ambiciózus célja, hogy teljes értékláncukból százszázalékosan kiküszöböljék a szén-dioxid-kibocsátást (McKinsey 2020).

A globális acélgyártási kapacitásnak csak kis hányadára vonatkozik a szén-dioxid-kibocsátási adóteher. Az alacsonyabb kibocsátású technológiák felé történő elmozdulás ösztönzése érdekében a szén-dioxid-árzás/adó az egyik olyan politikai eszköz, amelyet a kibocsátáscsökkentés támogatására használnak. A meglévő, világszerte alkalmazott szén-dioxid-árzási mechanizmusok a szén-dioxid-adókra és az uniós kibocsátás kereskedelmi rendszerére (ETS) egyaránt vonatkoznak. Azonban ez nem minden kereskedelmi rendszerben releváns, mivel a szén-dioxid-árzás 2021-ben a globális acélgyártási kapacitás és termelés körülbelül 20%-át fedte le (OECD 2022).

A globális piacokon a versenyképesség elvesztésének kockázata, valamint a kibocsátás áthelyeződési (carbon leakage) aggodalmak olyan okok, amelyek aláárasztják az acélágazatban megfigyelt szén-dioxid-adómentességet. Ezért a globális egyenlő versenyfeltételek javításának egyik eszközeként központi szerepet kap a nemzetközi együttműködés, a hatékony alacsony szén-dioxid-kibocsátású átállás biztosításához (OECD 2022).

Míg Európa elsősorban az úgynevezett piaci alapú intézkedésekkel élen jár a szabályozási reformban, amely szerint az acélgyártóknak minden egyes tonna CO₂-kibocsátásért fizetniük kell, az acélipar termelési volumenének nagy részére ingyenes kibocsátási egységekben részesül. Az acélimportra 2026-tól tervezett szén-dioxid-határkiigazítási mechanizmus (CBAM) bevezetésével az ingyenes kiosztások teljes eltávolítását tervezik 2035-ig (BCG 2022). Ezzel egyidejűleg Kínában – amely a legnagyobb acéltermelő ország – is folyamatban van a nemzeti szén-dioxid-árzási rendszer bevezetése.

Az USA más megközelítést alkalmaz, és nem vezet be a szövetségi szén-dioxid-árzást. Míg az Egyesült Államokban létezik néhány regionális szén-dioxid-árzási rendszer, a nemzeti intézkedé-

sek elsősorban a kibocsátások és a termékszabványok szabályozására, a környezetbarát beszerzésekre és az adókedvezményekre összpontosítanak (BCG 2022). Az USA-ban 2022-ben elfogadott inflációcsökkentési törvény széles körben alkalmazott jogszabály, amely termelési adójóváírást kínál az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogéntermelésre. (INVESTMENTS 2023).

Korlátozott politikai irányelvek támogatják jelenleg az alacsony CO₂-kibocsátású ipar növekedését. A szén-dioxid-árzás és kibocsátási adó kiigazítása vagy a termékleírási szabványok terén a közpolitika és a nemzetközi együttműködés segíthet egy differenciált és gazdaságilag életképes piac létrehozásában, ami az alacsony kibocsátású acélipar első lépése (World Economic Forum 2022).

Ami a másodlagos nyersanyagellátást illeti, a szabályozás korlátozni fogja az acélhulladék globális kereskedelmét, és ösztönözni a hazai fogyasztást. A kormányok már most is az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hazai ellátás stratégiai forrásának tekintik az acélhulladékot. Egyre gyakoribbá válnak a hulladékszállítás „onshore” kidolgozására és az export visszaszorítására irányuló szabályozások, különösen a szigorúbb minőségi előírások és az importkorlátozások formájában (Pickens 2023).

4. Következtetések

Számos technológiai kezdeményezés létezik a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére az acéliparban. A meglévő nagyolvasztó és konverteres létesítmények sajátos kihívásokat jelentenek a szén-dioxid-mentesítés terén. Ezeket a kihívásokat a hidrogén, a biomassa és a CCU/S különböző kombinációival lehet megoldani. A hidrogénnel és EAF-fel kombinált DRI a legalacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás elérésének legfejlettebb módja, ennek ellenére a meglévő gázüzemű művek átalakításának vannak korlátjai. Létfonosságú az új technológiák, kísérleti és demonstrációs üzemek ösztönzése.

Az üvegházhatást okozó gázok csökkentésére vonatkozó éghajlati célkitűzések teljesítéséhez a vas- és acélgyártóknak is összhangba kell hozniuk környezetvédelmi és pénzügyi céljaikat. De nyilvánvaló, hogy az acélipar átalakulásának számos technikai-gazdasági kihatása van. Az átállás globális kihívást jelent, amely globális választ tesz szükségessé, és együttműködésre lesz szükség az országok, az árami és magán érdekelt felek között.

Általánosságban jól látható, hogy az összes elemzett szempont globális szinten összefügg egymással, ennek ellenére előfordulhatnak eltérések a helytől függően. Különböző országok eltérő gazdasági háttérrel és infrastruktúrával rendelkeznek, amelyek meghatározzák a legéletképesebb forgatókönyvet.

IRODALOM

- Attwood D. J. (2023. 06. 26): Green Steel Demand is Rising Faster Than Production Can Ramp Up. Forrás: <https://about.bnef.com/blog/green-steel-demand-is-rising-faster-than-production-can-ramp-up/>
- BCG (2022. 02. 16): Transforming the Steel Industry May Be the Ultimate Climate Challenge. Forrás: Metals and mining industry: <https://www.bcg.com/publications/2022/steel-industry-carbon-emissions-challenge-solutions>
- Bhaskar A. A. (2022): Journal of Cleaner Production. Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>.
- Blinken (2021. 02. 1.): Forrás: US Department of State: <https://www.state.gov/the-united-states-officially-rejoins-the-paris-agreement/#:~:text=On%20January%2020%2C%20on%20his,unprecedented%20framework%20for%20global%20action.>
- Cachola C. S. (2023): Capture technologies: Improvements and promising developments. Carbon Capture Science & Technology, <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2023.100102>.
- Carbon Trust (2023. 06. 20.): Forrás: Carbon Trust: <https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prodrupal-files/documents/resource/public/International%20Carbon%20Flows%20-%20Steel%20-%20REPORT.pdf>
- Draxler S. K. (2021. 03.): Greensteel for Europe. forrás: Technology Assessment and Roadmapping: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/D1.2-Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Electra (dátum nélk.): Low-temperature iron with zero carbon emissions. Forrás: <https://www.electra.earth/technology/> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- EUROFER (2019. 11.): Low carbon roadmap. Forrás: Pathways to a CO₂-neutral European steel industry: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/reports-or-studies/low-carbon-roadmap-pathways-to-a-co2-neutral-european-steel-industry/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 06.)
- European Commission (2023. 10. 9.): Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets. Forrás: European Commission: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754
- Fan F. (2021): Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. Joule, P829-86.
- Financing the green transition (2023. 1.): Forrás: https://issuu.com/stateofgreen/docs/sog_whitepaper_financing2023_210x297_v06_web?fr=sMmNkZDY4NTc4O-TA&submissionGuid=c0097cb3-e5d9-44d2-a47e-d7130d788f55 (Letöltés dátuma: 2024. 03. 10.)
- Fishedick M. W. (2014): Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. Journal for Cleaner Production, pp. 563–580.
- Fleischanderl, D. A. (2023): Green steel in motion – iron feedstock meets renewable energy. (old.: Primetals). Abu Dhabi: WSA-Breakthrough Technology Conference.
- Forum W. E. (2014): Scoping paper: Mining and metals in a sustainable world. Forrás: https://www3.weforum.org/docs/WEF_MM_MiningMetalSustainableWorld_ScopingPaper_2014.pdf
- Global CCS (2022): Forrás: Global status of CCS 2022. <https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Status-of-CCS-2022-Report-Final-compressed.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Green Steel World Editorial Team (2022. 08. 11.): Green steel world. Forrás: HYBRIT – A trailblazer in steel industry's green revolution: <https://greensteelworld.com/hybrit-a-trailblazer-in-steel-industrys-green-revolution> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Griffin H. (2021): The prospects for 'green steel' making in a net-zero economy: A UK perspective. Global Transitions, Vol. 3, pp. 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2021.03.001>
- Holappa L. (2020. Aug. 19.): Mdpi. Forrás: A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Hornby S. (2022): Forrás: https://www.researchgate.net/publication/354477453_Impact_of_Hydrogen_DRI_on_EAF_Steelmaking
- IEA (2020. 10.): Iron and steel technology roadmap. Forrás: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (Letöltés dátuma: 2023. 10.)
- IEA (2021. 09.): An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. Forrás: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- INVESTMENTS, U. T. (2023. 04.): Forrás: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 29.)
- John J. S. (2023. 10. 15.): Electrowinning' could help win the race to clean up dirty steel. Forrás: Canary Media: <https://www.canarymedia.com/articles/clean-industry/electrowinning-could-help-win-the-race-to-clean-up-dirty-steel> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Jun Zhao H. Z. (2020): Ironmaking & steelmaking. Review of green and low-carbon ironmaking technology: <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1639029> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- KSH (2023): Az üvegházhatású gázok kibocsátása. Forrás: Fenntartható fejlődés indikátorai. <https://www.ksh.hu/ffi/3-1.html>
- Lang, Köpf, Valery. (dátum nélk.): Metso. Forrás: Circored fine ore direct reduction – a proven process to decarbonize steelmaking. <https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/circored-fine-ore-direct-reduction-a-proven-process-to-decarbonize-steelmaking/?r=3> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Li L. W. (2023. 02. 12.): Simulation of fluidization quality for various reduced-gas composition and agitation speed circumstances in a gas-solid fluidized bed with an inclined agitator. Forrás: MDPI: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/2/376> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Mandova H., Leduc S., Wang C., Wetterlund E., Patrizio P., Gale W., Kraxner F. (2018): Biomass and bioenergy. Forrás: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418301107?via%3Dihub>
- Martin Pei Markus P. A. (2020. 07. 18.): MDPI. Forrás: Toward a fossil free future with HYBRIT: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/972> (Letöltés dátuma: 2023. 02. 01.)

- Mayer B. S. (2019): Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1517–1533.
- McKinsey (2020): Decarbonization challenge for steel. Forrás: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>
- MIDREX (2017. 09.): MIDREX. Forrás: MIDREX H2: Ultimate low CO₂ ironmaking and its place in the new hydrogen economy. <https://www.midrex.com/tech-article/midrex-h2-ultimate-low-co2-ironmaking-and-its-place-in-the-new-hydrogen-economy/> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 01.)
- Mission Possible Partnership (2022. 06.): Making net-zero steel possible. Forrás: Steel transition strategy. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>
- Muslemani L. K. (2021): Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. *Journal of Cleaner Production*, 128127.
- Nodin D. (2008. 05.): The tecnored ironmaking process. Part 1 – Competitiveness and pilot development work. Forrás: *Ironmaking & Steelmaking* 35(4), 245–250. https://www.researchgate.net/publication/233547836_The_Tecnored_ironmaking_process_Part_1_-_Competitiveness_and_pilot_development_work (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- OECD (2022. 11.): Assessing steel decarbonisation ready for the decade of delivery? Forrás: <https://www.oecd.org/industry/ind/assessing-steel-decarbonisation-progress.pdf>
- OECD.Stat. (dátum nélk.): Forrás: Greenhouse gas emissions: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=air_ghg#
- Pickens N. (2023. 06. 26.): Why scrap metal is an opportunity too good to waste. Forrás: Wood Mackenzie: <https://www.woodmac.com/news/opinion/scrap-metal-opportunity/>
- Radloff A. W. (2023): An integrative and prospective approach to regional material flow analysis: Modeling the decarbonization of the North Rhine-Westphalian steel industry. <https://doi.org/10.1111/jiec.13387>
- Rhamdhani M. S. (2023): Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391> (Letöltés dátuma: 2024. 01. 24.)
- SIDERWIN (2023. 03. 23.): Siderwin. Forrás: SIDERWIN_Concluding_webinar2023_slides. <https://zenodo.org/records/7785032#.ZCVyxXZByUk> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Steel T. (2020): HISARNA. Forrás: Building a sustainable steel industry: <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-europe-factsheet-hisarna.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 06.)
- Steelonthenet (2023): Steel industry emissions of CO₂. Forrás: <https://www.steelonthenet.com/kb/co2-emissions.html>
- Team G. S. (2022. 08. 11.): Green steel world. Forrás: HYBRIT – A trailblazer in steel industry’s green revolution: <https://greensteelworld.com/hybrid-a-trailblazer-in-steel-industrys-green-revolution> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- UN (2023): Forrás: Broken Record. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- US Department of State (2021. 11.): The long-term strategy of the United States. Forrás: Pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>
- Wang Z. B. (2021): Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry – An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 129797.
- World Economic Forum (2022): Net-Zero Industry Tracker 2022 Edition.
- World Resources Institute (2004): World Business Council for Sustainable Development. Forrás: The Greenhouse Gas Protocol – A corporate accounting and reporting standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- WorldSteel (2021): Electrolysis in ironmaking. Forrás: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Electrolysis-in-ironmaking.pdf>
- WorldSteel (2022): Sustainability indicators. Forrás: WorldSteel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2022-report.pdf>
- WorldSteel (2023. 11.): Steel demand forecasts. Forrás: WorldSteel Association. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/worldsteel-Short-Range-Outlook-October-2023_table.pdf
- WorldSteel (2023): WorldSteel Association. Forrás: September 2023 crude steel production. <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/september-2023-crude-steel-production/>
- WorldSteel Association (2023): World steel in figures 2023. Forrás: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2023-4.pdf>
- WSA CCUS (2023): Fact sheet – Carbon capture and storage and use (CCSU). Forrás: World Steel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Carbon-capture-use-and-storage-2023.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Yan H. H. (2023. 02. 15.): Metallurgical and materials. Forrás: SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-023-02732-5> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Zarl, Farkas, Schenk (2020. 10.): MPDI. Forrás: A study on the stability fields of arc plasma in the HPSR process. <https://doi.org/10.3390/met10101394> (Letöltés dátuma: 2024. 0. 02.)
- Zhang S. X. (2023): The CO₂ emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107017>

A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai – modellkísérletek oldalszeles kovácstűzhelyben

Metallurgical aspects of the iron bloom formation – experiments in side-blast forge

THIELE ÁDÁM¹, HÁRI LÁSZLÓ²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

²Miskolci Egyetem, Metallurgiai Intézet, Vas- és Acélméltallurgiai Intézeti Tanszék, Miskolc.



A tanulmányban egy olyan modellkísérletet mutatunk be, amelynek során oldalszeles kovácstűzbe 65-ös szegeket adagolva vasbucát hozunk létre. A kísérletek során tett megfigyelések és vételezett minták anyagvizsgálatai alapján a középkori bucaaskohászatra is érvényes megállapításokat teszünk a vasbuca kialakulásának metallurgiai viszonyaival kapcsolatban.

In this paper, a model experiment is presented, in which iron bloom is extracted from small iron nails charged into a side-blast charcoal fueled forge (copy of medieval forges). On the basis of the observations and material analyses of samples taken during the experiments, conclusions are drawn regarding the metallurgical aspects of the iron bloom formation during the medieval iron smelting.

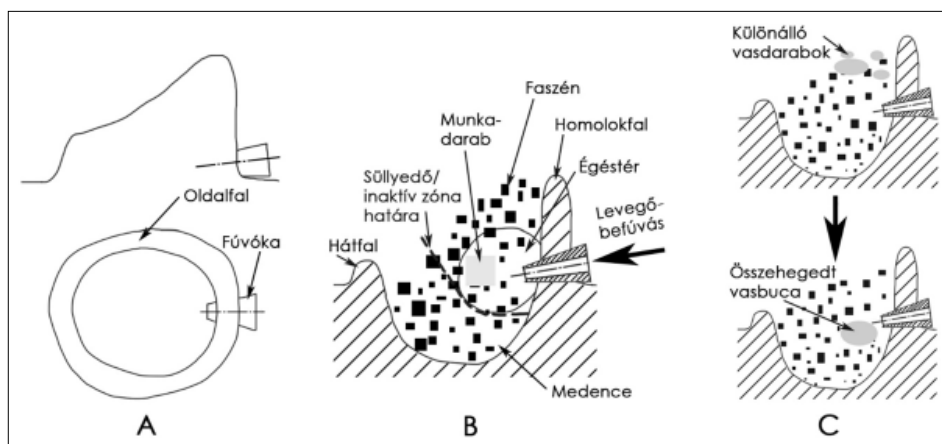


1. Bevezetés

1.1. Az oldalszeles kovácstűzhely felépítése és működése

A kovácsok évezredek óta használnak oldalszeles kovácstűzhelyeket [1], az angol nyelvű szakirodalomban „side-blast forge” (a másik, modernebb változat az alsószeles kovácstűz, „under-blast forge”) megnevezve.

A korai oldalszeles kovácstűzhelyek tulajdonképpen egyszerű, földbe vájt gödrök voltak (ld. 1A. és 1B. ábra). A gödörben faszén izzott. A gödör pereméhez radiális irányban egy fűvókát helyeztek el, ezen keresztül juttatták be a tűz szításához szükséges levegőt. Azért, hogy az izzó faszén kupacot egyben tartsák, a gödör peremére alacsony hát-, oldal- és homlokfalazatot építettek (a falazat a fűvókához közeledve egyre magasabb volt a célszerűen fűvóka fölé halmozott



1. ábra. Oldalszeles kovácstűzhely. A) oldal- és felülnézete. B) Keresztmetszete és főbb részei. C) Nagyméretű vasbuca kialakulása kisebb vasdarabokból

faszén kupac magasságának megfelelően). A kovácstűzhely fűvósík alatti része a medence.

A fűvóka előtt egy nagyjából gömb alakú térrész volt az égéstér, itt történt a faszén égése, itt alakult ki a munkadarab hevítéséhez szükséges, kellően nagy hőmérséklet. Az égéstértől távolabb már nem áll rendelkezésre elegendő oxigén a faszén elégéséhez. Az égéstér alatt és körül inaktív, álló faszén kupac található, ez az égésteret határoló inaktív zóna nem végez mozgást a kovácstűzhely üzeme során. Az égéstér fölötti faszén viszont állandó mozgásban van, folyamatosan süllyed az égéstérben eléggő faszén helyére, így azt pótolni szükséges. A hevítendő munkadarabot az égéstérben helyezzük el, a fűvóka orrától pár cm-es távolságban. A fűvóka és a munkadarab közötti hézagba, felülről folyamatosan pótolni kell az eléggő faszénet, amelynek fűtőértéke biztosítja a munkadarab felhevülését. Az oldalszeles kovácstűzhelyre jellemző, hogy a munkadarab a hevítés során lefelé süllyed. Ez a süllyedés mindaddig folytatódik, míg a munkadarab az égéstér aljára nem ér, és ott fel nem ül az inaktív zóna faszén kupacán. A korai oldalszeles kovácstűzhelyek nagy előnye a salakos bucavasak hevítésekor az volt, hogy a munkadarabból kifolyó salak lefolyt a medencébe, így nem tömítette el a fűvókát. A fűvóka alatt összegyűlt salakot, természetesen időnként ki kellett takarítani a medencéből.

1.2. A vasbuca kialakulása a kovácstűzhelyben

Az oldalszeles kovácstűzhelyeket elsősorban a munkadarab felhevítésére használhatták, de a kovácsoláskor vagy egyéb módon keletkező kisebb méretű vasdarab összehegesztése egy nagyobb, ismét megmunkálható vastömbbé, azaz újra hasznosítása bennük is lehetséges volt (valamekkora veszteséggel).

Kovácstűzhelyeket gyakran találtak középkori kohótelepek, vaskohászati műhelyek régészeti feltárasakor is, ezekre mint újraizzító tűzhelyekre hivatkozik a szakirodalom [2]. Az újraizzító tűzhelyekben a bucakemencékből a kohósítások végén kivett vasbucákat hevítették újra azért, hogy tovább tömörítésükkel minél inkább csökkentsék a salaktartalmukat. A kovácsfalvak kovácműhelyeikben is bizonyára ilyen felépítésű kovácstűzhelyek működtek.

Az oldalszeles kovácstűzhelyekben egyszerű gödörtűzhelyekben azonban nemcsak a munkadarab felhevítése történhetett, hanem számos más metallurgiai eljárásnak is alapvető berendezése lehetett (pl. cementálás, téglyacél-készítés – „cruciblesteel”, bronzolvasztás stb.). Az elmúlt években végzett kutatásaink alapján feltételezzük, hogy a késő avar korban nemcsak egyetlen kohósítás eredményeképpen, hanem ilyen oldalszeles kovácstűzhelyekben állítottak elő nagyobb méretű, kb. 10 kg tömegű ékelt vasbucákat [3]. A technológia kísérleti régészeti módszerekkel törté-

nő rekonstrukciója során kisebb méretű, 1-2 kg-os, tömörített vasbucákat raktunk az izzó faszénnel teli oldalszeles kovácstűzhelybe, a faszén kupac tetejére (ld. *1C. ábra*), amelyek lefelé süllyedve felmelegedtek, és a fűvóka alatt-előtt egyetlen nagyobb vasbucává hegedtek össze feltételezhetően diffúziós hegedéssel. Ezt a nagyobb vasbucát aztán tovább tömörítve és ék alakban bevágva a késő avar korra jellemző nagyméretű, ékelt vasbucát is sikerült készíteni (erről videó a Youtube-on: <https://youtu.be/0GpHU572pro>). Ugyanez az eljárás kisebb vasdarabkákkal elvégezve alapvető újrahazsnosítási technológia lehetett a múltban.

1.3. Célkitűzés

Ebben a tanulmányban egy olyan kísérletsorozat eredményeit szeretnénk bemutatni, amelyben kisméretű vasdarabokat, néhány gramm tömegű szegeket hegesztettünk össze egy nagyobb méretű vasbucává oldalszeles kovácstűzhelyben (a továbbiakban röviden a „szeghegesztős kísérlet” elnevezést használjuk). Ez egy olyan modellkísérlet, amelynek segítségével jobban megérthető, milyen metallurgiai folyamatok zajlanak le az oldalszeles kovácstűzhely fűvósíkján közelében, az így tehető megállapítások pedig kiterjeszthetők a korszakra jellemző kisméretű bucakemencékre is.

2. Módszerek és eredmények

2.1. A kísérlet leírása

Többféle kovácstűzhely kialakítással és a technológiai paraméterek (pl. befűjt levegő mennyisége, faszén szemcsemérete, beadagolt szegek összömege stb.) változtatása mellett összesen nyolc szeghegesztős kísérletet végeztünk el. Ezek egyikét ez a videó mutatja be: <https://youtu.be/9C26O82j55w>. Mivel ebben a tanulmányban a metallurgiai folyamatok értelmezésére fókuszálunk, az elvégzett kísérletek közül csak egyetlen reprezentatív esetet mutatunk be részletesen.

A kísérlet során összesen 1,2 kg-nyi 65-ös szegeket (átmérő: 2,8 mm, tömeg: kb. 3 g) hegesztettünk össze egy földbe ásott oldalszeles kovácstűzhelyben, amelynek főbb méretei a *2A. ábrán* láthatóak. A felhasznált frakcionált faszén 6–25 mm-es szemcseméretű volt. A tűzhelyt 20 percig fával, majd további 20 percig már levegő befűvése mellett faszénnel fűtöttük elő (ennek során 2,5 kg-nyi faszénet használtunk fel).

A levegőbefűvés egy kisméretű centrifugál ventilátorral történt. Az előfűtés után került az izzó faszén kupac a süllyedő zóna tetejére, közel a homlokfalhoz (ld. *2B. ábra*) az első 200 g adagnyi szeg, amelyet fokozatosan, a süllyedésnek megfelelően faszénnel fedtünk be. Apránként adagoltuk a faszénet, összesen 400 g-nyit, ami kb. 12 percig tartott. Ezután újabb 200 g-nyi szeg következett, amire ismét apránként 400 g-nyi faszén. Összesen 6 adag szeg és 6 adag fa-



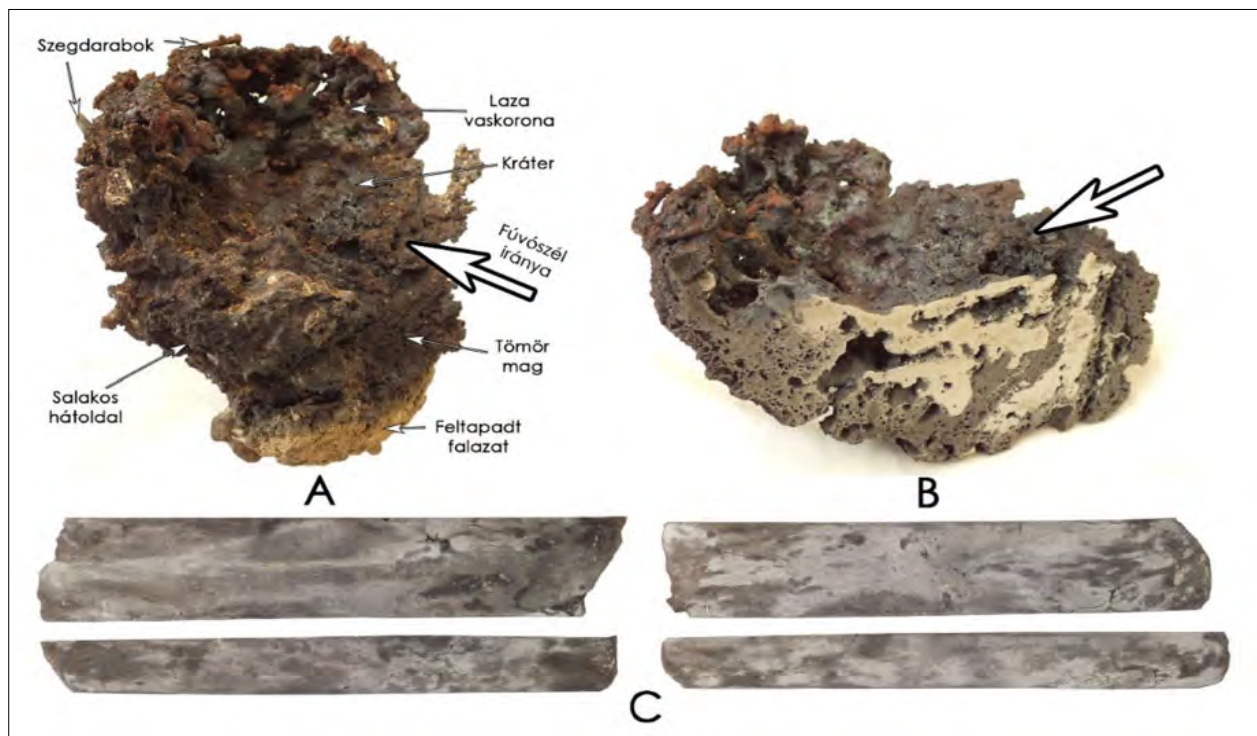
2. ábra. A szeghegestűs kísérlet oldalszeles kovácstűzhelyben. A) Méretek. B) Szegadag az izzó faszén kupac tetején. C) A fúvóka alatt-előtt összeállt salakos vasbuca a kísérlet végén

szén került be a tűzhelybe kb. 70 perc alatt. A befűjt levegő térfogatárama a kísérlet teljes időtartama alatt kb. 50 l/perc volt. Amikor az utolsó 400 g-os adag faszén elfogyott, lefűjtattuk a tüzet, azaz megvártuk, míg a homlokfal előtti faszén kupac leég annyira, hogy a vasbuca kitapintható legyen (ez a fűvósík feletti kb. 5 cm-es magasságot jelenti). Ezután a tűzhely inaktív zónájából kikapartuk az el nem égett faszenet, így láthatóvá téve a fúvóka alatt-előtt a falazatra feltapadt salakos vasbucát (ld. 2C. ábra). A megmaradt kb. 1 kg-nyi faszén levonásával összesen kb. 4 kg faszenet igényelt a kísérlet, amelynek időtartama összesen 130 perc volt.

2.2. Megfigyelések a vasbucán

A vasbucát ezután letörtük a falazatról, és lemértük a tömegét, amely 1,41 kg volt (a beadagolt szegeken

kívül a vasbucába salakként bekerült a tűzhelynek a fúvóka közelében leolvadó agyagfalazata, ill. kisebb tömegnövelő szerepe az elégett faszén hamujának is volt). A vasbucán megfigyelhető volt, hogy a nagyobb tömegű, tömörebb magja a fúvóka alatt helyezkedett el, a fűvósíktól kb. 8cm-es mélységig. A buca magján felül, koronaszerűen laza szerkezetű vasszivacs volt megfigyelhető, ez a szivacsosabb „vaskorona” a fúvóka orrpontjától félkör alakban kb. 6-7 cm-re alakult ki 3-4 cm-es vastagságban (ld. 3A. ábra) a fűvósíktól kb. 6 cm magasságig felnyúlva. A vasbuca alsó részén egy barna sáv jelzi a tűzhely feltapadt belső falazatának a töretfelületét. A vasbucán megmaradt szegdarabok csak a korona leghátsó és legfelső részén voltak néhol megfigyelhetők. A vasbuca fúvóka előtti kráteres része sok helyütt sima, égett felületű, más-hol viszont szivacsos, szemcsés a felület. A kráter alsó síkja a fűvósíkhhoz képest kb. 45°-os szögben állt, a



3. ábra. A) A tűzhelyből kivett vasbuca (a nyíl a fűvósík irányát jelöli). B) A vasbuca keresztmetszete. C) A vasbucából kikövacsolt vasrúd 10%-os nitállal makromarattva. A vasrúd 140×25×16 mm-es befoglaló méretetekkel rendelkezik

fúvósél tehát felfelé terelődött a kráterből. A kráter felülete a kísérlet során a fúvókán keresztül egy bottal vagy vaspálcával kitapintható volt.

A vasbucát ezután félbevágtuk, és az egyik fél vágási felületét megcsiszoltuk, ez látható a 3B. ábrán. Megfigyelhető, hogy a nagyobb vastartalmú, tömörebb rész a vasbuca tetején, a fúvóka orrpontjához közel, a fúvóka előtt-alatt található. A fúvóka orrpontjától távolodva a buca jóval salakosabb, kevesebb szénvasat tartalmaz.

Ugyanezt a kísérletet ismét elvégezve a kapott vasbucát már nem hagytuk kihűlni, nem vágtuk félbe, hanem többször újrahevítettük és tömörítettük, majd vasrúddá kovácsoltuk. A vasbuca tömege ekkor 1,45 kg volt (a kísérlet megismételhetőségét jelzi az előzővel közel azonos tömeg), a kapott vasrúd pedig 0,45 kg lett, ami az 1,2 kg-nyi felhasznált szeg figyelembe vételével 37,5%-os vaskihozatalt jelent.

Itt térünk ki arra, hogy egy másik kísérlet során 6–40 mm-es szemcseméretű faszénnel, 150 l/perces levegőmennyiséggel, 2,4 kg-nyi szegget 1,81 kg-os vasbucává hegesztettünk össze (ebben az esetben a salak jórészt elvált a vasbucától és lefolyt a medencébe), amelyből 1,07 kg-os vastömböt kovácsoltunk ki, ami 44,6%-os vaskihozatalt jelent.

A vastömb felületét felcsiszoltuk, és 10%-os nitállal makromarattuk a szén eloszlásának láthatóvá tételére érdekében (ld. 3C. ábra). A maratott felület alapján látható, hogy a szén eloszlása a vastömbben nagyon heterogén, megfigyelhetők kisebb-nagyobb mértékben szenet tartalmazó területek is. Azt tudjuk, hogy a kovácstűzbe adagolt szegek kémiai összetételüket te-

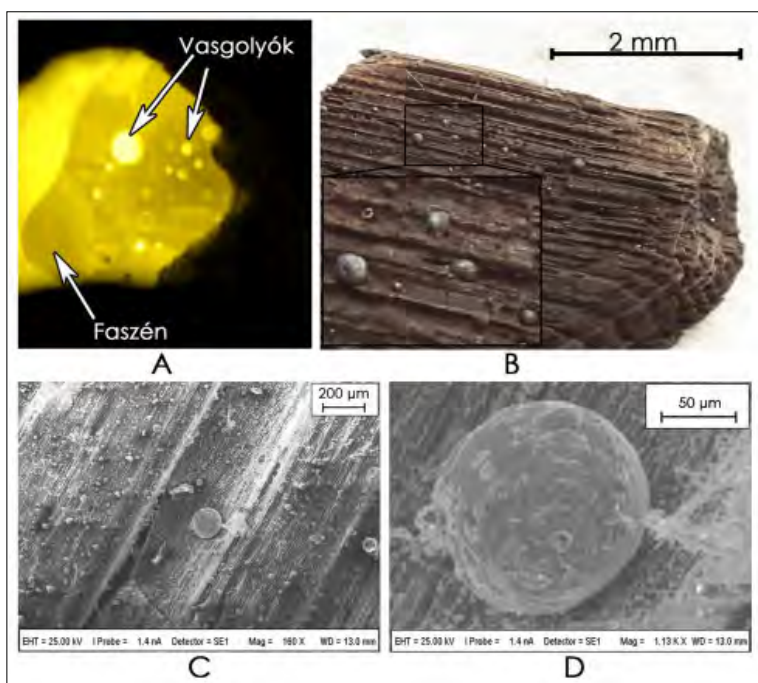
kintve kis széntartalmú lágyacélnak felelnek meg, így tehát megállapítható, hogy részleges cementálás történt, a szén dúsulásának pontos mértékét azonban a kapott vastömb átlagos széntartalmának ismerete hiányában nem lehet megállapítani. Korábban végeztünk már hasonlóan kikészített felületű, edzett hőkezeltségi állapotú bucavastömbökön HRC keménységméréseket a különböző sötétségűre maródott területeken, így az egyes mérési pontokban megbecsülhető volt a széntartalom [4]. A módszer kalibrálására GDOES mérést is végeztünk néhány pontban. Ezek alapján elmondható, hogy a maratott felület sötétebb területeinek széntartalma 0,5–1,5% körüli, a világos területeken pedig legfeljebb pár tized %-nyi szén van.

2.3. Megfigyelések a kovácstűzben

A fúvókán keresztül XTW 11-es sötétségű hegesztőüvegen keresztül benézve a fúvóka előtt, a faszén darabokra feltapadva apró, pár tized mm-es, esetenként 1-2 mm-es, fényesen izzó vasgolyók (ld. 4A. ábra), a faszén darabok között pedig lefelé csurgó folyékony salakcseppek voltak láthatók. Szegeket vagy azok felismerhető darabkáját a fúvósíkban egyáltalán nem lehet látni. Jól megfigyelhető volt az egymáshoz közel kerülő vasgolyók összehegedése, rögződése (a legnagyobb megfigyelt vasrögök kb. 5 mm-esek voltak), és a nagyobb rögök továbbgördülése a faszén felületén (erről videófilm: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>). A fúvókán keresztül egy vékony vascipesszel sikerült olyan faszén darabot kivenni a kovácstűzből, amelynek a felületét ilyen kis vasgolyók borították (ld. 4B.

ábra). Ezek a kis vasgolyók a faszénhez csak gyengén voltak hozzátapadva, egy tű hegyével könnyedén ki lehetett ezeket mozdítani a helyükről. Néhány ilyen faszén darabot elektronmikroszkóp (SEM) alatt is megvizsgáltunk (ld. 4C. és 4D. ábra). A SEM-képeken jól látható, hogy a vasgolyók teljesen gömb alakúak, és többségük nagyon apró, mindössze pár tíz mikrométeres.

A kovácstűz izzó faszén kupacának tetejére adagolt szegek gyorsan felhevültek, majd lejjebb süllyedve a fúvósík közelébe a vasanyag szikrázó égése (hiccelése) is elkezdődött, a tűz lángjában apró fényes, szétágazó szikrák jelentek meg. A szikrák többsége azonban nem jutott ki a tűztérből, mivel a faszén felülről folyamatosan pótolva az izzó, hiccelő szegeket faszén réteg fedte. A kovácstűz égésterében izzó, részben elégett, egymáshoz hegedt szegekből néhány alkalommal vascipesszel sikerült felülről mintát venni. Az 5A. ábrán mutatott



4. ábra. A) A fúvókán keresztül készített hegesztőüveges fénykép. B) Faszén minta vasgolyókkal (makrofotó). C) és D) SEM-képek a vasgolyókról



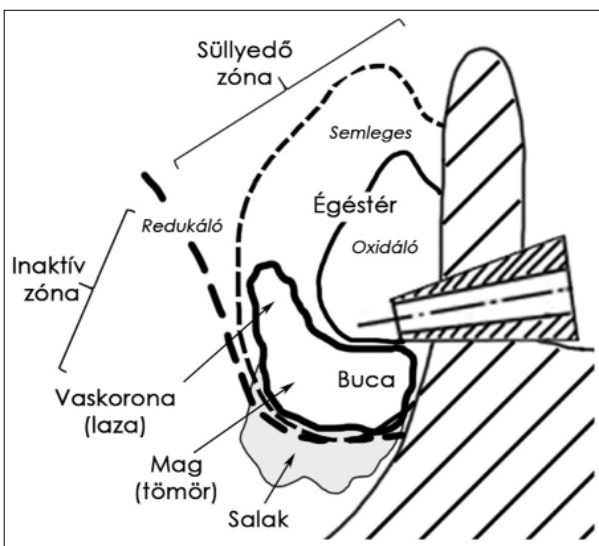
5. ábra. A) A kovácstűz fűvósíkja fölül kivett, részben elégett, összehegedt szegek. B) Szivacsos felrakódás a szegek felületén. C) Részben elsalakult szegek

mintán látható, hogy az összehegedt szegek részben elégték, hosszuk és átmérőjük csökkent, illetve szivacsos felrakódások voltak megfigyelhetők rajtuk, ezek közül egyet közlelről mutat az 5B. ábra. Ezek a szivacsos felrakódások alapvetően fémeseek, megcsiszolva ezeket fémtiszta felületet kapunk, kevés salakot tartalmaznak. Egy korábbi, az acél kovácstűzbeli elézésének metallurgiai folyamatairól szóló cikkünkben már bemutattunk hasonló szivacsos felrakódásokat S235-ös anyagminőségű, 10 mm-es négyzetvasak felületén [5]. A szegek égése során a felület frontális oxidációjával nagy mennyiségben keletkezik olvadt, vasoxidban dús salak is, amely részben feltapad a szegekre (amint pl. ahogyan az 5C. ábrán látható), részben pedig lecsöppen (a fűvókán keresztül betekintve láthatók voltak a faszén darabok között folyékony salakcseppek is).

3. Értékelés

3.1. Atmoszféraviszonyok az oldalszeles kovácstűzben

Az oldalszeles kovácstűzben a szeghegesztős kísérletek során a vasbuca kialakulásához vezető metallurgiai



6. ábra. Atmoszféraviszonyok és a vasbuca helyzete az oldalszeles kovácstűzben

folyamatok értelmezéséhez mindenekelőtt tekintsük a 6. ábrát, amely a kovácstűz atmoszféraviszonyait és a vasbuca helyzetét mutatja be. A kovácstűzben három különböző atmoszférájú térrészt különböztetünk meg. Közvetlenül a fűvóka orrpontja körül alakul ki az oxidáló atmoszférájú zóna, amelyet gyakorlati megfigyeléseink alapján úgy jellemezhetünk, hogy ebben nemcsak a faszén, hanem a vas is elég. A nagyobb kiterjedésű semleges atmoszférájú zónában a vasfázis nem ég el, de a faszén igen. Ez a két zóna alkotja a kovácstűz égésterét. Ezen kívül található a redukáló atmoszférájú zóna, amelyben már a faszén sem ég el. A redukáló atmoszférájú zónát két részre lehet osztani. Felül, elöl található a süllyedő zóna, amelyben az elegyoszlop lefelé, az égéstér irányába mozog. A redukáló zóna alsó, hátsó része pedig inaktív faszénből áll, amely nem végez mozgást.

A kovácstűzben a vasbuca a fűvóka alatt, a semleges atmoszférájú zóna alsó határán kezd el kialakulni. Az eddig lesüllyedő és elégő faszén szemcséken lévő vasgolyók és vasrögöcskék összehegedésével, növekvő vasszivacs, vasbuca jön létre, amelyhez a felülről érkező újabb faszén darabokon lévő vasgolyók, illetve a szabadon ide hulló, korábban a vasgolyók összehegedésével kialakult nagyobb vasrögök hozzáhegednek. A növekvő vasbuca alatt a faszén az ott lévő redukáló atmoszférán nem tud elégni és egyfajta ágyazatot képez, amelyen keresztül a vasbucából a salak nagyobb része lecsurog a kovácstűzhely medencéjébe, így elválva a vasbucától. A vasbuca tömör magja közvetlenül a fűvóka alatt helyezkedik el, a laza vaskorona pedig a semleges zónában, a fűvókától távolabb előtte és felette (ld. 6 ábra).

A vasbuca a 2.2. szakaszban és a 3A. ábrán bemutatott alakjából következtethetünk arra, hogy 50 l/perces levegőtérfogat-áramnál, 25mm-es fűvóka belső átmérőnél és 6–25 mm-es faszén szemcseméretnél az oxidáló atmoszférájú zóna a fűvóka orrpontjától kb. 6-7 cm-es mélységig ér el vízszintesen. A kovácstűzbe tett szegek kb. a fűvóka orrpontjától 10–12 cm-es magasságban kezdenek el égni, így hozzávetőlegesen ennyi az oxidáló zóna magassága. A semleges

atmoszférájú zóna kb. 10 cm-es mélységére szintén a vasbuca alakjából lehet következtetni. Ezek a méretek a befújt levegő térfogatáramának növekedésével, illetve nagyobb szemcseméretű, a légáramlást kevésbé fojtó faszén esetén nyilvánvalóan növekednek, így nagyobb méretű vasbuca tud kialakulni.

3.2. A szén és vas stabilitási viszonyai a kovácstűzben

A kovácstűz makroegyensúlyi helyzetének vizsgálata nem választható el a rendszer kémiai anyagát alkotó C, CO, CO₂, O₂ és Fe anyagok lokális koncentrációjának ismeretétől. Az ismereteket ki kell terjeszteni a hőmérsékletre is, a nyomás szerepét viszont nem hangsúlyozzuk, mivel általában 1 bar nyomású izobár rendszerekről van szó. Mint ahogy ezt fentebb láttuk, a rendszert képező gázfázis általános vegyi összetétele általában ismert, melyet a fúvóka irányának megfelelően felvett tengely hosszának függvényében célszerű vizsgálni a 7. ábrának megfelelően.

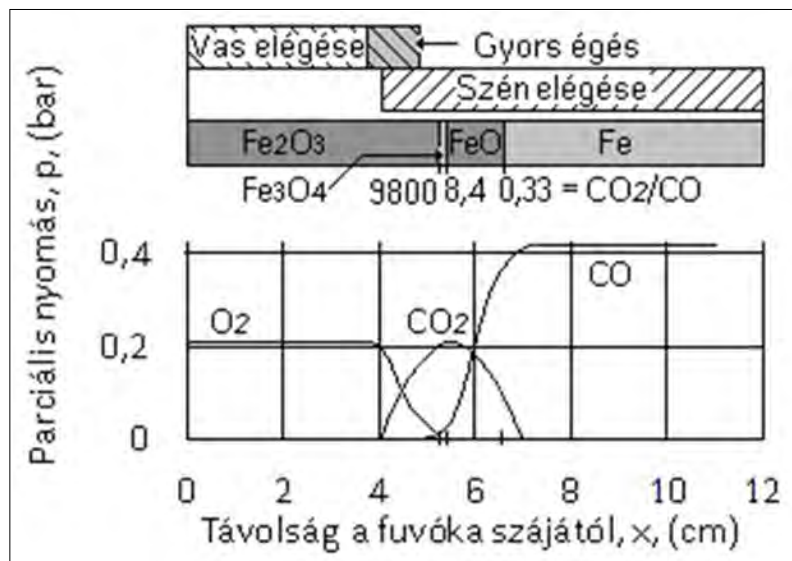
A 7. ábra egy általános koncentrációeloszlási képet mutat, a fúvókától felvett önkényes távolság függvényében. Az ábráról hiányzó hőmérsékletről azt kell tudni, hogy annak értéke egyrészt a távolság függvényében, másrészt a befújt levegő térfogatáramának függvényében változik. Az előbbi összefüggésben a hőmérséklet maximumot mutat azon a helyen, ahol a CO₂-nak is maximumértéke van, másrészt a térfogatáram növelése esetén a hőmérséklet megnő, és az égés fókuszpontját jelentő CO₂_{max}-értékek közelebb kerülnek a fúvóka szájához.

A rendszerben levő szilárd anyagok, mind a szén és a vas egyaránt adott esetben oxidálódnak, máskor (a redukáló viszonyok között) megőrzik elemi állapotukat. A két anyag égési feltételeire ugyanaz a három alapfeltétel együttes megléte szükséges: az éghető anyag, az égést biztosító közeg és az anyag gyulladási

hőmérsékletét elérő hőmérséklet. A szén vagy faszén vagy a kokszt gyulladási hőmérséklete könnyen elérhető (faszén esetében 250–280 °C). Általában ismert, hogy a fa (vagy pl. az ásványi szén) lángjelenség kíséretében ég el, amelyet a tüzelőanyagból felszabadult illóanyagok égése okoz. A faszén (és a kokszt is) az előbbieknél sokkal kevesebb illóanyagot tartalmaz, lángjelenség az átmenetileg képződő CO utánégésének köszönhető.

A kovácstűzhelyekben a vas gyulladása és égése már sokkal komplikáltabb. Kis széntartalmú szénacélok esetén az égés kisebb hőmérsékleteken egy lassú folyamattal kezdődik, melynek égésterméke a reve különböző vasoxidokból áll, melyek egyenletesen, néhány tized mm vastagságban bevonják a vastárgyat (frontális oxidáció). Az idő növekedésével az oxidáció sebessége parabolikusan, a hőmérséklet növelésével pedig exponenciálisan nő, és növekvő mértékben kiterjed a felület közeli szemcsehatárokra is (intergranuláris oxidáció). Az égés sebessége az oxigén koncentrációjával arányosan nő, eltekintve az exoterm folyamat hőmérséklet-növelő hatásától. A fehérizzás kb. 1350 °C-os hőmérsékletén indul meg a szikraképződéssel járó ún. hiccélési folyamat. A jelenség megértése szempontjából fontos tudni, hogy a reve két fő alkotója a vasoxidul (FeO) 1377 °C-on olvad, a magnetit (Fe₃O₄) pedig 1597 °C-on. A wüsztit-magnetit fázisokból álló reve a fehérizzáson megolvad, a feloxidálódott szemcsehatárokon megjelenő olvadt reve hatására a felület közeli szemcsék szikrázva kilökődnek a munkadarabból, elkezdődik a hiccélés, a munkadarab gyors, szikrázó égése.

A 7. ábrát értelmezve megállapíthatjuk, hogy a kovácstűzhelybe benyúló vastárgy lassú oxidációjának megvannak a feltételei, ugyanis a revésedés kezdeti hőmérséklete kb. 600 °C. A lassú oxidáció mindaddig tart, amíg O₂ van a rendszerben. Ebből a szempontból a CO₂ oxidáló hatása már nagyságrenddel kisebb. Az ábra szerint a vastárgy gyors oxidációja azon a helyen várható, ahol az oxigéntartalom még nagy és a hőmérséklet már eléggé nagy, vagyis valahol az O₂-CO₂ gázelegy közös területén. A fúvóka tengelye mentén a fúvóka szájnyílásától távolodva a rendszerben megjelenik először a CO₂ és utána fokozatosan a CO. A két gáz arányától függően, a Fe₃O₄, majd a FeO-, végül a Fe-fázis lesz a termodinamikailag stabil anyag. Az itt nem részletezett számítások eredményei alapján megállapítható – és ez a 7. ábrán is megfigyelhető –, hogy 1200 °C-on a színvas stabilizálásához



7. ábra. A fúvóka előtti tér gázainak koncentrációs viszonyai

0,33-nál kisebb CO_2/CO arány szükséges, a wüsztitéhez 8,4, a magnetitéhez pedig 9800, ami egyébként megfelel a közismert Fe-O-C rendszer 1200 °C-os hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi vonalairól leolvasható 25% CO_2 – 75% CO , 89,4% CO_2 – 10,6% CO , valamint 99,888 CO_2 – 0,012% CO értékeknek [6].

3.3. A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai az oldalszeles kovácstűzben

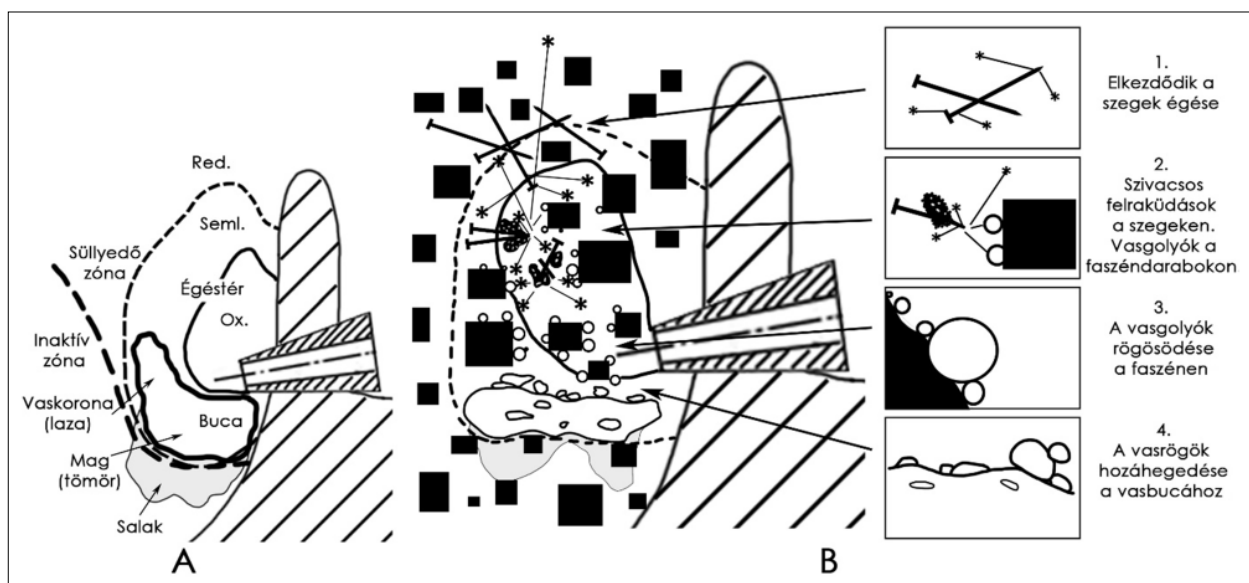
A metallurgiai folyamatok értelmezéséhez, azaz a vasbuca szegekből történő kialakulásának megértéséhez tekintünk a 8. ábrát, amely a kovácstűzbe beadott szegek útját mutatja a vasbuca kialakulásáig. Az izzó faszén kupac tetejére rakott vékony szegek hevülni kezdenek, majd lejjebb süllyedve, beérve az oxidáló atmoszférájú zónába, égni kezdenek (ezt mutatja a 7. ábra 1. kis képe). Az égő szegek szikrákat vetnek ki, hiccelnek. A szikrák valójában kilövellő vasszemcsékből állnak, amelyek valamennyi olvadt, nagy vasoxidtartalmú salakot is tartalmaznak (részletesen ld. [5]).

A szegekből kilépő szikrák útja három féle lehet (ld. a 8. ábra 2. kis képe). Kirepülhetnek a kovácstűzből, és égésük során teljesen salakká válnak. Ilyenkor magnetitgolyócskák keletkeznek belőlük, ilyeneket mutattunk be egy korábbi cikkünkben [4]. A másik lehetőség, hogy rövid időre felrakódnak magukra a szegekre (azok kisebb hőmérsékletű és/vagy kevésbé oxidáló atmoszférán lévő részére), ilyenkor alakulnak ki a korábban tárgyalt szivacsos, fémes-salacos felrakódások (ld. pl. az 5B. ábrán), amelyek végül újra hiccelve elégnek (esetleg a nagyobb méretűek, kisebb fajlagos felületüknel fogva megúszhatják a teljes újra elégést, és egyfajta tixomoldingként lecsöppenhetnek a vasbucára). A harmadik lehetőség, hogy a szikrák

a faszén darabok felületére tapadnak fel. Ilyenkor a szikrákban lévő vasszemcsék égése folytán zajló salakká válás leáll, azok a faszén felületén felpadva haladnak tovább lefelé. Tulajdonképpen tehát a szegek elégésével keletkező szikrák végül szinte mind a faszén darabok felületén gyűlnek össze, és csak elenyésző részük jut ki a kovácstűzből. (Erre utal az, hogy a beadott szegek össztömegénél nemhogy kisebb, de valamennyivel nagyobb tömegű vasbucák keletkeztek).

Itt kell megjegyezni, hogy a vasszemcsék égése a kovácstűzben nyilvánvalóan nem jár teljes elsalakkalással, tehát a vasszemcsék nem ég el teljes mennyiségében vasoxiddá, ugyanis a kísérletek során mindig kaptunk jobb-rosszabb vaskihozattal vasbucát. Azonban a nagy fajlagos felületű szegek teljes térfogatukban szikrákká égnék el (elhiccelnek). Erre utal az, hogy a vasbucákban szegeket, szegdarabokat csak a vaskorona legfelső, leghátsó részén lehetett néha látni, ahol az atmoszféra- és a hőmérsékleti viszonyok nem kedveztek a szegek teljes elégésének. (Érdekes lenne a kísérletet elvégezni kisebb fajlagos felületű vasdarabokkal is, amelyek nem hiccelnének el teljes térfogatukban). A szegek elégése során nemcsak szikrák lökődnek ki, hanem a felületük frontális oxidációja révén sok folyékony, vasoxidban dús salak is keletkezik (ilyen jórészt elsalakult szegek láthatók az 5C. ábrán). Ez a salak nagy hőmérsékleten körbe folyja a felületet, majd elválik attól, és a faszén darabok között lefelé csöpög. Megfigyeléseink alapján feltételezzük, hogy ennek az olvadt, vasoxidban dús salaknak a színvassá történő visszaredukálódására sem a faszén felületén, sem pedig az atmoszféra által (sem direkt, sem indirekt módon) sincs nagy volumenben lehetőség.

A faszén felületére került vasanyag, a vasgolyócskák tehát mintegy „megmenekülnek” a teljes salakká



8. ábra. A szeghegesztős kísérlet főbb metallurgiai folyamatai

válástól (ezt mutatja a 7. ábra 3. kis képe), sőt a faszén felületére jutott szikrák vasoxidtartalma visszaredukálódik színvassá (erről a folyamatról részletesebben a 3.2. szakaszban szóltunk). Ezekből a kis vasgolyócskákból tud összeállni maga a vasbuca. Ahogyan a faszén ég, csökken a felülete, a rajta lévő vasgolyók egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Így a faszén felületén a vasgolyók egyesülnek, növekszenek, rögződnek. Ha egy vasrög kellően nagyra nő, a súlyánál fogva elválik a faszéntől és leesik (erre látunk több példát ennek a videónak az első másodperceiben: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>) és hozzáheged a vasbuca felületéhez, mégpedig abban a 3A. ábrán bemutatott kráterben, amelyet a hegedést elősegítő olvadt salakfilm borít. A faszén darabok teljes elégése folytán végül minden vasgolyó a növekvő vasbucához heged, ezt szemlélteti a 7. ábra 4. kis képe.

A vasbuca magja és koronája között mutatkozó jelentős sűrűségkülönbség oka mindezek alapján feltételezhetően a következő. A fúvóka közelében, az oxidáló atmoszférában a faszén szemcsék felületén lévő vasgolyók égésük folytán folyékony halmazállapotban hegednek hozzá a szilárd halmazállapotú, növekvő bucamaghoz, amely így sokkal tömörebb lesz (a felrakó hegesztés technológiájával lenne itt párhuzam vonható). Viszont a fúvóka orrpontjától távolabb, a semleges atmoszférájú térrészbe süllyedő

vasgolyók nem égnék (de az atmoszféraviszonyoknak megfelelően nem is szenülnek), és szilárd halmazállapotban diffúziós hegedéssel hegednek össze, így építve fel a sokkal lazább vaskoronát. A sűrűségkülönbség másik oka az lehet, hogy az oxidáló zónában a vasfázis részben elsalakul, így a buca magjába több salak kerül, ami segíti a vasgolyócskák, rögöcskék összehegedését.

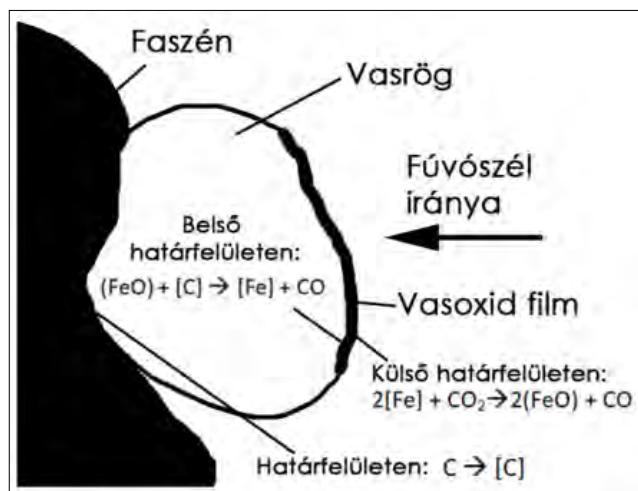
3.4. Metallurgiai folyamatok a vasgolyócskák, a faszén és az atmoszféra között

Az eddig elmondottak és a megfigyeléseink alapján úgy véljük, hogy a vasbuca kialakulásában kulcs szerepe van a faszén felületén megfigyelt kis vasgolyócskáknak. Metallurgiai szempontból fontos kérdés, hogy ezek szilárd vagy folyékony halmazállapotúak-e. A folyékony halmazállapotra utal egyrészt a tökéletes gömb alakjuk, másrészt a hegesztőüvegen át látott színhőmérsékletük (ld. 4. ábra). Rövid számítással is igazoljuk feltevésünk helytállóságát, amivel bemutatjuk, hogy az egységnyi tömegű vas oxidációja révén felszabadult hőmennyiség többszöröse az ugyanolyan tömegű vasnak pl. az 1200 °C-os aktuális hőmérsékletről az olvadáspontig, és onnan az 1600 °C-ra való felhevítéséhez szükséges hőnek. Ez a q arány a következő:

$$q = \frac{\Delta H_k}{c_{p, sz} (1536 - 1200) + \Delta H_{olv} + c_{p, olv} (1600 - 1536)}, \quad (1)$$

ahol ΔH_k és ΔH_{olv} a FeO moláris képződéshője, ill. olvadáshője, $c_{p, sz}$ és $c_{p, olv}$ a szilárd és az olvadt vas moláris fajhője.

$$q = \frac{264850 \text{ J/mol}}{35,2(1536 - 1200) + 13580 + 46,6(1600 - 1536) \text{ J/mol}} = 9,2. \quad (2)$$



9. ábra. A faszén felületén lévő vasgolyókhöz köthető metallurgiai folyamatok

1 mol vagy 1 kg vas oxidációja során képződő hőmennyiség tehát kb. 9-szer több, mint ami az 1200 °C-ra előmelegített vas megolvasztásához szükséges. Amennyiben a számítást a 0 °C kiinduló állapotból számítva megismételjük, a többelhőmennyiség relatív értéke 3,2. Természetesen némi magnetit megjelenése módosítja az eredményeket.

Tehát bár a kovácstűzhelyben kialakuló vasbuca szilárd halmazállapotú, a hozzáhegedő vasgolyók folyékonyak és a hegedést megelőzően néhány tíz másodpercet, de akár percekig is eltöltenek folyékony halmazállapotban. Feltételezzük, hogy a folyékony halmazállapotot a faszén szemcsék között áramló oxidáló atmoszférában a vasfázis erősen exoterm égésével termelődő hő tartja fent, a vasfázis égésével keletkező szintén folyékony vasoxid viszont folyamatosan vissza is redukálódik színvas-

sá, a redukciót pedig a folyékony vasfázis faszénből felvett széntartalma teszi lehetővé. Ezt szemlélteti a 9. ábra. (A vasfázis szénttartalmának a vasoxidban dús salakra gyakorolt redukáló hatása figyelhető meg ebben a videóban: <https://youtu.be/WGvC8uxPCow>, a videó elején egy salakcsepp elválk és lecseppen az égő munkadarab felületéről, a videó második felében viszont a következő salakcsepp „visszaszívódik” a szivacsos felrakódásra.)

A felvázolt metallurgiai folyamatok alapján azt is feltételezhetjük, hogy a vasgolyócskák széntartalma nagyon alacsony (semmiképpen sem nyersvas cseppecskékről, hanem acélcseppecskékről van szó), mert a szabad, faszénnel nem érintkező felületüket vasoxid borítja, amely folyamatosan dekarbonizál. Ha egy vasgolyócska szabad felülete kevésbé oxidál, esetleg redukáló atmoszférába kerül, akkor természetesen megindul a cementálódása, azonban ilyenkor az égés megszűnésével feltételezhetően a vasgolyócska halmazállapota szilárd lesz. (Amikor például a 4B. ábrán bemutatott minták vételezése miatt a levegőbefűvást pár másodpercre szüneteltetni kellett, megfigyelhető volt, hogy az addigi színhőmérsékleti különbség a faszén és a vasgolyók között megszűnik, és a vasgolyók a faszénnel azonos hőmérsékletűvé válnak, és feltételezhetően meg is szilárdulnak.) Mivel a kovácstűz égésterében meglehetősen sztochasztikus viszonyok között süllyednek a faszén felületére felapadt vasgolyócskák (pl. bizonyára vannak olyanok is, amelyek kevésbé oxidáló atmoszférában, pl. „fűvószélárnyékban” haladnak), ezért már a vasbucához hegedés előtt különböző szénttartalmúakká válnak. (Magában a növekvő vasbucában is végbemehetnek dekarbonizációs-cementációs folyamatok, de ezeknek a kis fajlagos felület már nem kedvez.) Alapvetően ezzel magyarázható a vasbucában a heterogén széneloszlás, amelyet a 3C. ábra mutat.

4. Összegzés, következtetések

A szeghegesztős kísérletek legfontosabb eredménye a vasbuca kialakulásának mechanizmusával kapcsolatosak:

- A vasbuca kovácstűzbeli elhelyezkedésére jellemző, hogy a fűvóka alatti semleges atmoszférájú zóna alsó részén az el nem égő faszén ágyon ül fel. A vasbuca szerkezetére jellemző, hogy a fűvóka alatti mag része tömör, a fűvókától a vízszintes síkban körkörösén távolabb első és a magasabban lévő vaskorona része viszont laza szerkezetű. Közvetlenül a fűvóka orrpontja előtt-alatt a vasbucának van

egy nagyjából sík, kráteres felülete, amelyet az oxidáló atmoszférájú zóna alsó része határol.

- A kovácstűzbe adagolt szegek teljes térfogatukban elhiccelnek: részben elsalakulnak, részben pedig fémes vasat tartalmazó szikrák lövellnek ki belőlük.
- A szegek égésekor kilövellő szikrák a faszén felületén összegyűlnek, szabályos gömb alakú vasgolyókat alkotnak, a faszén elégésével csökkenő felület miatt egymáshoz közeledve rögzödni kezdenek, majd egy bizonyos méretet elérve a szilárd vasbucára esnek, és ahhoz hozzáhegednek.
- Színhőmérsékletük és tökéletes gömb alakjuk miatt feltételezzük, hogy a faszén felületén megfigyelt vasgolyók folyékony halmazállapotúak.
- A kísérletek során a technológiai paraméterektől függően kb. 35–45%-os vaskihozatal volt elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Pleiner R. (2006): Iron in Archaeology – Early European Blacksmiths. Praha, AU AVČR
- [2] Gömöri J. (2000): Az Avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában. Kiadja a Soproni Múzeum Régészeti Gyűjteménye és az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága, Sopron.
- [3] Török B., Barkóczy P., Kovács Á., Költő L., Fehér A., Szőke B. M. (2018): Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata. BKL – Kohászat, 151(3), 1–3.
- [4] Thiele Á., Török B. (2022): A possible medieval recycling technique – smelting iron using hammerscale. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1246, 012008.
- [5] Thiele Á., Hári L., Magyar D. (2020): Az acél kovácstűzbeli elégésének metallurgiai háttere – damasz-kolt anyagokon kialakuló felületi hibák magyarázata. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 153(5), 4–9.
- [6] Óvári A. (1985): Vaskohászati kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 83

Szerzői életrajzok

ADORJÁN ERIK 2019-ben szerzett földmérő és földrendező-mérnök diplomát az Óbudai Egyetemen. 2022-től a Colas Északkeleti Kft.-nél földmérő mérnök.

BURÓ BEÁTA okleveles kohómérnök, doktoranduszhallgató, jelenleg tanácsadóként/elemezőként dolgozik műszaki tanácsadási szolgáltatások témakörében a vas- és színesfémiparban projektek pénzügyi elemzésére specializálódva.

BOGOLY LEVENTE anyagmérnökként végzett BSc-képzésben a Miskolci Egyetemen (oklevelét a Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft.-nél duális képzésben szerezte), jelenleg kohómérnök MSc-hallgató (Fémalk Zrt., duális képzés). Eredményei: 2021 – Ezüst Lanzetta Díj, 2021 – Kari TDK 2. helyezés, 2023 – OTDK 1. helyezés, 2023 – Kari TDK 1. helyezés.

DR. FEGYVERNEKI GYÖRGY termék- és folyamatmérnökségi osztályvezető, a diplomamunkáját egy nemzetközi multinacionális cég az akkori nevén VAW Alumíniumtechnika Kft. alumínium-hengerfej öntődéjében készítette. 2001 nyarán kiváló eredménnyel államvizsgázott és védte meg a diplomáját. A diplomamunka eredménye alapján a végzést követően állást is kapott a győri hengerfejöntődében, ahol azóta is dolgozik. 2007. június 6-án az MTA Miskolci Akadémiai Bizottság székházában védte meg PhD-értekezését cum laude minősítéssel. 2018-ban az OMBKE Öntészeti Szakosztály elnökévé választották. A 2009–2010. tanévtől a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán az MSc kohómérnök szak, öntészet szakirány fémöntészet tantárgyát oktatja. 2010. júniusában a Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, címzetes egyetemi docensévé választották. 2012. januárjától a Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft. Termék- és Folyamatmérnökségének vezetője. 2015-ben a Műszaki Anyagtudományi Kar Öntészeti Intézetével együttműködésben létrehozta a Könnyűfém Öntészeti Kihelyezett Nemak Tanszéket, melynek a vezetését azóta is ellátja. E kihelyezett tanszék keretében történik a BSc- és MSc-hallgatók nyári gyakorlatának támogatása, szakdolgozatok, TDK-dolgozatok konzultációja, PhD-hallgatók konzultációja, doktori felkészülésük kutatási részének szakmai támogatása és a felsőfokú duális képzés támogatása. 2023. szeptember óta a Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karán negyedállású egyetemi docensként dolgozik. Szakmai munkássága főként az alumíniumötvözet-olvadékok metallurgiai tulajdonságainak vizsgálatára, a vas- és titántartalmú intermetallikus vegyületfázisok hatásának kutatására irányul. A Kihelyezett Tanszék keretén belül irányításával végzik a homokmaggyártás, hőkezelés, metallurgiai tulajdonságok és hőkezelés témakörökben a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karával évente meghatározásra kerülő feladatokat.

FINTA ERVIN A Széchenyi István Egyetemen 2023-ban szerzett gépészmérnöki oklevelet kiváló minősítéssel. 2020-ban és 2021-ben Nemzeti Felsőoktatási Ösztöndíjat nyert el, 2023-ban OTDK- dolgozatával különdíjas lett. Jelenleg az Alkalmazott Mechanika Tanszék tanszéki mérnöke.

GYARMATI GÁBOR okleveles kohómérnök, jelenleg a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetében tanársegéd. Fő kutatási területe az alumíniumötvözet-olvadékok tisztítása és minősítése, valamint öntéstechnológiája.

DR. HÁRI LÁSZLÓ 1974-ben metallurgus üzemmérnöki, 1979-ben kohómérnöki oklevelet szerzett, PhD tudományos fokozatát 1989-ben védte meg. Munkahelye 33 évig a Dunaújvárosi Főiskola és 11 évig a Dunaferri volt. Előbbi munkahelyén fizikai kémia, nyersvasgyártás és acélgártás tárgyakat oktatott, a Dunaferriben műszaki fejlesztéssel és környezetvédelemmel foglalkozott. Jelenleg nyugdíjas. Kutatási területe a fizikai kémia kohászati alkalmazásai, elegy- és betétszámítások, hulladékok felhasználási területeinek vizsgálata.

KESZTHELYI ÁDÁM 2020-ban mérnökinformatikusként diplomázott a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Karán. 2023-tól a DATelite Kft. adatmérnöke és informatikai szakértője.

KERTÉSZ BOTOND 2001-ben szerzett földtudományi mérnök-, majd 2002-ben okleveles geográfusdiplomát a Miskolci Egyetemen. 2008-ban védte meg PhD-értekezését. Természet-, környezetvédelmi és földtani szakértő, valamint bányamérnöki tervező. 2007-től a Colas Bányászati Kft. munkatársa, 2014-től bányászati és értékesítési igazgatója, környezetvédelmi megbízott.

KOVÁCS DÁNIEL MÁRTON geográfusként diplomázott a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi és Földtudományi Intézetében. Jelenleg az Intézet tanársegédje és a PTE Földtudományok Doktori Iskola doktorandusz-hallgatója. Kutatási területe az előregedő infrastruktúra interferometrikus vizsgálata.

KOVÁCS ISTVÁN PÉTER 2006-ban geográfusként diplomázott a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetében. Itt védte meg 2011-ben PhD-értekezését. 2009 és 2023 között a Földrajzi és Földtudományi Intézet oktatója és kutatója. A DATelite Kft. interferomertriaszakértője.

MENDE TAMÁS 2005-ben végzett a Miskolci Egyetemen öntész szakirányú kohómérnök-ként, tanulmányi és tudományos eredményeiért az OTDT, az MTA és az Oktatási Minisztérium Pro Scientia Aranyérem kitüntetésben részesítette. 2010-ben PhD-fokozatot szerzett. Végzése óta az egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karán dolgozik, 5 évig volt a kar tanulmányi és beiskolázási dékánhelyettese, jelenleg egyetemi docens beosztásban a Fémtechnológiai és Nanotechnológiai Intézet intézetigazgató helyettese. Kutatási területe: egyensúlyi fázisdiagramok, fémten, öntészet.

ORBÁN ZOLTÁN 1994-ben okleveles építőmérnök-ként szerzett diplomát a Budapesti Műszaki Egyetemen. 2010-ben PhD-fokozatot szerzett, majd 2015-ben habilitált. Jelenleg a Pécsi Tudományegyetem Mérnöki és Smart Technológiák Intézetének professzora és vezetője. Fő kutatási területei közé tartozik a vasbeton és falazott szerkezetek károsodási folyamatainak elemzése, állapotvizsgálata roncsolásmentes diagnosztikai módszerek alkalmazásával.

RONCZYK LEVENTE műholdradar-szakértő, 2010-ben szerzett földtudományi doktori fokozatot, földrajz szakos középiskolai tanárként. Azóta több műholdradar-alkalmazást fejlesztettek, fejlesztenek az Európai Űrügynökségnek vagy más felhasználóknak a Pécsi Tudományegyetem spin-off cégeként, a DATelite Kft. közreműködésével.

DR. THIELE ÁDÁM 2010-ben okleveles gépészmérnök-ként végzett, majd 2015-ben PhD-fokozatot szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karán. Jelenleg egyetemi adjunktusként az Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársa, kutatási területe az archeometallurgia. 2004 óta egyéni vállalkozóként kovácsol.

MOHAMED BADAWI PhD-hallgató, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

LESKÓNÉ MAJOROS LÍVIA PhD-hallgató, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

EVANE CÉSAR JOÃO DA CUÑHA PhD-hallgató, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

ELYAS HADDAD MSc-hallgató, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

AHMAD SAIFO MSc-hallgató, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

SAMUEL AYIPA ARTHUR MSc-hallgató, TIMREX Course, Miskolci Egyetem

RAYHAN ALDIZAN FARRENZO MSc-hallgató, TIMREX Course, Miskolci Egyetem

FÖLDESSY JÁNOS professzor emeritus, TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem



XII. Bányász-Kohász-Erdész Találkozó

MISKOLC, 2024. június 28-30.



Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület, az Országos Erdészeti Egyesülettel, Miskolc Megyei jogú Város Önkormányzatával és a Miskolci Egyetemmel közösen Országos Bányász – Kohász – Erdész Találkozót szervez Miskolcon, 2024. június 28-30. között.

Immáron huszadik esztendeje, hogy e három selmeci gyökerű szakma és képzés képviselői a „Hazaszeretet, Szakmaszeretet, Barátság!” hármas jelszó szellemében Miskolcon összejöttek. Azóta és azt megelőzően már több város adott otthont ennek a nagy hagyományokkal rendelkező rendezvénynek pl.: Sopron, Székesfehérvár, Pécs, Telkibánya, Eger és legutóbb Tatabánya. Nagyon reméljük, hogy minél többen eljönnek Alma Materünk városába, azért, hogy jó kedvvel, szeretetben és barátságban néhány napot eltöltsünk együtt.

ÜDV' AZ ERDÉSZNEK!

LEGYEN FÉNYES SIKERE A KOHÁSZNAK!

JÓ SZERENCSÉT!

PROGRAMAJÁNLÓ

2024. június 28., péntek

Ásványbörzén csodálhatjuk FÖLDÜNK kincseit

A Herman Ottó Múzeumot látogathatjuk tárlatvezetéssel

A Miskolci Egyetem Zeneművészeti Kara rézfúvósai búvölnek el minket

Miskolci Néptánc együttes előadásában gyönyörködhetünk

Perecesi Bányász Fúvószenekar juttatja el füleinkbe az ismerős dallamokat

Balogh Zoltán és Cigányzenekara húzza el kedvenc nótáinkat

Erdész kürtösök hozzák el nekünk az erdő hangjait

Nedvesesten intonálhatjuk a szép emlékeinket felidézõ, legszebb nótáinkat

Este, baráti zenés találkozón, az egri Rekord zenekar adja a talpalávalót

További részletesebb információk késõbb! A programváltozás jogát fenntartjuk!

Az OMBKE – Borsodi Helyi Szervezet néven követhetsz oldalakat facebookon és Instagramon

ombke@ombkenet.hu

ombke.borsod@gmail.com



XII. Bányász-Kohász-Erdész Találkozó

MISKOLC, 2024. június 28-30.



Szállás egyénileg foglalható a Miskolci Egyetem kollégiumaiban, Miskolcon a City Hotelben, Miskolctapolcán a Lignum Hotelben és a Flóra Panzióban, illetve igény szerinti szállást kínáló weboldalakról.

2024. június 29., szombat

Továbbra is láthatjuk a FÖLD kincseit és a múzeumot, valamint izlelhetjük a bükkí hegyoldalak terméséből készült borokat, hallhatjuk a Bányász Fúvószenekarok ismerős dallamait

Kiutazhatunk különjáratral (busszal és kisvasúttal) a Újmassára az Őskohóhoz

Kihasználhatjuk Miskolctapolca fürdőváros adta lehetőségeit péntektől vasárnapig

Ültethetünk emlékfát a Népkerben

Miskolc utcáin a díszfelvonulás közben intonálhatjuk nótáskönyveink legszebb nótáit

Gyönyörködhetünk a Miskolci Mazsorették műsorában

Élvezhetjük az Unicum Habeas bányász rockzenekar koncertjét

Báli nyitótáncon, a miskolci táncgyűttes kápráztat el minket

A Bányász-Erdész-Kohász Bálon a Fantasy Band zenekara biztosítja a zenét a jó hangulathoz

24. június 30., vasárnap

A Miskolci Egyetemen konferencia-előadásokon elmélkedhetünk a bányászat, a kohászat, és az erdészet fenntartható fejlődéséről

Látogathatjuk a Miskolci Egyetem kutatóhelyeit, műhelycsarnokait, tanbányáját és reményeink szerint, újra avathatjuk az OMBKE, valamint az Akadémisták Lélekarangja emlékműveket az Egyetem területén

Tárlatvezetésen nézhetjük meg a múzeumot

Kihasználhatjuk Miskolctapolca, a fürdőváros adta lehetőségeit

A menetrend szerinti Kisvonattal kiutazhatunk a BÜKKBE

Fővédnökök

Veres Pál, Miskolc MJV polgármestere

Prof. dr. Horváth Zita, a Miskolci Egyetem rektora

Kiss László, az Országos Erdészeti Egyesület elnöke

Dr. Hatala Pál, az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület elnöke

SOK SZERETETTEL VÁRUNK MINDENKIT!

üdvözlettel, a szervezők

További részletesebb információk később! A programváltozás jogát fenntartjuk!

Az OMBKE – Borsodi Helyi Szervezet néven követhetsz oldalakat facebookon és Instagramon

ombke@ombkenet.hu

ombke.borsod@gmail.com

Felhívás

Rubin-, Vas-, Gyémánt- és Aranyoklevél átadására

A Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Kara

felhívást intéz az Alma Mater egykori hallgatóihoz, akik 1954-ben, 1959-ben, 1964-ben, illetve 1974-ben (70, 65, 60, 50 éve) vették át diplomájukat

a Kohómérnöki Karon Miskolcon, vagy Sopronban.

Várjuk jelentkezésüket, hogy részükre, jogosultságuk alapján, a rubin-, a vas-, a gyémánt-, vagy aranyoklevél kiállítása érdekében szükséges intézkedéseket meg tudjuk kezdeni.

JELENTKEZÉSI HATÁRIDŐ: 2024. ÁPRILIS 15.

A jelentkezéshez szükséges dokumentumok:

- kérelem nyomtatvány hiánytalanul kitöltve
- oklevél fénymásolata
- rövid szakmai önéletrajz (maximum egy A/4 oldal egyes szám harmadik személyben fogalmazva)
- egy darab igazolványkép.

Letölthető dokumentumok:

1. Felhívás
2. Kérelemminta (Word formátum)
3. Kérelemminta (PDF formátum)

Kérjük, hogy a dokumentumokat lehetőleg *elektronikus formában*, az írott szöveget formázatlan Word dokumentumként, a fényképet önálló fájlként szíveskedjenek megküldeni.

A Díszoklevélosztó Ünnepségg várható időpontja: 2024. június 21. (péntek)

JÓ SZERENCSEÁT!

HÍRLEVÉL

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) azzal a céllal indította el a *Hírlevélét*, hogy gyorsan és frissen reagáljon a tagságát érintő eseményekre. Adjon hírt, hétről hétre a bányász-kohász társadalom életét érintő történésekről. Prezentálja a jövő eseményeinek meghívóját, felhívja a figyelmet olyan műszaki, tudományos fejleményekre, esetekre, megoldásokra, amelyek feltehetően érdeklik a két szakma képviselőit. Számoljon be a tagsághoz közel álló cégek, vállalatok különleges, közérdeklődésre számot tartó fejlesztéseiről, az ott zajló, tagsággal összefüggő rendezvényekről.

A *Hírlevél* pontosan értesít az OMBKE szervezeti életéről. Tudósít a szakosztályok életéről, rendezvényeiről, kezdeményezéseiről. Hírt ad az Elnökség, illetve a Küldöttgyűlés munkájáról, a megválasztott bizottságok döntéseiről az Egyesületünk gazdálkodásáról, évenkénti céljairól, azok megvalósításának módjáról.

Fontos funkciója a *Hírlevélnek*, hogy népszerűsítse az OMBKE eseményeit. Egyrészt invitáljon azokra, másrészt beszámoljon a lezajlott konferenciákról, találkozókról, megemlékezésekről.

A *Hírlevél* további feladata, hogy éltesse az OMBKE hagyományait. Felhívja a figyelmet a nagy elődök életére, munkásságára, s helyt adjon azoknak a búcsúszavaknak, amelyek a tagságunk köréből, földi létükből eltávozottakról szólnak. Feladata, hogy beszámoljon az ifjú tagjaink kezdeményezéseiről, a selmeci diák-hagyományok éltetéséről, s vigye tovább azt az örökséget, amelyet Péch Antal és az Egyesület valamikori tagjai másfél évszázaddal ezelőtt ránk hagyományoztak.

Mit nyújt Önnek hétről hétre a *Hírlevél*?

- Tájékoztat
- Emlékeztet
- Meghívót nyújt át
- Hagyományt őriz

* * * * *

NEWSLETTER

The Hungarian National Mining and Metallurgical Association (OMBKE) has launched its *Newsletter* with the aim of reacting quickly and freshly to events that affect its members. It informs week by week about the events affecting the life of the Mining and Metallurgical Society. It presents the invitation to future events, draws attention to technical and scientific developments, cases and solutions that are likely to be of interest to the representatives of the two professions. It reports on the special developments of companies close to the members and of public interest, as well as on the member-related events held there.

The *Newsletter* provides accurate information about the organizational life of OMBKE. It reports on the life, events and initiatives of the departments. It informs about the work of the Board of Directors and the Assembly of Delegates, about the decisions of the elected committees for the management of our association, about its annual goals and how to achieve them.

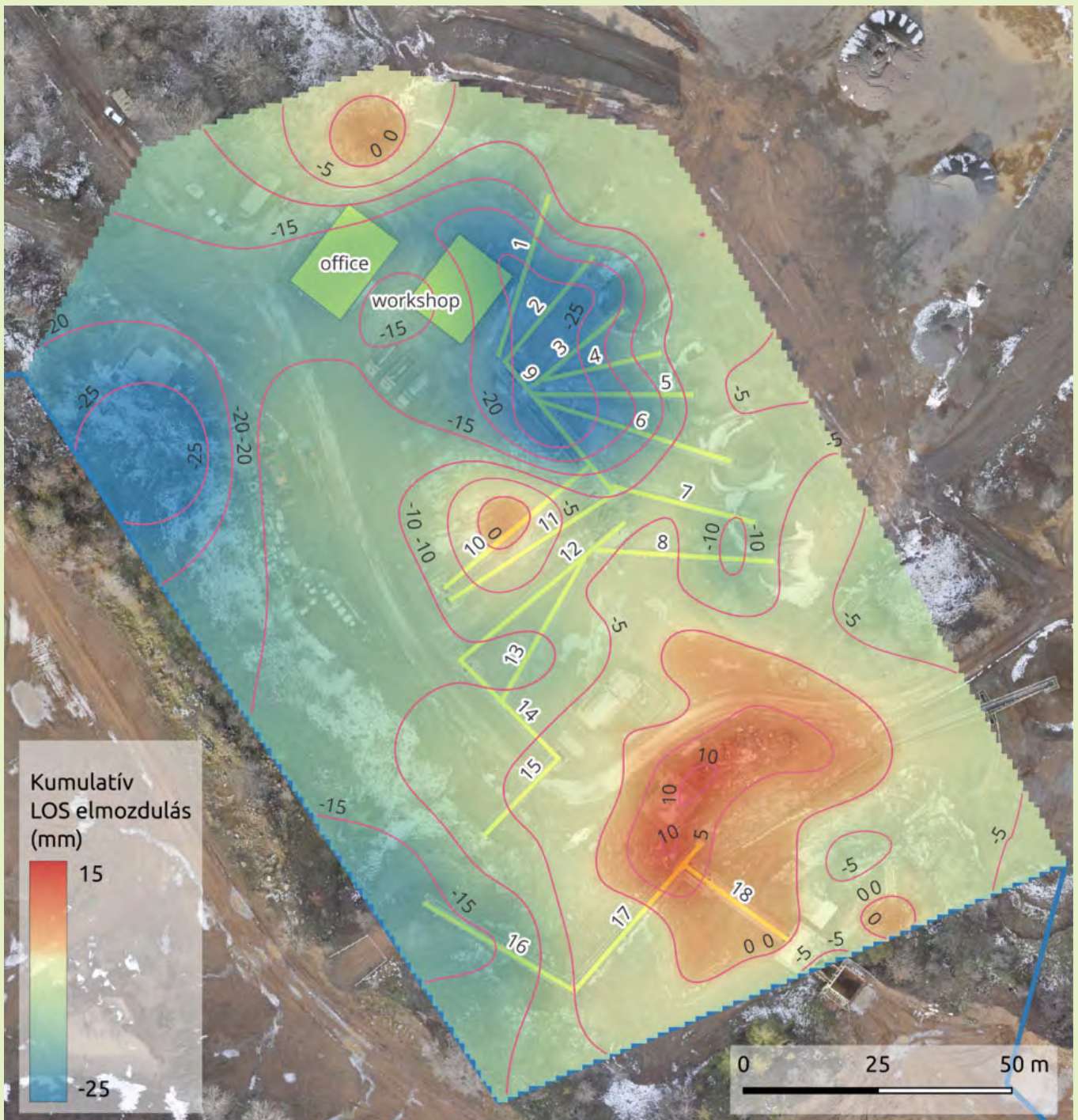
An important function of the *Newsletter* is to promote OMBKE events. On the one hand, to invite you to them, and on the other hand, to report on the conferences, meetings, and commemorations that have taken place.

Another task of the *Newsletter* is to keep the traditions of OMBKE alive. It draws attention to the lives and work of our great predecessors and honors the words of farewell spoken by those who have taken leave of our membership and their earthly existence. His task is to report on the initiatives of our young members, on the life of the student traditions in Selmec and on the continuation of the legacy that Antal Péch and former members of the Association left us a century and a half ago.

What does the *Newsletter* offer you week by week?

- Informs
- Remembers
- Invites
- Keeps the tradition alive

A műholdradar-interferometria alkalmazása a bányászatban



A recski bányüzem technológiai telephelyének kumulatív látóirányú elmozdulása
(Lásd Kovács István Péter és mtsai cikkét a 12. oldalon)