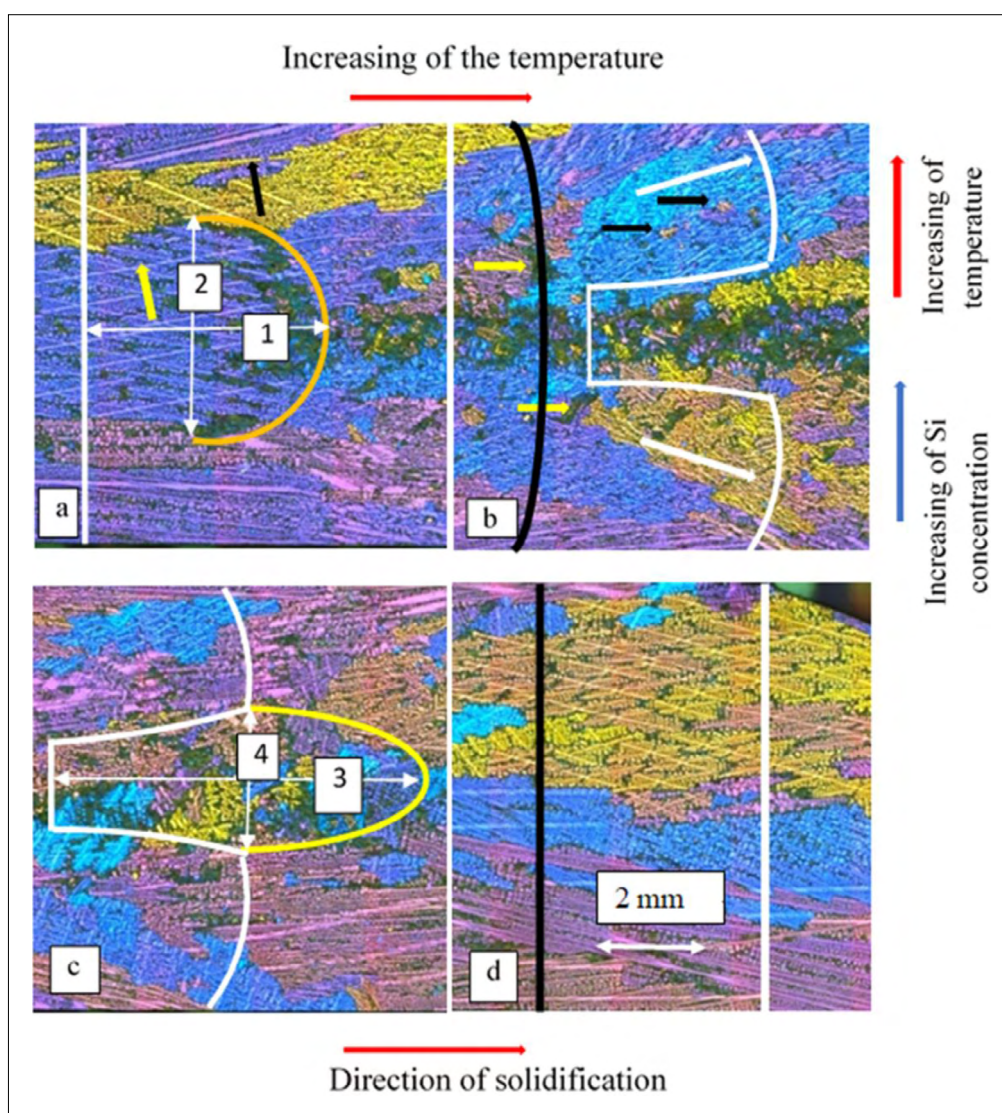


Forgó mágneses mező (RMF) által indukált olvadékáramlás hatása egyirányúan kristályosodott Al-7wt.% Si-ötvözet mezo- és mikro-szerkezetére – Benchmark-kísérlet mágneses keveréssel

Veres Zsolt, Roósz András, Rónaföldi Arnold, Sycheva Anna, Svéda Mária



FROM THE CONTENTS

CSENGE NAGY, ZOLTÁN TASZNER, OSZKÁR GREGA: The impact of the European Union's climate policy on the EU steel industry ... 2

ZSOLT VERES, ANDRÁS ROÓSZ, ARNOLD RÓNAFÖLDI, SYCHEVA ANNA, MÁRIA SVÉDA: The effect of melt flow induced by RMF on the meso- and micro-structure of unidirectionally solidified Al-7wt.% Si alloy – Benchmark experiment under magnetic stirring ... 11

CSILLA BALASSA, CSILLA PATAKY, CSABA TÁTRAI, KRISZTIÁN ANTAL, IVÁN GYENES, SÁNDOR SZAKÁLL, JÁNOS FÖLDESSY: Critical Raw Materials Hungary Data Collection: Rare earth elements indications in Hungary ... 27

ISTVÁN HAVASI: Dr. Tárczy-Hornoch Antal was born 125 years ago. Commemoration about the former, highly respected professor of the Department of Geodesy and Mine Surveying in Sopron ... 38

ISTVÁN OMASZTA: On the physical processes of rock cleavage ... 46

Posters in BKL – From the 2024 crop of the MFK Faculty and the TEKH College

CSILLA BALASSA, KRISTÁLY FERENC, NÉMETH NORBERT: HFSE enrichment in the Bükk Mts., NE-Hungary – Geochemistry and mineral composition ... 54

Támogatóink



Magyar Tudományos Akadémia



FémAlk Zrt.



ACUFER Kft.



Magyar Villamos Művek



OMYA Hungária Kft.



Ózdi Acélművek Kft.



MOL Magyarország

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, Hízlaló tér 1.
Telefon/Fax: 1-201-7337
www.ombke.hu

A kiadásért felel:

Dr. Szombatfalvy Anna,
Jármai Gábor

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

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

HU ISSN 3057-9899 (Online)

TARTALOM

NAGY CSENGE, TASZNER ZOLTÁN, GREGA OSZKÁR:

Az Európai Unió klímapolitikájának hatása az EU acéliparára . . . 2

VERES ZSOLT, ROÓSZ ANDRÁS, RÓNAFÖLDI ARNOLD, SYCHEVA ANNA, SVÉDA MÁRIA:

Forgó mágneses mező (RMF) által indukált olvadákáramlás hatása
egyirányúan kristályosodott Al–7wt.% Si-ötvözet mezo- és mikro-
szerkezetére – Benchmark-kísérlet mágneses keveréssel 11

BALASSA CSILLA, PATAKY CSILLA, TÁTRAI CSABA, ANTAL KRISZTIÁN, GYENES IVÁN, SZAKÁLL SÁNDOR, FÖLDESSY JÁNOS:

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből: Ritka-
földfém-indikációk Magyarországon 27

HAVASI ISTVÁN:

125 éve született dr. Tárczy-Hornoch Antal. Megemlékezés
a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék egykori soproni,
szakmailag elismert professzoráról. 38

OMASZTA ISTVÁN:

Közetek hasításának fizikai folyamatairól 46

Posztterek a BKL-ben – Az MFK Kar és a TEKH Szakkollégium
2024-es terméséből

BALASSA CSILLA, KRISTÁLY FERENC, NÉMETH NORBERT:

Nagy térerősségű (HFSE) kémiai elemek dúsulása a Bükkben –
geokémia és ásványos összetétel 54

(for English titles see B2 page)

*Címlapon: A szemcseszerkezet alakulása a minta különböző területein
(Publikáció a 11.. oldalon)*

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával jelenik meg.

Az Európai Unió klímapolitikájának hatása az EU acéliparára

The impact of the European Union's climate policy on the EU steel industry

NAGY CSENGE¹ , TASZNER ZOLTÁN² , GREGA OSZKÁR^{3,@} 

¹egyetemi hallgató, Miskolci Egyetem AVK, ²PhD, igazgató, Ózdi Acélművek Kft.,

³PhD, vezető szakértő, SteelTech-Center Hungary, Miskolc

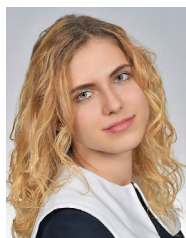
@E-mail: gregadroszkar@gmail.com

A dolgozat az Európai Unió klímapolitikai stratégiájának acéliparra vonatkozó elemeit vizsgálja. Áttekinti az EU acéliparának technológiai struktúráját, jelenlegi ÜHG-kibocsátását. Meghatározza az iparági követelmények teljesítéséhez szükséges ÜHG-csökkentés mértékét, valamint a megvalósuló technológiai átrendeződés alapanyagigényét, és a lehetséges technológiai arányváltoztatás módját, megoldási lehetőségeit.

Kulcsszavak: üvegházhatású gáz, acélgyártási technológia, ívkemence, acélhulladék, nagyolvasztó, nyersvas, klímapolitika

The article examines the elements of the European Union's climate policy strategy relevant to the steel industry. It reviews the technological structure and current greenhouse gas (GHG) emissions of the EU steel industry. It determines the extent of GHG reduction necessary to meet the industry requirements. It determines the raw material demand of the technological restructuring to be implemented and the method and solution options for possible technological ratio changes.

Keywords: greenhouse gas, steelmaking technology arc furnace, steel scrap, blast furnace, pig iron, climate policy



Bevezetés

Az Európai Unió Tanácsa 2011-ben ütemtervet állított össze 2050. évi céldátummal, amelyben meghatározta az „alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság” eléréséhez szükséges célszámokat. Ennek alapján az Európai Unió klímastratégiájának fő célkitűzése az uniós országok üvegházhatású gázkibocsátásának (ÜHG) csökkentése 2030-ig 55%-kal, további lépésként pedig az 1990. évi szinthez képest 2050-ig 80–95%-kal kell csökkenteni az ÜHG-kibocsátást [1].

Az EU Tanács, az Európai Parlament és az Európai Bizottság 2021. április 21-én háromoldalú megállapodásban rögzítette az Európai Unió Tanácsának 2011. évi ütemtervét, azaz a 2030-as klímacélt, amely a jelenlegi technológiai szint ismeretében komoly feltételeket támaszt az acéliparral szemben, különösen, ha a versenyképességi feltételekre is figyelemmel tekintünk.

A 2030-ig szóló keret *új célokat és intézkedéseket* tartalmaz, amelyek arra irányulnak, hogy az EU gazdasága és energiaellátási rendszere versenyképesebbé, biztonságosabbá és fenntarthatóbbá váljon. A keret részleteiben az alábbiakat tartalmazza [2]:

- ❑ kötelezettséget kell vállalni az *ÜHG kibocsátásának további csökkentésére*, és 2030-ig az 1990-es szinthez képest 40%-kal kell csökkenteni a kibocsátást;
- ❑ a felhasznált energia *legalább 27%-ának megújuló forrásból* kell származnia, mindemellett a tagállamok számára kellő rugalmasságot kell engedélyezni nemzeti célértékek megállapítására;
- ❑ az energiahatékonyságról szóló irányelv esetleges módosítása révén *javítani kell az energiahatékonyságot*;
- ❑ egy piaci stabilitási tartalék létrehozása céljából *meg kell reformálni az uniós kibocsátáskereskedelmi rendszert*;
- ❑ az energiaárakra, az energiaellátás diverzifikálására, a tagállamok energiahálózatainak összekapcsolására és a technológiai fejlesztésekre vonatkozó *kulcsmutatókat* kell kidolgozni a versenyképesebb, biztonságosabb és fenntarthatóbb energiarendszer irányában tett *előrehaladás mérésére*.

Az Eurofer iparági bázisként a 2018. évet jelölte meg, így ennek az évnek a kibocsátási szintjét kell 30%-kal csökkenteni a 2030. évi kibocsátási szint eléréséhez.

A bemutatott intézkedések számos technológiai beavatkozást követelnek az acélipartól. Az bizonyos, hogy a klímacél az integrált technológiát működtető

acélművek számára kihívást jelent, és megnöveli az acélhulladék iránti keresletet.

Dolgozatunkban a bemutatott feltételrendszer elemei közül főképpen az ÜHG-kibocsátás csökkentésével összefüggő problémakört tekintjük át kitekintve az energetikai kérdésekre.

A jelenlegi ismeretek birtokában áttekintjük az EU acéliparának technológiai szerkezetét, meghatározzuk a technológiáinként kibocsátott szén-dioxid mennyiségét, valamint vizsgáljuk a rendelkezésre álló alapanyagok mennyiségét, az esetlegesen szükségessé váló pótlás lehetőségeit. Az eredmények alapján megvizsgáljuk, hogy a folyamatban lévő és tervezett klímapolitikai acélipari fejlesztések milyen mértékben elégítik ki a megváltozott struktúra követelményeit.

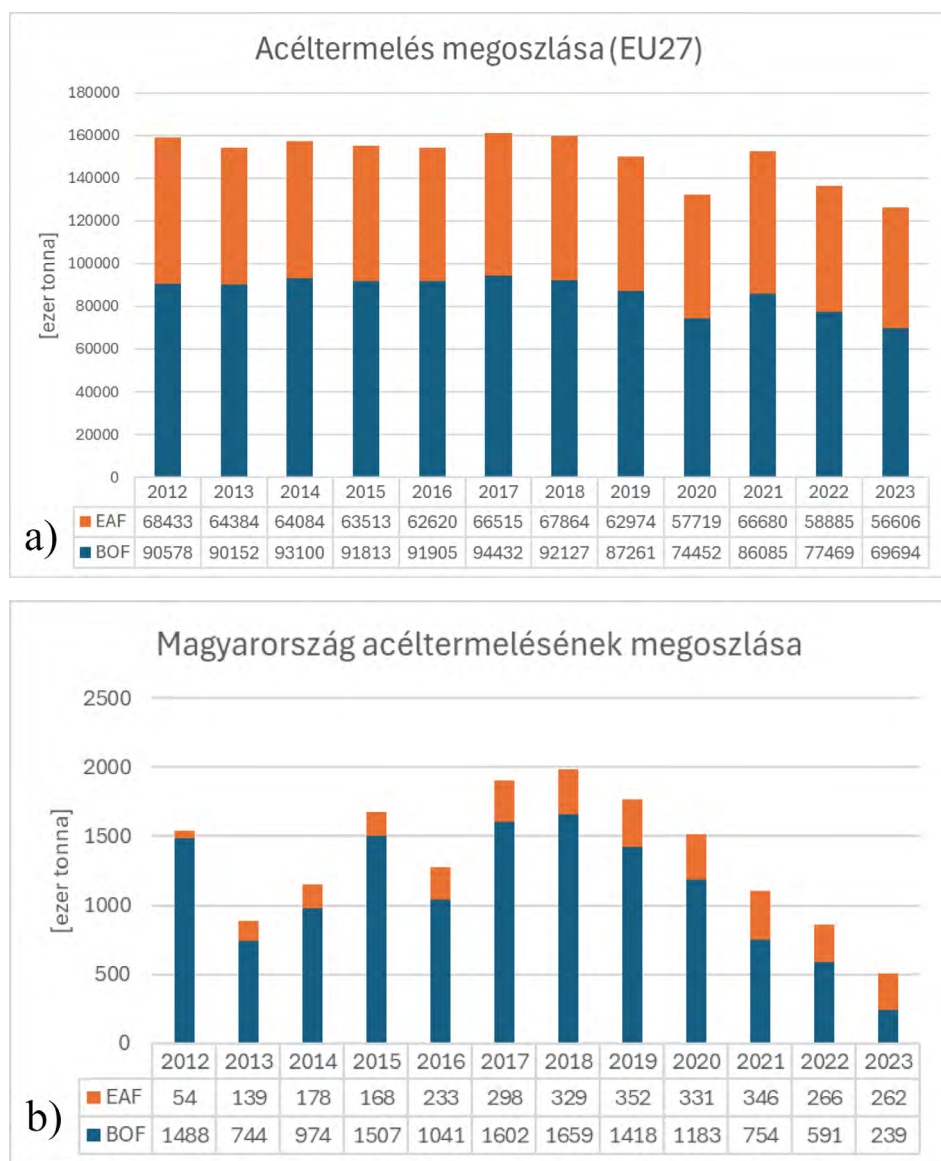
Az EU acéliparának technológiai szerkezete, az elérendő ÜHG-kibocsátás 2030-ig

Az üvegházhatású gázok kibocsátásával kapcsolatban általában az acélipart nevezik nagy kibocsátónak, mivel a világ energiafelhasználásában 7%-kal, míg ÜHG-kibocsátásban 9%-kal részesedik. Nincs egyedül az acélipar, ha a társ alapanyaggyártó technológiákkal hasonlítjuk össze. Az alumíniumkohászat energiafelhasználásban 1%-kal, ÜHG-kibocsátásban 2%-kal részesedik, ezek az értékek a cementipar esetében 5 és 8%, a műanyagiparnál 3 és 4%. Ha figyelembe vesszük, hogy az értékek a termelt alapanyagok mennyiségeire vonatkoznak, akkor az acélipar részesedése már barátságosabb, hiszen a legnagyobb volumen képviseli.

Európa acélipara kimutathatóan 1960 óta napjainkig 50%-kal csökkentette a kibocsátott szén-dioxid mennyiségét. Ezt az eredményt – elsősorban az energiafelhasználás csökkentése érdekében – számos, folyamatos innovációgazdag technológiai fejlesztéssel sikerült elérni. Fentiekből következően az energiafelhasználás az elméletileg lehetséges határ közelében van, így az ÜHG-kibocsátás csökkentésének ezen módja kizárható.

Az uniós célkitűzések acéliparra vonatkozó szükséges intézkedéseinek definiálása a jelenleg alkalmazott két meghatározó technológia sajátosságainak ismeretében lehetséges. Az integrált (nagyolvasztó, oxigénes konverter), azaz a BOF-technológia alapvető energiafogyasztó eleme a technológiai hőmérséklet biztosítása mellett a redukció, amely egyben az ÜHG-kibocsátás szempontjából is meghatározó, míg az úgynevezett miniacélműves, villamos ívkemencés EAF-eljárás ezt a technológiai lépést nélkülözi.

A két alapvető technológiával gyártott acél mennyiségét és technológiák szerinti megoszlását az EU és Magyarország esetében az 1. ábra mutatja [3].

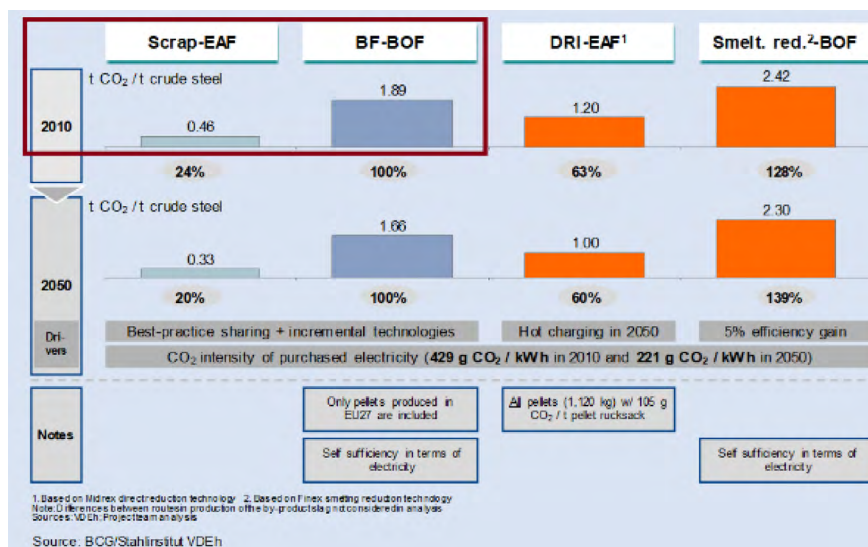


1. ábra. Az acélgyártási technológiák megoszlása az EU-ban (a) és Magyarországon (b)

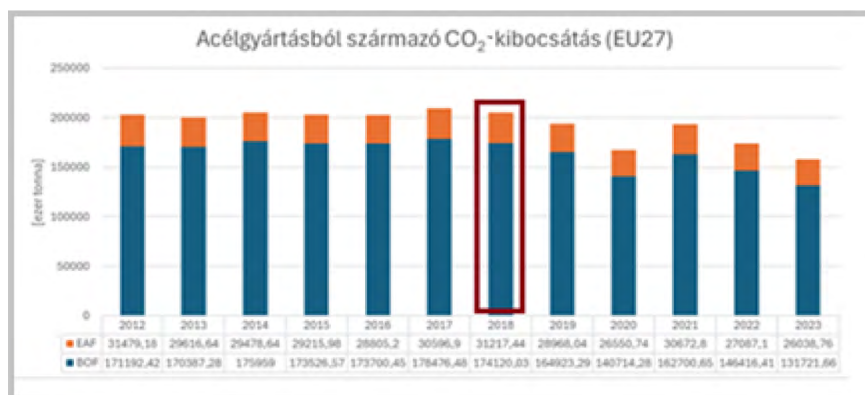
A direktíva 2011-es megjelenése óta a két technológiával gyártott acél mennyiségében és arányában lényeges változás nem történt, így az adott időszakban az ÜHG-kibocsátás csökkentése érdekében érdemi lépések az EU átlagában nem történtek. A kismértékű arányváltozás az EAF javára, főképpen a BOF-úton gyártott acél mennyiségének csökkenéséből adódik, azonban ez a változás nem az ÜHG-csökkentés érdekében történt, hanem főképpen piaci és strukturális mozgások eredménye. A magyarországi változás (1a. ábra) specifikus vállalati struktúra átalakulásának a következménye.

A két technológia kibocsátási értékei különböző szakirodalmi elemzésekben lényeges eltéréseket mutatnak, amely az ÜHG-kibocsátás megközelítési koncepciójából következik, és ebből következően a szakelemzések elég széles intervallumban eltérő értékeket használnak.

Az EAF-technológia alapvetően nem jár ÜHG-kibocsátással. A habos salak képzéséhez szükséges karbonhordozó, és a grafiteléktroda oxidációja során keletkező CO₂ képezi az ÜHG-kibocsátás meghatározó részét, amelyhez a segédüzemi berendezések működtetésekor keletkező elenyésző mennyiségű CO₂ adódik. Konceptcionális – azonban az acélipar klímastratégiai helyzetének megítélése szempontjából lényeges – kérdés, hogy ehhez az értékhez hozzáadódik-e a felhasznált villamos energia előállításakor keletkező ÜHG, vagy ez a mennyiség az energiaipart terheli. Ebből a dilemmából adódhat, hogy különféle elemzések összevetése során az EAF fajlagos ÜHG-kibocsátásánál 0,16 és 0,65 közötti értékekkel találkozunk. EAF-technológiával működő alapacélt gyártó acélmű öt éves, hatósági bevallás szerinti átlagos technológiai eredetű fajlagos ÜHG-kibocsátása 0,08 t CO₂/t acél [4]. Az MVM Mátrai Erőmű adat-



2. ábra. Technológiai kombinációk ÜHG-kibocsátása [5]



3. ábra. ÜHG-kibocsátás az EU-ban

szolgáltatása szerint egy kWh villamos energia előállításához 0,35 kg CO₂-kibocsátást eredményez (Eurofer-adat: 0,43). Ezzel az értékkel és az említett acélmű átlagos fajlagos villamosenergia-felhasználásával számolva, a technológiai és villamosenergia-előállítási eredetű fajlagos ÜHG-kibocsátás 0,2 CO₂ t/t acél.

További számításainkhoz azonban az Eurofer-BCG erre vonatkozó elemzéséből származó, a 2. ábra keretében látható kibocsátási értékeket alkalmazzuk [5].

Az iparági direktíva szerint a 2018. évi 205 337 kt ÜHG-kibocsátás csökkentendő 30%-kal, azaz 139 686 kt-val. Mint az 1. táblázatból látható, a kibocsátás 2023-ban 157 760 kt volt, ami 47 577 kt csökkenést jelent 2018-hoz képest. Ez a csökkenés azonban nem a klímapolitikai követelmények érdekében végrehajtott intézkedések, hanem főképpen a termelés-csökkenés, kisebb részben a technológiai arányok mintegy 3%-os változásának az eredménye.

1. táblázat. Az EU acéltermelési és emissziós adatai

Év	Termelés, kt	BOF		EAF		CO ₂ , kt		
		%	kt	%	kt	BOF	EAF	Összes
2018	159 991	58,5	92 127	41,5	67 864	174 120	31 217	205 337
2019	150 235	59,1	87 261	40,9	62 974	164 923	28 968	193 891
2020	132 171	57,6	74 452	42,4	57 719	140 714	26 551	167 265
2021	152 765	56,1	86 085	43,9	66 680	162 701	30 673	193 373
2022	136 354	56,3	77 469	43,7	58 885	146 416	27 087	173 504
2023	126 300	55,2	69 694	44,8	56 606	131 722	26 039	157 760

2. táblázat. Struktúraváltozás az EU acéliparában 2030-ig

2023		Termelés, kt	BOF		EAF	
			kt	%	kt	%
Struktúra-változás	előtt	126 300	69 694	55,2	56 606	44,8
	után		60 468	47,9	65 832	52,1
		arányváltozás, +/- %	-13,2		16,3	

Felvetődik a kérdés, hogy a csökkentendő 61 601 kt kibocsátást az aktuális év mennyiségéből, esetünkben a 2023. évi 157 760 kt mennyiségéből kell-e számítanunk, vagy a számításban figyelembe vendő a 2018–2023 időszakban bekövetkezett 47 577 kt csökkenés. A kettő közötti különbség 14 024 kt, azaz jelentős érték.

Az *1a. ábrán* az látszik, hogy az EU összes acéltermelése 2018-tól egy év (2021) kivételével folyamatosan csökken. Feltételezve, hogy ez a tendencia nem folytatódik, és nem is növekszik az acéltermelés, akkor a 14 024 kt csökkentendő CO₂-kibocsátás vonzataival kell foglalkoznunk. Ha ezt a csökkentést első közelítésben az integrált (BOF) technológia kapacitáscsökkentésével akarjuk elérni, akkor az integrált kapacitást $14\,024/1,89 = 7\,420$ kt-val kell csökkenteni, ami az EAF-kapacitást fogja ugyanennyivel növelni. Figyelembe kell vennünk azonban ennek a többlet-EAF-kapacitásnak az ÜHG-kibocsátását, amelyet ugyancsak az integrált kapacitásból kell megoldanunk. Az így kialakuló technológiai struktúra az EAF-kapacitást 9 226 kt-val növeli, párhuzamosan ugyanennyivel csökken az integrált technológia része-

sedése. Ennek a EAF-úton előállított többletacélnak az alapanyag (acélhulladék) igénye 10 150 kt.

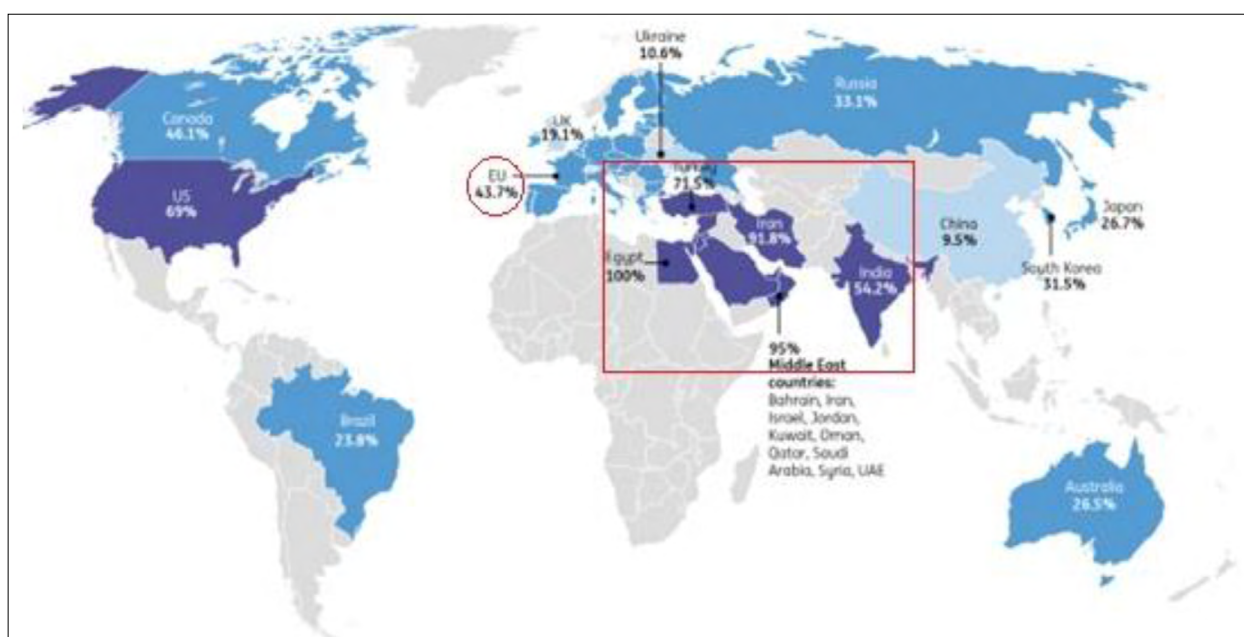
Tehát, amennyiben a 2030-ig elérendő ÜHG-csökkentést a BOF-EAF-technológia arányváltozással kívánjuk elérni, a többlet betétigény (acélhulladék) 10 150 000 tonna.

A rendelkezésre álló betét (acélhulladék) mennyisége

A szükséges ÜHG-kibocsátás csökkentéshez 9 226 kt acél termelését kell az integrált technológiáról az EAF-technológiára konvertálni. Ez a változás a 2. táblázatban látható strukturális átrendeződést eredményez az EU acéliparában.

A technológiai arányváltozás többlet-betétigényének rendelkezésre állásához Európa, de elsősorban az EU acélhulladék áramlási viszonyait kell megvizsgálnunk.

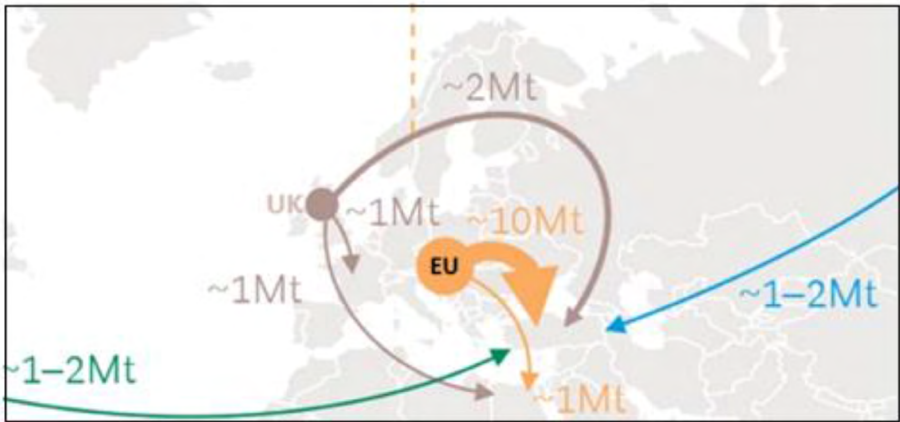
Az EU acélhulladék-potenciálja szempontjából figyelemre méltóak azok az országok, amelyek logisztikai közelségben és meghatározó EAF-részesedéssel bírnak a 4. ábra keretezett részében, a megfelelő volumen értékek pedig a 3. táblázatban láthatók [6].



4. ábra. Acélgyártási technológiai arányok a világ országaiban

3. táblázat. Acélgyártó technológiai mennyiségek és arányok (Megjegyzés: A 4. ábra és 3. táblázat adatai közötti kisebb eltérés a hivatkozások közötti különbségből következik)

	BOF, kt	EAF, kt		BOF, kt	EAF, kt
	mennyiség		hull.-igény	%	
Törökország	10 011	25 123	27 635	28,5	71,5
Egyiptom	0	9 819	10 801	0,0	100,0
Irán	3 150	27 440	30 184	10,3	89,7
Közel-kelet	3 150	49 679	54 647	6,0	94,0
Összesen	16 311	112 061	123 267	12,7	87,3
India	57 879	67 499	74 249	46,2	53,8



5. ábra. Az EU acélhulladék-exportjának célpiacai

Az EAF-termelés globális növekedése értelemszerűen növekvő hulladékfelhasználást eredményez, ezért fokozott figyelmet igényel az EU acélhulladék-kereskedelme.

A 4. ábra tükrében az 5. ábrán az EU-ból exportra kerülő acélhulladék célországait tüntettük fel. Mint látható, meghatározó a törökországi célpiac, továbbá kisebb mennyiségben Egyiptom. 2022-ben az EU teljes acélhulladék-exportja 43,5 Mt, importja 31,3 Mt volt, azaz 12,2 Mt nettó export jelent meg. Ez az exportált mennyiség értelemszerűen főképpen Törökországba irányult.

Összességében a meglévő termelési, technológiai aránymegoszlási és acélhulladék-forgalmazási adatok tükrében az mondható, hogy kellő figyelemmel és bi-

zonyos szabályozó intézkedésekkel a jelenlegi termelési szintnek megfelelően az EU acélhulladék ellátása egyensúlyban van. Ennél az elemzésnél figyelmen kívül hagytuk az acélhulladékok minőségével szemben a felhasználók által igényelt követelmények szigorodását és specifikusságát, amelynek a teljesítése a hulladékbegyűjtő, -előkészítő struktúrában jelentős fejlesztéseket igényel, növelve az acélhulladékok árát.

A szükséges technológiai arányváltoztatás lehetőségei

A 2. táblázat adatai azt mutatják, hogy az EU acéliparának technológiai szerkezete – az ÜHG-csökkentés bemutatott módszere szerint – gyökeresen megválto-

4. táblázat. Acélgyártó vállalkozások EU I.

Acéltermelés					
2023	BOF	EAF	Összesen	BOF	EAF
	kt			Acéltermelés, %	
Ausztria	6 440	660	7 100	90,70	9,30
Belgium	4 089	1 811	5 900	69,30	30,70
Bulgária	0	500	500		100,00
Horvátország	0	200	200		100,00

4. táblázat. (folyt.)

Acéltermelés					
2023	BOF	EAF	Összesen	BOF	EAF
	kt			Acéltermelés, %	
Csehország	3 250	150	3 400	95,60	4,40
Németország	25 594	9 806	35 400	72,30	27,70
Finnország	2 356	1 444	3 800	62,00	38,00
Franciaország	5 920	4 080	10 000	59,20	40,80
Görögország	0	1 200	1 200		100,00
Magyarország	262	239	500	52,30	47,70
Olaszország	2 996	18 104	21 100	14,20	85,80
Luxemburg	0	1 900	1 900		100,00
Hollandia	4 700	0	4 700	100,00	0,00
Lengyelország	3 123	3 277	6 400	48,80	51,20
Portugália	0	2 000	2 000		100,00
Románia	851	749	1 600	53,20	46,80
Szlovákia	3 960	440	4 400	90,00	10,00
Szlovénia	0	500	500		100,00
Spanyolország	3 203	8 197	11 400	28,10	71,90
Svédország	2 950	1 350	4 300	68,60	31,40
EU 27	69 694	56 606	126 300	55,20	44,80
Összes					

zik, az integrált BOF technológia részesedése 50% alá csökken. Ezzel összefüggő további stratégiai döntés a technológiaváltás tételes megoldása. Erre vonatkozóan

szükséges megvizsgálni az EU egyes országai technológiai szerkezetének (4. táblázat), azon belül pedig a vállalati/területi megoszlás részleteit (5. táblázat).

5. táblázat. Acélgyártó vállalkozások EU II.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Ország	Üzem	Nagyolvasztó-kapacitás	Összes kész- acél-kapacitás	Nagyolvasztók száma	Nyersvas- termelés, kt/no/év	Feltételezett acéltermelés, kt/év
		Mt/év				
Austria	Donawitz	1 370	1 570	2	685	1 713
	Linz	4 340	6 000	3	1 447	5 425
Belgium	Ghent	4 430	5 000	2	2 215	5 538
Cseho.	Ostrava	3 200		3	1 067	4 000
	Trinec	2 100	2 400	2	1 050	2 625
Finno.	Raahe	2 400	2 600	2	1 200	3 000
Franciao.	Dunkerque	6 800	6 750	3	2 267	8 500
	Fos-Sur-Mer	5 160	5 100	2	2 580	6 450
Németo.	Brema	3 960	3 800	2	1 980	4 950
	Dillingen	4 790	2 760	2	2 395	5 988
	Duisburg	11 600	11 560	4	2 900	14 500
	Eisenhüttenstadt	2 340	2 400	2	1 170	2 925
	Salzgitter	4 800	5 200	2	2 400	6 000
	Völklingen		3 240		XXX	XXXXXX
Magyaró.	Dunaújvaros	1 310	1 650	2	655	1 638

5. táblázat. (folyt.)

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Ország	Üzem	Nagyolvasztó-kapacitás	Összes kész- acél-kapacitás	Nagyolvasztók száma	Nyersvas- termelés, kt/no/év	Feltételezett acéltermelés, kt/év
		Mt/év				
Olaszo.	Taranto	9 590	11 500	4	2 398	11 988
Hollandia	Ijmuiden	6 310	7 500	2	3 155	7 888
Lengyelo.	Dabrowa Gornica	4 500	5 000	2	2 250	5 625
	Krakkó	1 310	2 600	1	1 310	1 638
Románia	Fgalati	3 250	3 200	2	1 625	4 063
Szlovákia	Kassa	2 850	4 500 (3 900)	2	1 425	3 563
Spanyolo.	Aviles		4 200		XXX	XXXXXXX
	Gijon	4 480	1 200	2	2 240	5 600
Svéd.	Lulea	2 200	2 200	1	2 200	2 750
	Öxelesund	1 800	1 700	2	900	2 250
UK	Port Talbot	4 770	4 900	2	2 385	5 963
	Scunthorpe	3 590	3 200	3	1 197	4 488

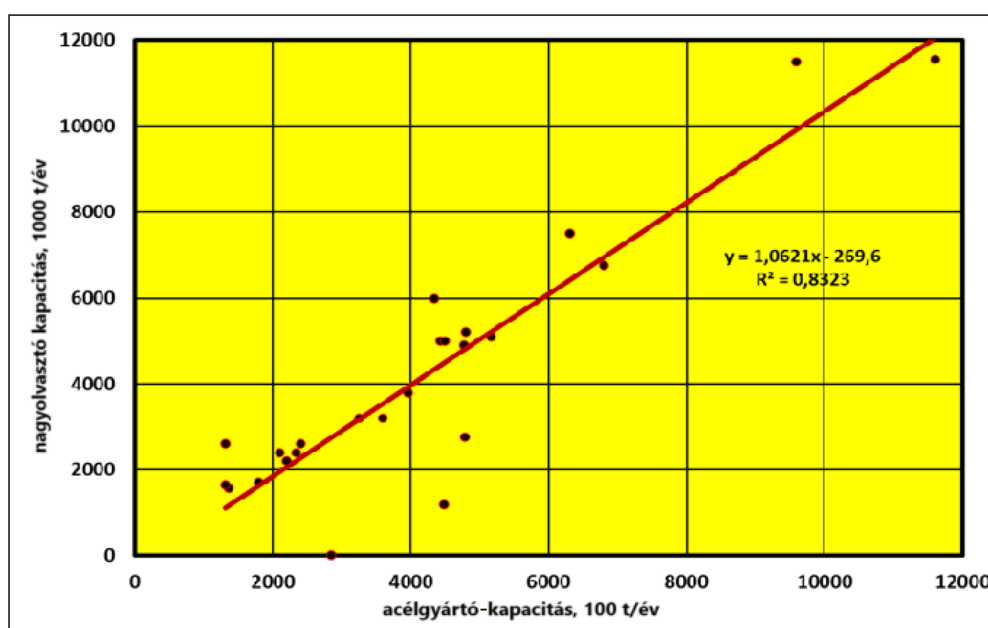
Az 5. táblázatban az egyes helyszíneken működő integrált acélművek kapacitásadatait látjuk. Az értékekből észszerűen a nagyolvasztó-acélgyártó kapacitás összefüggését a 6. ábra mutatja.

Az összefüggés szorosságát a 0,9 értékű regressziós együttható jelzi, ami közel analitikus összefüggésre utal, amely triviálisnak is mondható, azonban, ha a két technológiai lépés további összefüggéseit vizsgáljuk, részletesebb megállapításokat tehetünk.

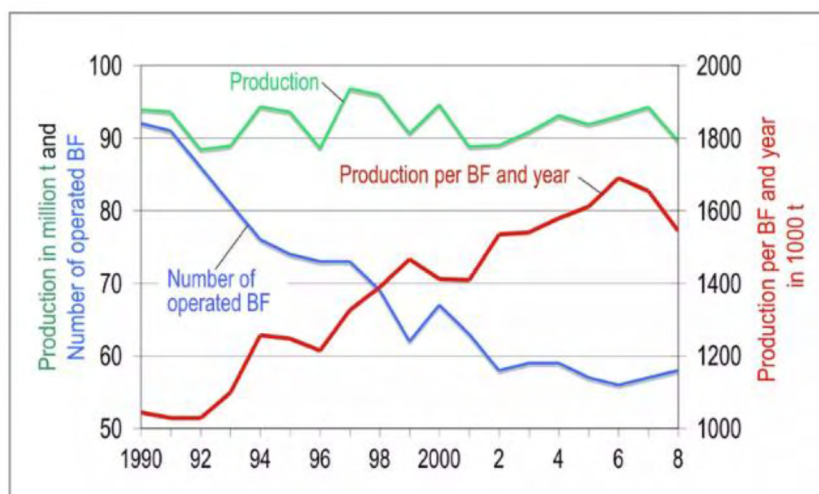
Az 5. táblázat és a 3. ábra adatainak felhasználásával korábbi termelési, technológiai trendek elemzése alapján lehet elképzelni a struktúraátalakítás módját [7].

A világ acéliparában 1985–2010 időszakban nagyolvasztós nyersvasgyártásban a következő kapacitásváltozások történtek:

- 115 nagyolvasztó leállításával megszűnt 75,2 Mt kapacitás;
- létesült 34 nagyolvasztó 56,4 Mt kapacitással, azaz:
 - megszűnő átlagos kapacitás: 0,65 Mt/év/nagyolvasztó,
 - létesített átlagos kapacitás: 1,7 Mt/év/nagyolvasztó.



6. ábra. A nagyolvasztó-acélgyártó kapacitás összefüggése az EU-országokban, integrált acélművekben



7. ábra. A nagyolvasztós nyersvasgyártás kapacitás-változása 1990 és 2008 között

Az EU acéliparában ezen időtávon belül az 1990 és 2010 között a következő technológiai, technológia-fejlesztési, piaci, termékszerkezeti változások történtek:

- 2010-ben 26 integrált acélmű működött nagyolvasztós alapanyaggyártással, ez a szám 1990-ben 45 volt;
- 10 leállított integrált acélmű kapacitásának jelentős részét elektroacélmű-bázison építették újjá;
- a megmaradt működő összes nagyolvasztói kapacitás 79 Mt/év, ezt a kapacitást 37 nagyolvasztó képviseli. A két adatból következik, hogy
 - az átlagos nagyolvasztó kapacitás 2,13 Mt/év,
 - ami hipotetikusan 3 550 m³ térfogatú nagyolvasztót feltételez.

Ezeket a megállapításokat támasztja alá az European Blast Furnace Committee 1990 és 2008 közötti időszakra vonatkozó összesítése (7. ábra).

A bemutatott jelenségek alátámasztják az egyébként látható törekvéseket a nagyolvasztók térfogatának növelésére, különösen a nagy kapacitású integrált acélművekben. A törekvés a termelékenység növelését, a költségek, energiafelhasználás, tűzállóanyag-felhasználás, valamint az ÜHG-kibocsátás csökkentését célozza.

A 2,13 Mt/év átlagos nagyolvasztó-kapacitásból kiindulva a feltételezett konverteres továbbfeldolgozás 2,7 Mt folyékony acélt eredményez, tehát a 3,0 Mt/év acéltermelési kapacitás alatti BOF-acélművek átalakítása ésszerű EAF-technológiára. Ezeket az üzemeket a 4. táblázatban emeltük ki. A kijelölt művek összes acélgyártó kapacitása 13 900 kt, ami bőven fedezi a számított 9 226 kt csökkentendő BOF-kapacitást.

Következtetés

Az Európai Unió klímapolitikai intézkedései szerint az EU acéliparának 2030-ig szükséges ÜHG-kibocsátás csökkentését vizsgáltuk. Az elérni kívánt kibocsátási szint megvalósítható a két meghatározó – BOF- EAF – acélgyártási technológia arányváltoztatásával. A BOF-technológia arányának csökkentésével szükségesé váló EAF-technológia bővítésének eredményeként megjelenő többlet-acélhulladék igényt az EU jelenlegi nettó acélhulladék-exportja biztosíthatja. A technológiai beavatkozás mindenképpen igényli az EU szintjén szükségessé váló, az eredményt előidéző ösztönző, szabályozó, esetleg finanszírozási rendszer kidolgozását.

A 2030 után szükséges ÜHG-csökkentés megvalósításához mindenképpen szükségessé válik a zöld technológiák bevezetése mind a redukciós technológiák, mind az energiaellátás területén, amelynek részletei azonban ennek a dolgozatnak a kereteit meghaladják.

Köszönetnyilvánítás

A jelen kutatási témát a Miskolci Egyetem Steel-Tech-Center Hungary projektje támogatja. This research is supported by the SteelTech-Center Hungary project of University of Miskolc.

Irodalom

- [1] eur-lex.europa.eu/HU/legal-content/summary/moving-towards-a-low-carbon-economy-in-2050.html
- [2] Low carbon roadmap pathways to a CO₂-neutral European steel industry, Final. November 2019.
- [3] Steel Statistical Yearbook 2023. worldsteel
- [4] ÓAM ÜHG-mérleg 2015-2019.
- [5] Eurofer-Boston Consulting Group – 2013. június
- [6] worldsteel-elemzés
- [7] Saját elemzések

Forgó mágneses mező (RMF) által indukált olvadékáramlás hatása egyirányúan kristályosodott Al–7wt.% Si-ötvözet mezo- és mikroszerkezetére – Benchmark-kísérlet mágneses keveréssel

VERES ZSOLT^{1,2} , ROÓSZ ANDRÁS^{1,2,@} , RÓNAFÖLDI ARNOLD^{1,2}, SYCHEVA ANNA², SVÉDA MÁRIA^{1,2} 

¹Miskolci Egyetem, Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézet, 3515 Miskolc

²HUN-REN – Miskolci Egyetem Anyagtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc

@E-mail: andras.roosz@uni-miskolc.hu

Másodközlés – Eredeti közlemény:

The effect of melt flow induced by RMF on the meso- and micro-structure of unidirectionally solidified Al–7wt.% Si alloy – Benchmark experiment under magnetic stirring

Zs. Veres, A. Roósz, A. Rónaföldi, A. Sycheva, M. Svéda*

Journal of Materials Science & Technology, 103 (2022) 197–208., 12 p.

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.060>

Az elmúlt két évtizedben számos programot fejlesztettek ki a formaöntvények, az acél- és az alumínium-ötvözetek folyamatos öntése során végbemenő kristályosodási folyamatának szimulálására. A szimulációk validálásához pontosan ismert körülmények között végzett kísérletek szükségesek. A kutatás célja adatok szolgáltatása a szimulációk validálásához. Egyirányú kristályosodási kísérleteket végeztünk forgó mágneses mezővel (Rotated Magnetic Field, RMF) létrehozott olvadékáramlásnak az Al–7 t% Si-ötvözet kristályosodott mezo- és mikroszerkezetére való hatásának tanulmányozására. A minták első és harmadik 1/3 részét mágneses keverés nélkül, a második (középső) 1/3 részét mágneses keveréssel kristályosítottuk. A mágneses indukció 10 mT, a hőmérsékleti gradiens ~7 K/mm, a minta mozgási sebessége 0,1 mm/s volt. A minta hosszszelvényén az oszlopos/ekviaxiális átmenetet (Columnar Equiaxed Transition, CET), az ekviaxiális/oszlopos átmenetet (Equiaxed Columnar Transition, ECT), a szekunder dendritágtávolságot (SDAS) és a makrosdúsulást (koncentrációeloszlást és az eutektikum mennyiségét) vizsgáltuk. A primer dendritágtávolságot (Primary Dendrite Arm Spacing, PDAS) és a szemcseszerkezetet színes maratás után a próba keresztmetszetén vizsgáltuk.

Kulcsszavak: Al–7wt.% Si-ötvözet, egyirányú kristályosítás, RMF mágneses keverés, mezo- és mikroszerkezet

1. Bevezetés

Az ötvözetek gyártásának első technológiai lépése az olvadékból való kristályosodásuk. A kristályosodási folyamat folyamán kialakuló mezo- és mikroszerkezetet (oszlopos vagy ekvixiális dendrites szerkezet, szemcseszám, makrodúsulás, primer és szekunder dendritágak távolsága, az eutektikum mennyisége és az eutektikum lamelláinak távolsága) az olvadéban és a kristályosodó szilárd fázisban zajló diffúzió befolyásolja.

A kialakuló mezo- és mikroszerkezeteket jelentősen befolyásolja a különböző öntési technológiák kristályosodási folyamatai során fellépő olvadékáramlás is. Az olvadékáramlás hatására az olvadék koncentrációja megváltozik a dendrit csúcs előtt és az úgynevezett keverék- (mushy) zónában, aminek következtében a mezo- és mikroszerkezet jellemző paraméterei is megváltoznak.

Az elmúlt két évtizedben számos programot fejlesztettek ki a forma öntvények [1, 2], az acél [3] és az alumínium ötvözetek [4] folyamatos öntése során végbemenő kristályosodási folyamatának szimulálására. A szimulációk egyik része a primer és szekunder dendritágak (Primary Dendrite Arm, PDA, Secondary Dendrite Arm, SDA) kialakulásával, a nemegyensúlyi eutektikum mennyiségével, a mikro- és makrodúsulással, valamint az oszlopos/ekvixiális átmenettel (CET) foglalkozik az olvadékáramlás hatásának figyelembe vétele nélkül [5–9]. Számos más szimulációban a szerzők a gravitáció által okozott u.n. természetes [10–17] vagy külső kényszer által okozott (pl. mágneses keverés) olvadékáramlást [18, 19] is figyelembe veszik.

A szimulációk validálásához pontosan ismert körülmények között végzett kísérletek szükségesek, amely esetekben kristályosodásnál kialakuló mezo- és mikroszerkezetek is részleteiben (számszerűen) ismertek.

Azok a szimulációk, amelyek csak a folyékony és szilárd fázisban végbemenő diffúziót veszik figyelembe, különböző típusú mikrogravitációs (μg) kísérletekkel (ejtőtorony, parabolikus pályán repülő rakéták vagy repülőgépek) validálhatók. A kristályosodás során az olvadéban kialakuló hőmérséklet- és koncentrációkülönbség miatt sűrűségkülönbség jön létre, ami földi (1 g) körülmények között olvadékáramlást okoz [10–26], mikrogravitációs körülmények között azonban az áramlás nem alakul ki [27–34].

Az 1 g által okozott olvadékáramlás sebessége (természetes áramlás) általában jóval kisebb, mint az öntési technológiáknál a gyakorlatban kialakuló áramlási sebesség. Különösen igaz ez a nyomásos öntésre, amikor az olvadékot nagy nyomással juttatják be a szerszámba.

A kísérletek során az olvadékáramlás sebessége a következő két módszerrel növelhető:

1. *Az olvadék centrifugában történő kristályosításával* [35–39]. Ebben az esetben az áramlás a centrifugális erő hatására az olvadéban kialakuló sűrűség különbség miatt alakul ki. A berendezés összetett és alig hozzáférhető, mivel az ilyen egységek csak különböző úrkutató központokban működnek.
2. *Az olvadék mágneses keverésével* [40–53]. Ebben az esetben a sűrűség különbség nem játszik szerepet, az olvadékáramlás a külső mágneses tér által indukált Lorenz-erő hatására alakul ki. A berendezés viszonylag egyszerű, laboratóriumi körülmények között is megépíthető. Az olvadékáramlás sebessége és iránya egyszerűen megváltoztatható akár a kísérletek alatt is az indukciós paraméterek (mágneses indukció, frekvencia) megváltoztatásával.

Mint korábban említettük, a szimulációk validálásához olyan kísérleteket kell végezni, amelyek esetében a mintában hőmérséklet-eloszlás, az idő, a mágneses tér paraméterei (mágneses indukció, frekvencia, induktor pólusszáma), a minta geometriája (átmérő, hossz) és a megszilárdult mezo- és mikroszerkezet minden részlete (szemcseszerkezet, primer és szekunder dendritág távolság, koncentrációeloszlás a minta sugara és hossza mentén) jól ismert.

A binér Al–7% Si, a ternér Al–7% Si–0,6% Mg és Al–7% Si–1% Fe ötvözetek kiváló modellanyagok, amelyeket gyakran használnak a kristályosodási paraméterek (szilárd/olvadék frontsebesség, hőmérséklet-gradiens, gravitációs vagy kényszer olvadékáramlás) mezo- és mikroszerkezetre gyakorolt hatásának tanulmányozására, valamint a szimulációk validálására.

Griffiths és mtsai. [26] csak a természetes áramlás hatását vizsgálták az oszlopos/ekvixiális átmenetre nem állandósult állapotú kristályosodás során. Liu és mtsai [30] vizsgálták a szilárd/olvadék front sebességének ($0,01 < v < 0,35 \text{ mm/s}$) és a hőmérséklet-gradiens ($0,2 < G < 0,9 \text{ K/mm}$) változásának hatását a szemcseszerkezetre, a szekunder dendritág távolságra (Secondary Dendrite Arm Spacing, SDAS) és az Al–Si eutektikum mennyiségére. A kristályosodási kísérleteket az ISS-en végezték az u.n. alacsony hőmérséklet gradiensű kemencében (Low Gradiend Furnace, LGF) a CETSOL ESA MAP projekt keretében. A minta átmérője és hasznos hossza 8, illetve 60 mm volt. A kísérletek két fő eredménye az volt, hogy a primer és szekunder dendritágak finom oszlopos szerkezete egyenletesebb eutektikum eloszlást garantál, mint a durva oszlopos szerkezet. A CET csak a szemcserefinoítást tartalmazó mintában tudott kialakulni.

Liu és mtsai [54] szimulálták az LGF-ben kristályosodott két minta szemcseszerkezetét [30] numerikus módszerrel (CAFE). A szemcseméretet és a szemcsék nyújtottságát, valamint a CET jelenséget reprodukálták, de ezek nem voltak teljesen azonosak a kísérleti eredményekkel.

Li és mtsai [32] összehasonlították az ISS-en kristályosított minta mikroszerkezetét (CET, eutektikus mennyiség, SDAS) [30] egy másik, azonos kristályosodási paraméterekkel a földön kristályosított mintával mikroszerkezetével ($0,01 < v < 0,1$ mm/s, $0,45 < G < 0,9$ K/mm). A felhasznált ötvözet szemcsefinomítót tartalmazott. A szerzők bemutatták, hogy mindkét mintában progresszív CET alakult ki, mivel a földön megszilárdult mintában az olvadék áramlása mind az új szemcséket, mind az oldott ötvözőt elviszi a dendrit csúcs zónájából, csökkentve a blokkoló hatást, elősegítve az oszlopos dendrit folyamatos növekedését.

Az LGF-ben [30] végzett kísérletekhez hasonló kísérleteket végeztek az ISS egy másik berendezésében, (Solidification Quench Furnace, SQF) [27]. Az ötvözet és a minta geometriája ugyanaz volt mint az LGF-ben végzett kísérleteknél. A kezdeti hőmérsékleti gradiens nagyobb volt ($G \sim 4$ K/mm), és két minta esetében nőtt ($G \sim 5$ K/mm), a másik két minta esetében csökkent ($G \sim 2$ K/mm) a kristályosítás során, a szilárd/olvadék front sebessége 0,02 és 0,8 mm/s között változott. Két minta szemcssefinomítót tartalmazott, a másik két mintát pedig gyenge forgó mágneses tér (RMF: 0,5 mT) keverték. A szerzők megállapították, hogy az RMF csak kis szilárd/olvadék front sebessége (0,02 mm/s) esetén van jelentős hatással mind a termikus viszonyokra, mind a mikroszerkezetre, a nagy hőmérsékleti gradiens és a gyenge RMF hatására nem alakult ki CET a szemcsefinomítót nem tartalmazó mintában. Amikor a G kicsi és a v nagy volt, a szemcsefinomítót tartalmazó ötvözet mikroszerkezete megnyúlt ekvixiálissá vált.

Steinbach és Ratke [20] az Al-7 t% Si-0,6 t% Mg ötvözet kristályosodását vizsgálták RMF keverés nélkül és RMF keveréssel a MICAST ESA MAP projekt keretében. A G értéke 3 K/mm volt, a v pedig 0,015 és 0,15 mm/s között változott. A minta geometriai paraméterei megegyeztek az LGF-ben és az SQF-ben végzett kristályosítás kísérleteknél használt minta paramétereivel. A kristályosodási kísérleteket ARTEMIS kemencében végezték 3 és 6 mT indukciós keveréssel. Megállapították, hogy a PDAS csökken és az SDAS növekszik az indukció értékének növelésével az oldott ötvöző konvektív transzportja miatt, és az SDA durvulási paramétere 1/3-ról 1/2-re nő. A Si-koncentrációt a minta sugának függvényében mérték. Megállapították, hogy a keverés hatására a Si-koncentráció kisebb volt a minta szélein, és nagyobb volt a minta középső tartományában (kb. az eutektikus koncentrációjának

megfelelő), mint az átlagos koncentráció. Így a minta középső tartományában dendrit mentes régió alakult ki, többé-kevésbé tiszta α -Al/Si eutektikummal.

Mind kísérletileg [40, 42, 49, 61], mind szimulációkkal [18, 19, 60] kimutatták, hogy karácsonyfa szerű (Cristmas Tree Like, CTL) mezoszerkezet alakul ki, ha a mágneses indukció 5,6 mT felett van. Az ilyen típusú mikroszerkezetben a minta közepén (a fa magjában) egy nagy koncentrációjú régió található [20], de néhány oldalág kinő a magból. Az oldalágak koncentrációja is nagy, hasonló a mag koncentrációjához. A CTL mezoszerkezet kísérletileg meghatározott paraméterei (mag és kar átmérője, karok periodicitása) a szakirodalomban nem találhatók meg részletesen.

A jelen cikkben a forgó mágneses tér (RMF) által indukált olvadékáramlás mezo- és mikroszerkezetre gyakorolt hatását vizsgáljuk, figyelembe véve a numerikus szimulációk validálásához szükséges összes követelményt.

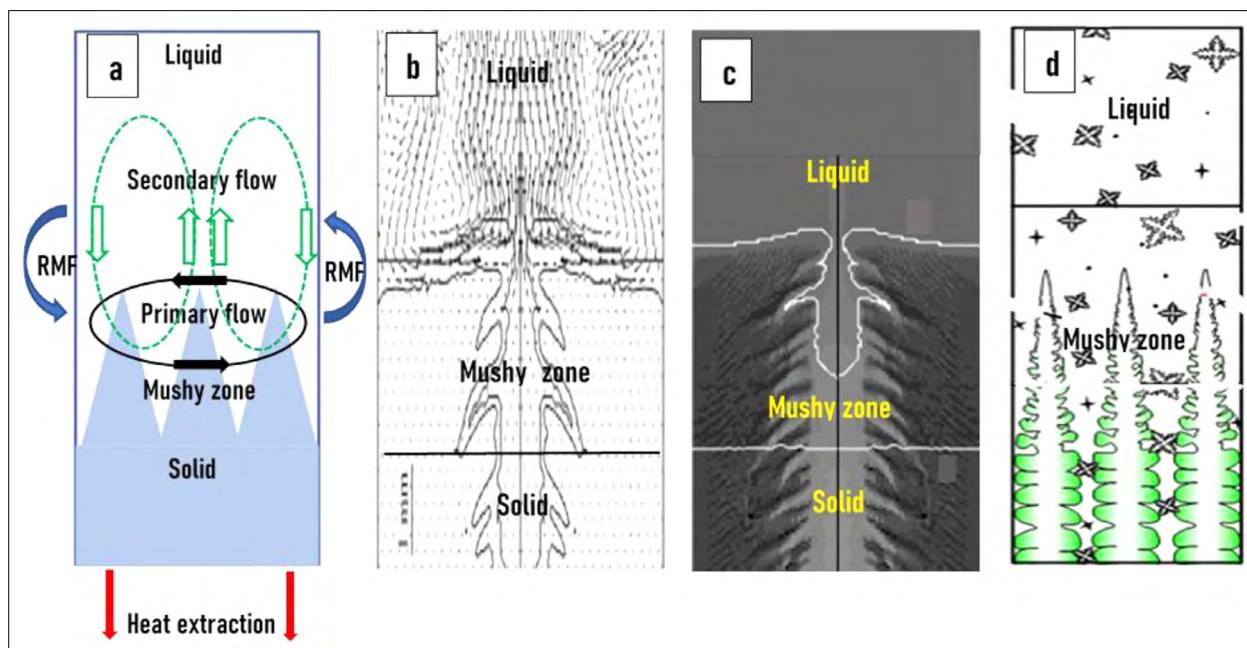
2. A mikroszerkezet kialakulásának mechanizmusai RMF körülmények között

A [44] hivatkozásban a szerzők kimutatták a mágneses keverés által kiváltott olvadékáramlás hatását a kristályosodott szerkezetre. Ezek a hatások a következőképpen foglalhatók össze:

Az ötvözet egyirányú kristályosodása során keverékzóna alakul ki a minta teljesen szilárd és olvadék részei között. Ha a szilárd/olvadék front hőmérséklet-gradiens/sebesség (G/v) értéke elég nagy, akkor olvadékáramlás nélkül oszlopos dendrites szerkezet alakul ki. A primer dendritágak közel párhuzamosak a hőelvonás irányával (*1a. és 1d. ábra*). A keverékzónában az olvadékban lévő ötvözőelem koncentrációja fentről lefelé növekszik (ha a megoszlási hányados $k < 1$). Az Al-7 t% Si ötvözet esetében a koncentráció felül 7 t% Si (ha a primer dendritcsúcs túlhűlése elhanyagolható), alul pedig 12,6 t% Si (ahol az Al-Si eutektikum megszilárdul). A keverékzóna átlagos koncentrációja ennek következtében nagyobb, mint az ötvözet átlagos koncentrációja.

A mágneses keverés bekapcsolása után (ívelt nyílak az *1a. ábrán*), kétféle áramlás indul el az olvadékban. A mágneses tér forgása az olvadék forgó áramlását okozza a minta tengelye körül (a primer áramlást fekete görbe és nyílak jelölik az *1a. ábrán*), valamint a minta hossztengetyével párhuzamos áramlást generál (a szekunder áramlást zöld görbék és nyílak jelölik az *1a. ábrán*). A primer áramlás maximális sebessége tízszer akkora, mint a szekunder áramlásé. Amint az *1. ábrán* látható, az áramlás mind a kristályosodási front előtti olvadékban, mind a keverékzónában kialakul.

Ez a bonyolult áramlás a keverékzónában lévő nagy koncentrációjú olvadékot a minta széleitől a kö-



1. ábra. (a) Primer és szekunder olvadákáramlás az egyirányúan megszilárdult mintában, (b) szimulált szekunder áramlás a tiszta olvadékfázisban [18], (c) szimulált karácsonyfaszerű (CTL) mikroszerkezet [18], (d) a dendritek fragmentációja által kiváltott oszlopos/egyenlőtengelyes átmenet (CET) mechanizmusa

zepe felé szállítja. Az áramlásnak az eredményeként nagy koncentrációjú (közel eutektikus koncentrációjú) olvadék keletkezik a minta közepén, míg a széleken a koncentráció kisebb, mint az ötvözet átlagos koncentrációja.

A szekunder áramlás az ötvözőelemet a keverékszónából a tiszta olvadékfázisba szállítja. Az 1b. ábrán a kis fekete nyilak a sebesség vektorokat mutatják a olvadékfázisban a keverékszóna előtt [18]. Az eredmények azt mutatják, hogy a minta alján az átlagos koncentráció kisebb, a minta tetején pedig nagyobb, mint az ötvözet átlagos koncentrációjaközpont, makrodúsulás alakul ki a minta hossztengele mentén.

Ha a mágneses indukció elég nagy (és így a mágneses Taylor-szám meghaladja a kritikus 105 értéket [46], a lamináris szekunder áramlás elveszíti stabilitását, turbulens áramlássá válik, és karácsonyfaszerű (Cristmas Tree Like, CTL) mikroszerkezet alakul ki (1b. és 1c. ábra). A mag átmérő, az oldalágak közötti távolság és azok hossza a kísérleti paraméterektől függ (mágneses indukció, hőmérsékleti gradiens, szilárd/olvadék front sebessége). Budenkova mtsai. [18] numerikus szimulációval kimutatták, hogy a CTL szerkezet kisebb mágneses Taylor-számnál ($Ta = 2,32 \times 10^4$) is kialakulhat, ha a szekunder áramlás teljesen vagy részben lamináris. Az 1c. ábra az Al-7% Si-ötvözet ($G = 6 \text{ K/mm}$, $v = 0,23 \text{ mm/s}$, $B = 13,5 \text{ mT}$, $f = 50 \text{ Hz}$) esetében a számított CTL mikroszerkezetet mutatja [18].

A hőmérséklet a keverékszóna előtt nő, mert a szekunder áramlás meleg olvadékot szállít a minta tetejéről az aljára (1a. ábra). Az olvadákáramlás meg-

változtatja a koncentrációt és a hőmérséklet-eloszlást (a hőmérsékleti gradiens csökken) lokálisan a keverékszóna előtt (az primer dendritágak csúcsai előtt) az olvadékfázisban, így ott új csírák képződhetnek (homogén csíráképződés). Az olvadákáramlás termikus és koncentrációingadozásokat okoz a keverékszónában is; ennek eredményeként egyes szekunder dendritágak töve, ahol a primer ágakhoz csatlakoznak visszavolvadhat, a szekunder dendritág megmaradt, a primer ágról leváló részét az olvadákáramlás az olvadékba szállíthatja a kristályosodási front elé, néhányuk pedig a keverékszónában maradhat (1d. ábra). Ezek a kis szilárd részek heterogén csíráképzőként működve közel oszlopos és/vagy ekviaxiális szemcséket hoznak létre. Az új szemcsék hossz/szélesség aránya (Length/Wide, L/W) általában kisebb, mint az eredetie, és a primer dendritágak nem párhuzamosak a hőelvonás irányával. Ha ezeknek az új szemcséknek az L/W aránya 2 felett van, a szerkezet oszlopos marad (progresszív – fokozatos – oszlopos/ekviaxiális átmenet, PCET), ha kisebb, akkor ekviaxiálisnak tekinthetők. Ha az ekviaxiális szemcsék térfogata meghaladja a ~50%-ot, éles (sharp) oszlopos/ekviaxiális átmenet (SCET) következik be, és a mikroszerkezet teljesen ekviaxiálissá válik.

3. Kísérletek

3.1. Ötvözet

Az Al-7 t% Si ötvözetet 99,99 t% Al-ból és Si-ből állították elő vákuummetallurgiai eljárással a Hydro Aluminium Rolled Products GmbH-nál.

3.2. A kristályosodási út

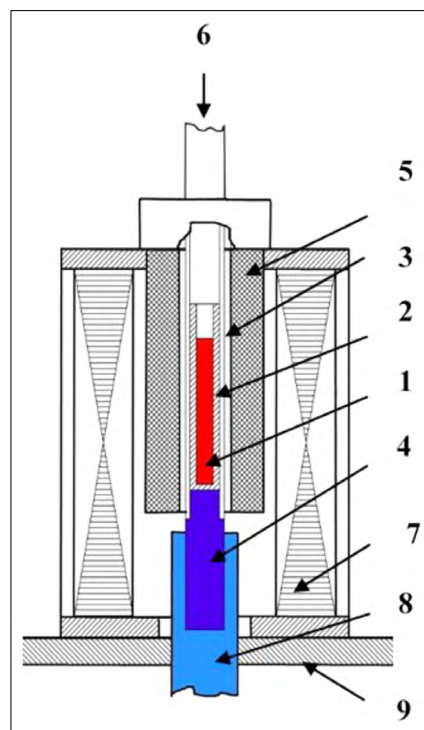
DTA kísérleteink alapján a binér Al–7 t% Si ötvözet kristályosodása 614 °C hőmérsékleten kezdődik α alumíniumdendritek keletkezésével. Ezt az Al-Si binér eutektikum kristályosodása követi 574 °C hőmérsékleten. Az eutektikum egyik része a szekunder vagy tercier dendritágak között, míg a többi része a primer dendritek vagy a szemcsék között található.

Az eutektikum számított egyensúlyi mennyisége az Al-Si egyensúlyi fázisdiagram alapján 48,5 t%. A szekunder dendritágak közötti eutektikum gyakran degenerálódik: az eutektikum α szilárdoldat része rákristályosodik a szekunder dendritárokra, az eutektikum Si-fázisa egyedül marad a szekunder dendritágak között. Ezért a mért eutektikum mennyisége kisebb lesz, mint a számított.

3.3. Kristályosító berendezés

3.3.1. Kemence

A kísérleteket függőleges Bridgman-típusú 4 fűtési zónával rendelkező csökemencében végeztük (2. ábra). A fűtési zónákat egymástól függetlenül szabályoztuk, hogy közel egyenletes hőmérséklet-eloszlást érjünk el a kemence hossz tengelye mentén. A kemence belső (hasznos) átmérője 20 mm, hossza 200 mm. A kemence falát vízzel hűtjük, hogy megvédjük a körülötte levő induktort a hőtől. A kemence maximális hőmérséklete 1000 °C, a maximális hőmérsékleti gradiens ~ 10 K/mm. A minta mozgási sebessége 2 $\mu\text{m/s}$ és 1000 $\mu\text{m/s}$ között változhat. A kemence alatt van egy vízhűtő kamra, amelybe a kísérletek során a hűtőtönköt fokozatosan, a minta mozgatási sebességével

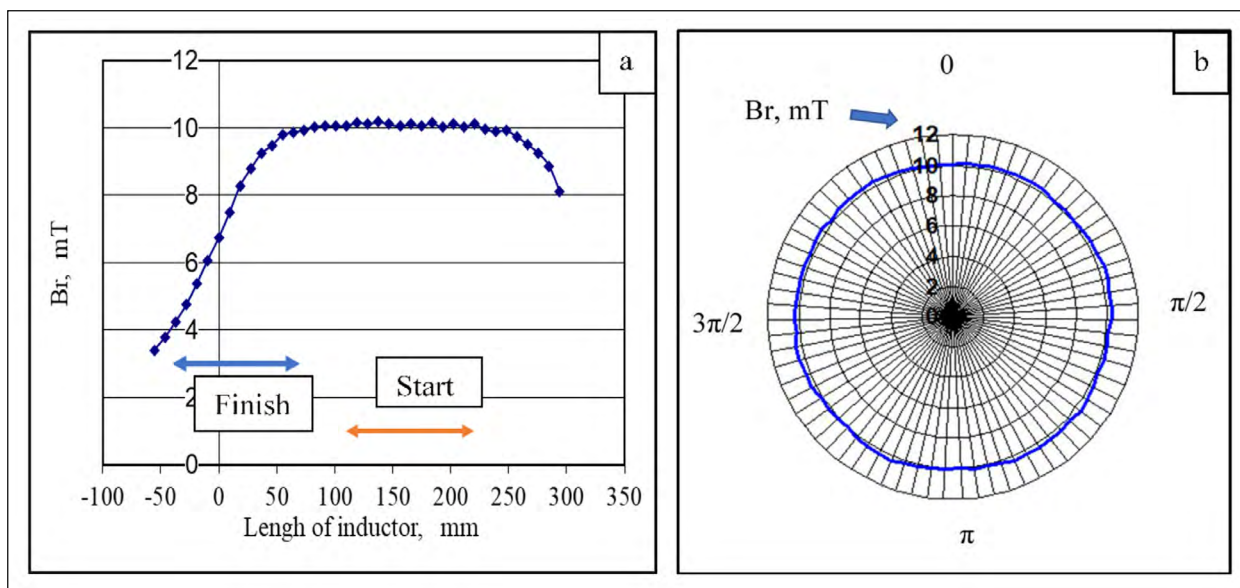


2. ábra. A kristályosító berendezés vázlata. 1: minta, 2: alumínium-oxid-kapszula, 3: kvarccső, 4: réz hűtőtönk, 5: kemence négy fűtési zónával, 6: stepmotor, 7: RMF induktor, 8: vízhűtő tank, 9: alaplapp

bemerítjük, így biztosítva a kívánt hőmérsékleti gradiens a mintában.

3.3.2. RMF induktor

A forgó mágneses teret a kemence köré épített 2 pólusú induktor hozza létre. A mágneses indukció (Br) radiális komponense a minta tengelye mentén (3a.



3. ábra. A mágneses indukció az induktor hossza (a) és tetszőleges síkon a szög (b) függvényében

ábra) és merőlegesen a minta tengelyére (3b. ábra) egy tetszőleges síkban a szög függvényében 10 mT és állandó volt a minta olvadék részében a kísérlet során. A mágneses indukció (B_z) axiális komponense 0,01 mT volt. A 3a. ábrán a „Start” és a „Finish” jelzi a minta helyét a kristályosodás kezdetén és végén.

A mágneses teret a Hartmann-számmal (Ha), az áramlási teret pedig a Reynolds-számmal (Re) és a pontos mágneses Taylor-számmal (Ta_m^*) jellemezhetjük [59]:

$$Ha = BR \sqrt{\frac{\sigma(\omega_0 - \omega)}{2\rho\nu\omega}} = 5,82, \quad (1)$$

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu} = 6,81 \times 10^2, \quad (2)$$

$$Ta_m^* = Ha^2 Re = \frac{\sigma B^2 R^4 (\omega_0 - \omega)}{2\nu^2 \rho} = 2,31 \times 10^4, \quad (3)$$

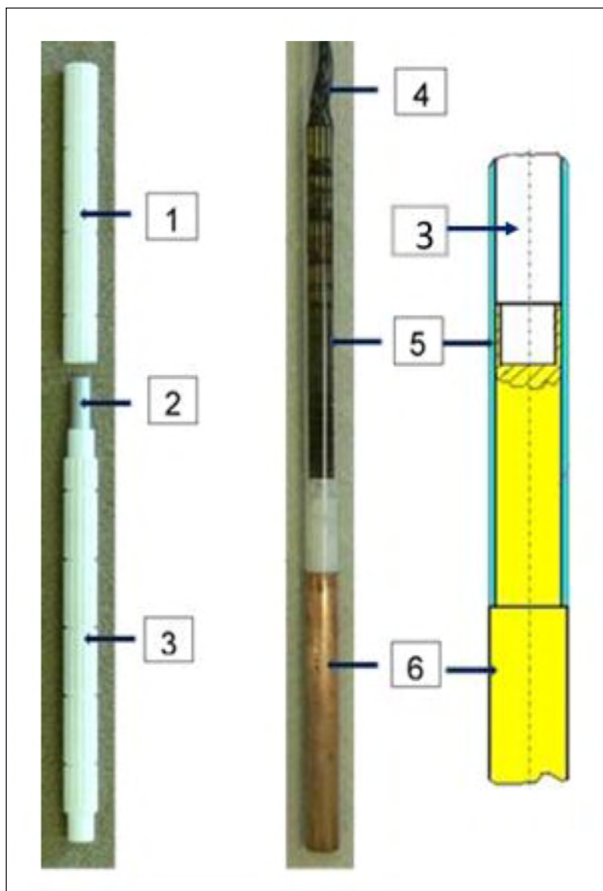
ahol

σ – az olvadék fajlagos elektromos vezetőképessége: 3,24 MS/m (630 °C [57])

B – mágneses indukció: 0,01 T

ω_0 – a mágneses tér körfrekvencia, 314 rad/s

ω – az olvadék-körfrekvencia: ≈ 20 rad/s ([59])



4. ábra. A kapszula szerkezete

R – a minta sugara: 0,004 m

ρ – olvadéksűrűség, 2390 kg/m³ (630 °C)

ν – az olvadék kinematikai viszkozitása:

$$4,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (630 °C [58])}$$

3.3.3. Minta és mintatartó

A minta átmérője 8 mm, hossza 100 mm volt (4. ábra). A (2) mintát egy ALOX kapszulába (1, 3) helyeztük. A hőmérséklet-eloszlást 12 ponton mértük K-típusú termoelemekkel. A termoelemeket az ALOX kapszulák felületén lévő horonyba helyeztük (4). A termoelemekkel ellátott ALOX kapszulát kvarccsőbe (5) tettük. A kvarccső alján egy rézből (6) készült hűtőtönköt csatlakoztattunk az ALOX kapszullához (3), amely a kísérlet közben folyamatosan sülyedt a vízbe az egyirányú hőelvezetés érdekében.

3.4. Kristályosodási kísérletek

Egyik korábbi cikkünkben [29] bemutattunk egy módszert, amellyel egynél több kísérletet végezhetünk egy mintán. Kimutattuk, hogy a minta szerkezete a mágneses tér be- és kikapcsolását követően egy rövid tranziens után megváltozott.

A jelen kutatásban ugyanezt a módszert alkalmaztuk. A minta első és harmadik 1/3 részét RMF nélkül, míg a második 1/3 részét RMF-fel kristályosítottuk. Ebben az esetben lehetővé vált az oszlopos/ekviaxiális (CET) és az ekviaxiális/oszlopos (ECT) átmenetek vizsgálata, valamint a keverés hatása a mezo- és mikroszerkezetre egy mintában. A minták mozgási sebessége 0,1 mm/s volt.

3.5. A kristályosodási paraméterek meghatározása

Mint korábban említettük, a hőmérsékletet 12 hőelemmel mértük. A két szomszédos hőelem közötti távolság 8 mm volt. A szilárd/olvadék határfelület sebességét (a likvidusz izoterma mozgási sebessége, v) és a hőmérsékleti gradienst (G) a határfelületen a lehűlési görbékéből számítottuk ki saját szoftver segítségével. A hőmérsékleti gradiens és a szilárd/olvadék határfelületi sebessége közel állandó és azonos volt a kristályosodás kezdetén (614 °C) és végén (574 °C) ($7 \pm 0,5$ K/mm és $0,105 \pm 0,02$ mm/s) a teljes mintában.

3.6. A minta előkészítése

A mintát műgyantába helyeztük, majd a hossztengelelyével párhuzamosan középen kettévágtuk. Gyémántpasztás nedves csiszolás és polírozás után a mintát 2%-os HF vizes oldatával marattuk a mikroszerkezet paramétereinek méréséhez (a szekunders dendritág távolsága (SDAS), a karácsonyfaszerű (CTL) szerke-

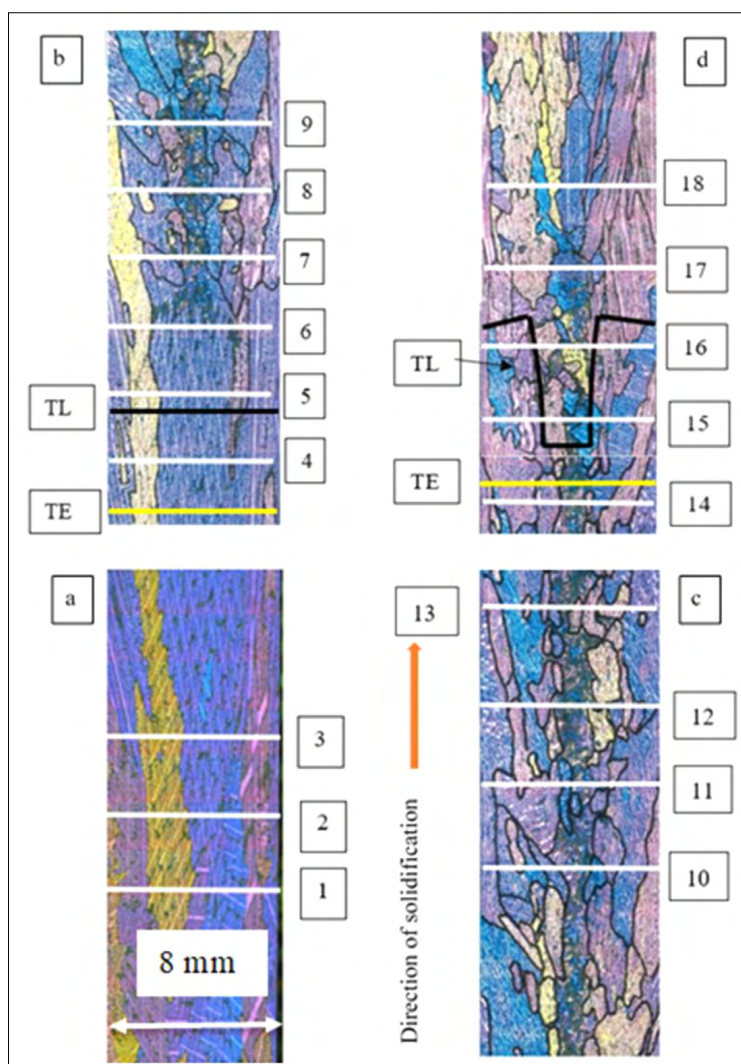
1. táblázat. A mérővonalak távolsága a minta aljától

A vonalak száma/távolság a minta aljától, mm						
Első nem kevert rész	1/19,8	2/22,1	2/25,1			
Első tranziens zóna	4/37,1	5/40,1	6/43,1	7/46,1	8/49,1	9/52,1
Kevert rész	10/58,4	11/61,4	12/64,4			
Második tranziens zóna	13/71,6	14/74,6	15/77,6	16/80,6	17/83,6	18/86,6

zet magjának átmérője és ágainak hossza, az eutektikum mennyisége és a makrodúsulás). Ezt követően Barker-marósszerrel marattuk a szemcseszerkezet (CET és ECT) vizsgálatához. Miután kivettük a mintákat a gyantából, a minta kevert és nem kevert részeit a tengelyére merőlegesen elvágtuk. Gyémántpasztás nedves csiszolás és polírozás után a keresztmetszeteket Barker-marósszerrel marattuk a primer dendritágtávolság (PDAS) és a szemcseszerkezet vizsgálatához.

3.7. Mérési módszerek

A primer dendritág távolságát (PDAS) a két nem kevert részen mértük meg az 5. ábra 2. és 18. vonalához közeli keresztmetszetben közvetlenül két PDA középpontja között mérve. Az átlagos PDAS-t 200 mért adatból számítottuk ki. A kevert részen lévő PDAS-t még a minta széle közelében sem lehetett meghatározni. A minta szélein a mezoszerkezet közel oszlopos volt, de az primer dendritágok nem voltak párhuzamo-



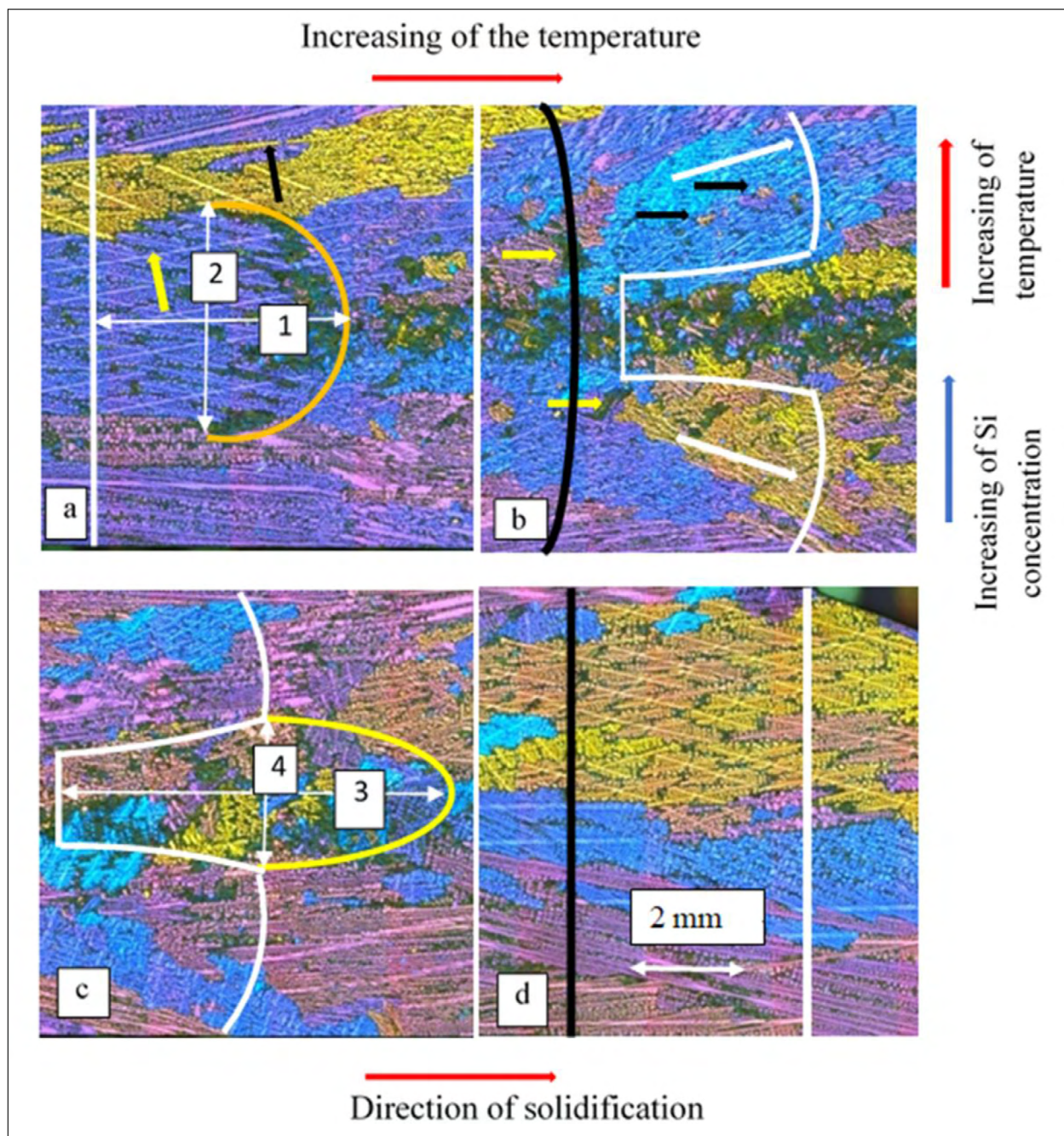
5. ábra. A minta szemcseszerkezete a mérési pontokkal (fehér vonalak): a) az első nem kevert rész, b) az első tranziens zóna (CET), c) kevert rész, d) a második tranziens zóna (ECT) és a második, nem kevert rész

sak a minta tengelyével.

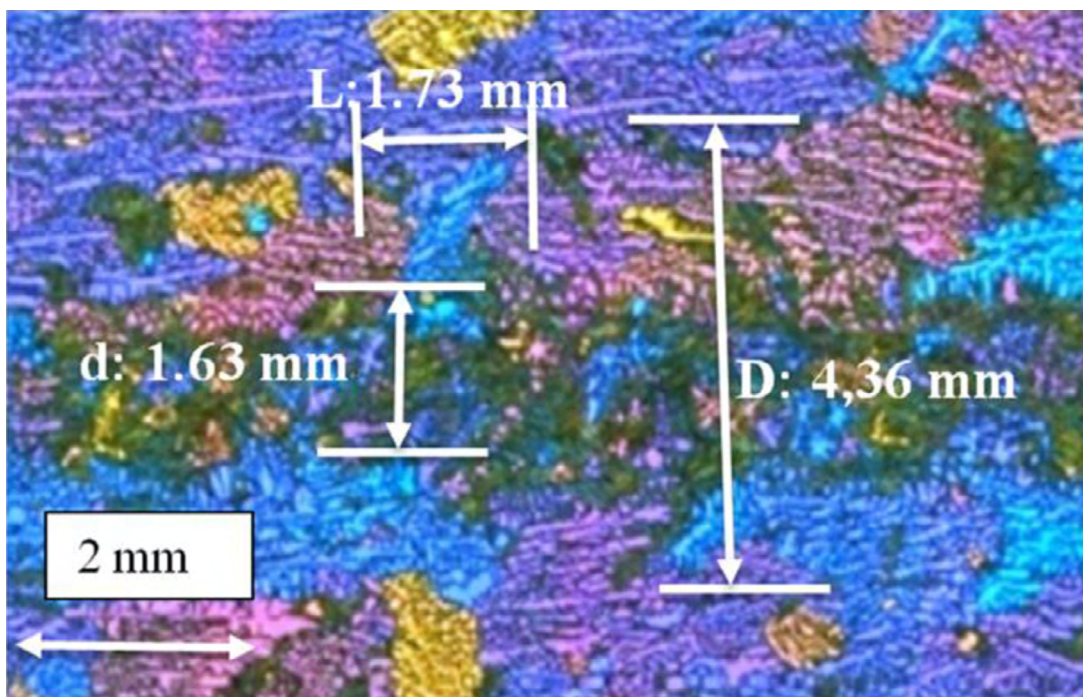
Az SDAS-t és az eutektikum mennyiségét a minta tengelyére merőleges 18 párhuzamos vonal mentén mértük a minta sugarának függvényében összesen (fehér vonalak az 5. ábrán). Az 1., 2. és 3. vonal az első nem kevert részben, a 4.–9. vonal a keverés bekapcsolásánál (első tranziens zóna), a 10., 11. és 12. vonal a kevert részben, a 13.–18. vonal pedig a keverés kikapcsolása utáni második tranziens zónában helyezkedtek el. Ezeknek a mérési vonalaknak a minta aljától való távolsága az 1. táblázatban látható. A mérőablak mérete 0,17 mm × 0,7 mm volt. Az

átlagos SDAS-t 200 mért adatból számítottuk ki. Az eutektikum térfogatát az ImageJ szoftverrel mértük. Az eutektikum- és a Si-koncentráció eloszlását az eutektikum térfogatából számítottuk ki. A mintasugár függvényében a koncentrációeloszlást a két tranziens zónában (4.–9. és 13.–18. vonal) etalon nélkül is meghatároztuk EDS-sel (Hitachi Scanning EM+ Brucker EDS).

A szemcsék paramétereit hossz- és keresztirányú metszeteken is meghatároztuk. A keresztmetszeten a szemcsék számát számoltuk, míg a párhuzamos met-



6. ábra. Szemcseszerkezet a minta párhuzamos metszetén különböző területeken: a) első tranziens zóna, b) kevert rész, c) második tranziens zóna, d) második nem kevert rész



7. ábra. A karácsonyfaszerű (CTL) szerkezet

szeten a szemcsék hosszát (L) és szélességét (W) mértük a szemcsék megszámlálása után.

4. Eredmények

4.1. A minta mezoszerkezetének kvalitatív jellemzése

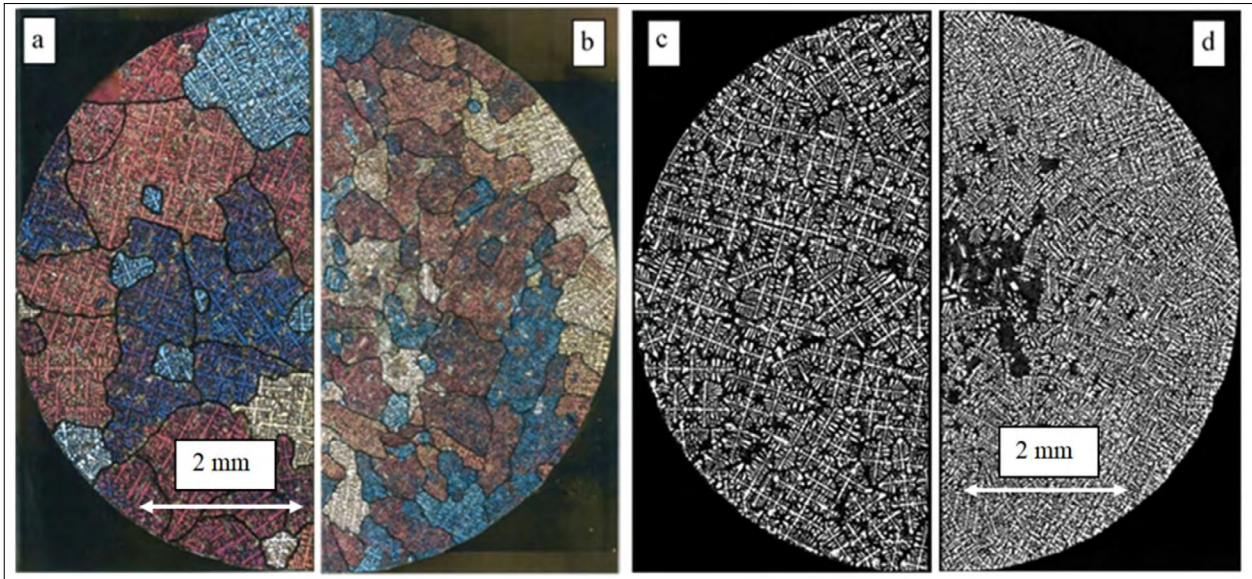
Az egyirányú hőelvonás eredményeként a minta első nem kevert 1/3 része oszlopos szerkezetű. A primer dendritágok (PDA-k) közel párhuzamosak a mintatengellyel (a hőelvonás irányával). A mágneses keverés bekapcsolásakor létre jött az első tranziens zóna. Ebben az esetben a likvidusz izoterma ($T_L = 614\text{ °C}$, ahol a kristályosodás megkezdődött) 38,58 mm-nél volt (a fekete vonal az 5b. ábrán és a fehér vonal a 6a. ábrán). Az eutektikus izoterma ($T_E = 574\text{ °C}$, ahol a kristályosodás éppen befejeződött) 34,3 mm-re volt a minta aljától (a sárga vonal az 5b. ábrán). A keverékszóna e két vonal között volt. A kristályosodás során a keverékszóna a minta aljától a teteje felé mozdult el. A PDAS tovább nőtt a keverés bekapcsolása után. A keverékszónában, a PDAS-ok között jelentős mennyiségű olvadék volt a szilárd/olvadék front mögött. Ennek az olvadéknak az átlagos koncentrációja nagyobb, mint az ötvözet átlagos koncentrációja. Az olvadékáramlás hatására az olvadéknak ez a része a minta szélétől a középpontja felé áramlott, és a primer dendritágok között több eutektikum alakult ki mint az egyensúlyi mennyiség (fekete területek a PDAS között a 6a. ábrán). Ezzel egyidejűleg a szekunder olvadékáramlás ezt a koncentrált olvadékot szállította a keverékszónából a szilárd/folyékony front előtti területre. Ezért a primer dendritágok növeke-

dése megállt (pl. a PDA, amelyet sárga nyíl jelez a 6a. ábrán), amikor az olvadékkoncentráció elérte az eutektikus összetételt a front előtt (sárga ív a 6a. ábrán), és az eutektikum megszilárdult egy úgynevezett „eutektikus kupola” kialakításával, így akadályozva a PDA-k további növekedését. A keverékszóna permeabilitása drasztikusan csökkent a keverékszóna tetejétől (likvidusz hőmérséklet) annak aljáig (eutektikus hőmérséklet). A Carman–Kozeny-törvény alapján kiszámítottuk, hogy a permeabilitás 95% olvadékfázis mellett (néhány fokkal a likvidusz hőmérséklete alatt) ~50-szer nagyobb, mint az eutektikus hőmérsékleten, ahol a olvadékfázis mennyisége csak ~50%. Ezért az áramlási sebesség drasztikusan csökkent a keverékszóna tetejétől az aljáig, és a fent említett folyamat csak annak teteje közelében alakulhat ki. Mivel az átlagos koncentráció csökkent a minta két szélén, a front előtt nem alakult ki eutektikus összetételű olvadék, a PDA-k szabadon növekedhettek (pl. a 6a. ábrán fekete nyíllal jelzett PDA).

Az első tranziens zónát követően a nagy koncentrációjú olvadék a minta szélétől a középpontja felé folyamatosan áramlik. Az átlagos koncentráció a minta közepén növekszik, és a szélén csökken. Néhány kis primer α szilárd oldatdendrit és sok Al-Si eutektikum található a minta közepén egy közel hengeres részben (a CTL magjában). Mivel $T_{am} = 2,31 \times 10^4 < 10^5$ kritikus értéknél és $Re = 6,82 \times 10^2$, a szekunder áramlás valószínűleg lamináris maradt. Hasonlóan a [18, 19] ben leírtakhoz, CTL mikrostruktúra alakult ki (6b. ábra). Néhány gyakorlatilag eutektikus részből álló „oldalág” meghatározott periodicitással nyúlik ki a

2. táblázat. A szemcsék paraméterei

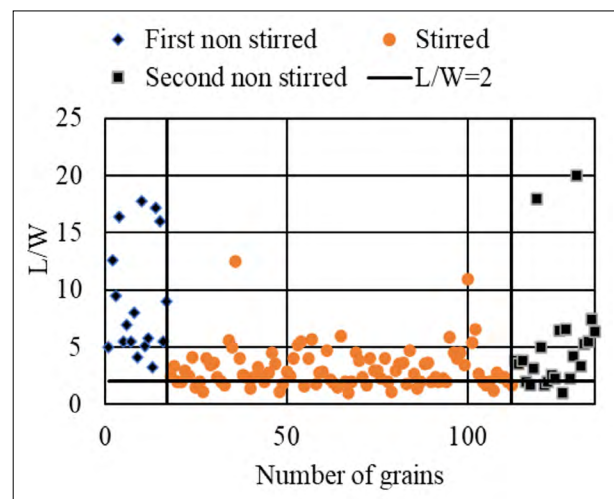
	Keresztmetszet			Hosszmetszet	
	Szemcse/ minta	Ekvivalens kör terület, mm ²	Ekvivalens átmérő, mm	Szemcse- szám	Átlagos hossz/ szélesség
Első nem kevert rész	55	0,9	1,08	17	9
Kevert rész	150	0,35	0,66	97	3,1
Második nem kevert rész	88	0,5	0,8	21	5,1



8. ábra. Szemcseszerkezet a keresztmetszeten: (a) első nem kevert rész, (b) kevert rész. Dendrites szerkezet: (c) első nem kevert rész, (d) kevert rész

hengeres részből (sárga nyilak a 6b. ábrán). Nagy oszlopos α szilárd oldatszemesek (dendritek) találhatók a minta két szélén. A Si koncentrációja kisebb a minta szélén (~5 t%), és nagyobb a közepén (~11 t%), mint az átlagos érték (7 t%). Így a likvidusz hőmérséklet a szélén nagyobb (~625 °C), közepén pedig kisebb (~580 °C), mint az ötvözeté (614 °C). Mivel az olvadákáramlás nagy hőmérsékletű olvadékot szállított felülről a szilárd/olvadék frontra a minta szélei mentén, az olvadék hőmérséklete ezekben a régiókban nagyobb volt, mint a CTL magja közelében. Ez a tény magyarázza a bonyolult szilárd/olvadék frontot és a keverékköna végét ezekben a régiókban (fehér és fekete vonalak a 6b. ábrán). Mivel a primer dendritágok merőlegesen nőnek a szilárd/olvadék frontra (a legnagyobb hőmérsékleti gradiens irányába), tengelyeik nem párhuzamosak a minta hossz tengelyével (fehér nyilak a 6b. ábrán). Sok apró szemcse is megtalálható a nagy szemcsék között (fekete nyilakkal jelölve), de mennyiségük túl kicsi volt ahhoz, hogy megakadályozzák az oszlopos növekedést; ezért az oszlopos szerkezet folyamatosan alakult át ekvixiális szerkezetté (progresszív CET).

A mágneses keverés kikapcsolása után a fekete és a sárga vonal a szilárd/olvadék frontot és a keverékköna végét mutatja (5d. ábra). Az olvadákáramlás gyakorlatilag azonnal leállt [62]. Előtte az áramlás nagy koncentrációjú olvadékot vitt a minta köze-

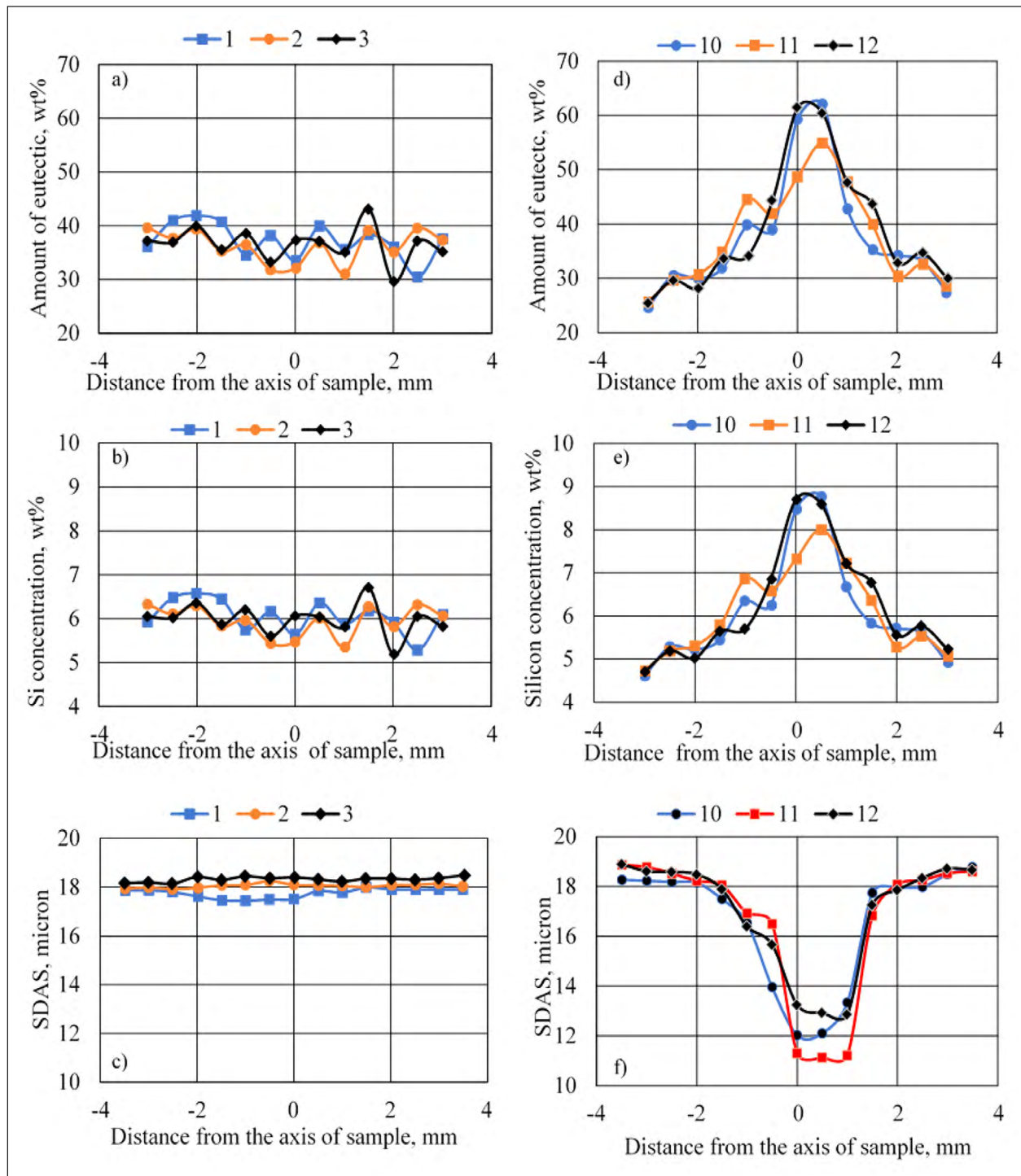


9. ábra. A szemcsék hosszának és szélességének az aránya a minta három különböző részén

pére és a szilárd/olvadék front elé (fehér vonalak a 6c. ábrán). Az eutektikum mennyisége folyamatosan csökkent a minta közepén a „sárga ív” csúcsáig, amely körülbelül 7 mm-re van a minta közepén lévő szilárd/olvadék fronttól („3” nyíl a 6c. ábrán). Ennek az „ívnek” a szélessége 2,5 mm.

A keverés kikapcsolása után a minta tengelyével közel párhuzamos dendritok gyorsabban nőttek, mint a többiek, akadályozva a többi dendrit növekedését.

Egy idő után ismét nagy oszlopos szemcsék (dendritok) kristályosodtak (6d. ábra, progresszív ekvixialis/oszlopos átmenet, ECT). Ez a folyamat hasonló az egykristály kristályosodásánál a szemcseszelekcióhoz [73]. A szilárd/olvadék front (fehér vonal a 6d. ábrán) és a keverékszóna vége (fekete vonal a 6d. ábrán) merőlegesek, és a primer dendritágak tengelye ismét majdnem párhuzamos a minta tengellyel.



10. ábra. Az eutektikum mért mennyisége: a) első nem kevert rész, d) kevert rész, a számított Si-koncentráció: b) az első nem kevert rész, e) kevert rész, az SDAS: c) az első nem kevert rész, f) kevert rész

4.2. A minta mezoszerkezetének kvantitatív leírása

4.2.1. A tranzien és kevert zónák paraméterei

Az első tranzien zóna (amely az első oszlopos zóna után alakult ki) 2 és 4,5 mm között van („1” nyíl a 6a. ábrán) a szilárd/olvadék fronttól a keverés bekapcsolásakor (fekete vonal az 5b. és 6a. ábrán). Az eutektikus kupola átmérője 3,8 mm („2” nyíl a 6a. ábrán). E zóna mellett (a minta két szélé közelében) a mikroszerkezet oszlopos maradt.

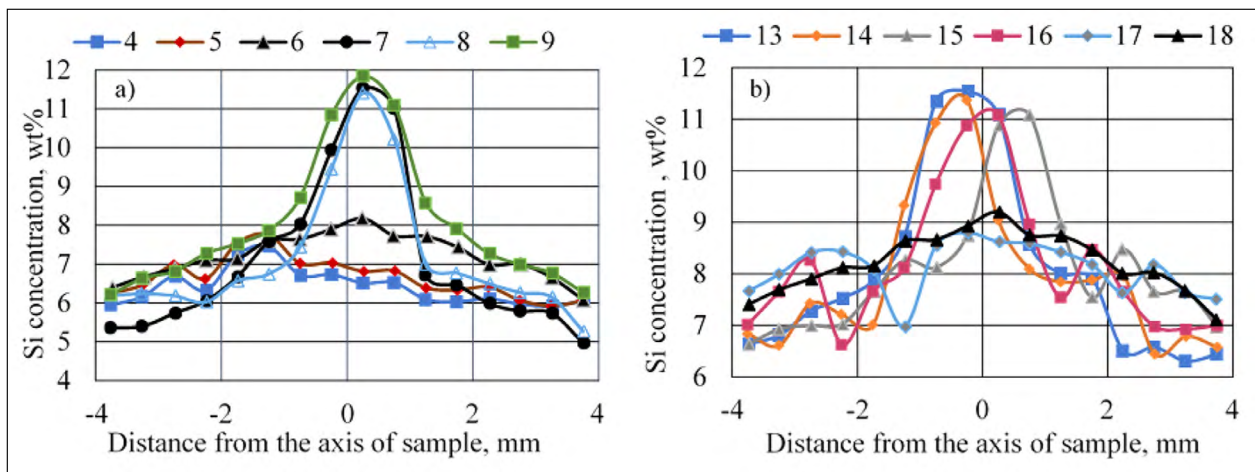
A keverés kikapcsolásakor a második tranzien zóna vége (a CTL-zóna eltűnése után) 7 mm-re van a minta közepén lévő szilárd/olvadék határfelületről („3” nyíl a 6c. ábrán). Maximális átmérője (ahol a mikroszerkezet a mag közelében ekvixiális) 3,8 mm („4” nyíl a 6c. ábrán).

A kevert rész egy részét a 7. ábra mutatja. A hengeres mag átmérője $d = 1,63$ mm, az oldalágak átmérője $D = 4,36$ mm, az oldalágak közötti távolság $L = 1,73$ mm. A d , D és L paramétereket 20 különböző

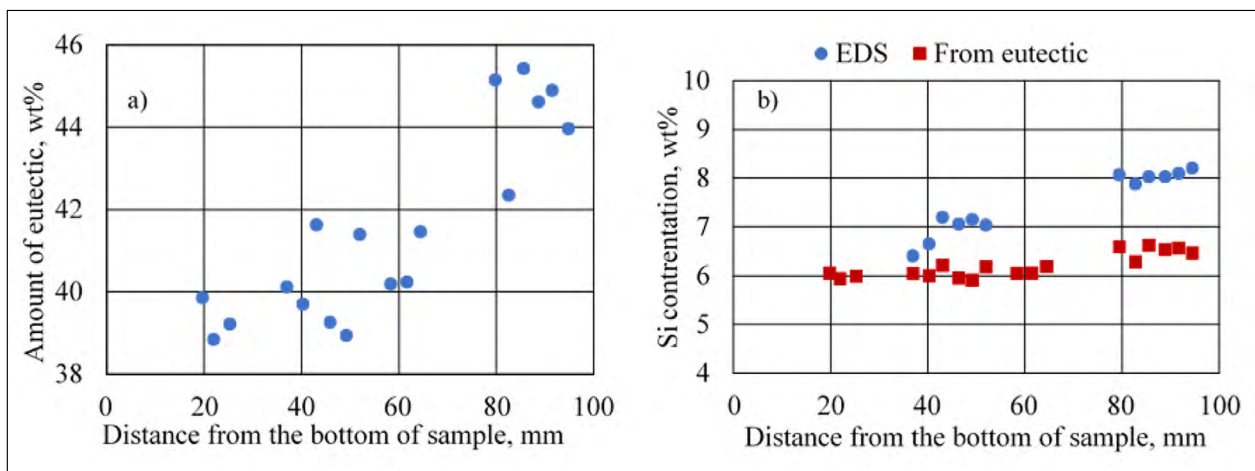
ponton mértük. Átlagos értékeik 1,51 mm, 3,78 mm és 1,62 mm.

4.2.2. A szemcse szerkezete

A szemcse szerkezetét a hossz- (5. ábra) és a keresztmetszeteken (6. ábra) is vizsgáltuk. A keresztmetszeten végzett vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a kevert részben a szemcseátmérő ~3-szor finomab, mint a nem kevert részben (lásd 8a. és 8b. ábrát, 2. táblázat). Az olvadákáramlás eredményeként néhány apró szilárd részecske (szekunder vagy tercier dendritágok részei) letörnek az oszlopos dendritekről. Ezek heterogén csírák lesznek, hasonlóan a szemcsefinomítás során használt anyagokhoz [70–72]. Néhányból új dendrit nőhet. A nagy hőmérsékletgradiens (7 K/mm) és a viszonylag kis szilárd/olvadék front sebessége (0,1 mm/s) miatt ezek az új dendritok is oszloposak lesznek. Ha ennek az új dendritnak (az új csírának) a száma nem túl nagy, együtt nőhetnek az



11. ábra. Az EDS-sel mért Si-koncentráció: (a) a keverés bekapcsolva, (b) a keverés kikapcsolva



12. ábra. (a) Az eutektikum átlagos mennyisége a minta tengelye mentén, (b) átlagos Si-koncentráció a minta tengelye mentén

eredetivel, keresztmetszetük és hosszuk kisebb lesz, mint az oszlopos dendritké, amely olvadákáramlás nélkül növekszik. Ez a progresszív oszlopos/ekviaxiális átmenet (PCET). Ha az új magok száma nagy az oszlopos dendritek között vagy a keverékszóna előtt a túlhűlt olvadékban, növekedésük akadályozhatja az eredeti oszlopos dendritek növekedését, és a mikroszerkezet ekviaxiálissá válik. Ez az éles (sharp) oszlopos/ekviaxiális átmenet (SCET).

A dendritikus szerkezet homogénebb, mint a nem kevert részben, azzal a különbséggel, hogy a közepén (a CTL magjában) van egy nagy koncentrációjú rész, amely eutektikumból és néhány kis dendritből áll. A nem kevert részben az eutektikum három különböző típusa látható, míg a kevert részben a primer dendritek között található többnyire az eutektikum.

A szemcsék hosszát (L) és szélességét (W) a minta hosszmetstetén mértük, és ebből számítottuk ki az L/W arányt. Az eredményeket a 9. ábra és a 2. táblázat mutatja. Ha az L/W arány 2,0 felett van, a szemcsék oszloposnak tekinthetők [56]. Az első, nem kevert rész szemcseszerkezete teljesen oszlopos, a második, nem kevert részében oszlopos (5. ábra). A primer dendritek növekedési iránya közel párhuzamos a minta hossztenegelyével (a hőelvonás iránya). A kevert rész részben oszlopos, a minta szélein az L/W arány 2,0 felett van, tehát ez a rész oszlopos, míg a mag közelében lévő L/W arány 2,0 alatt van, ezért ez a rész ekviaxiális. A kevert részben a szemcsék (a PDA) tengelye $\sim 30^\circ$ -ot zár be a minta hossztenegelyével (fehér nyilak a 6b. ábrán).

4.2.3. A minta mikroszerkezete

A mért primer dendritágtávolság (PDAS) az első nem kevert részben (a 2. vonal mentén) 370 μm , míg a második, nem kevert részben (a 18. vonal mentén) 270 μm volt. A primer dendritág távolsága a G -től és a v -től függ: $\text{PDAS} = K(\Delta T)^{0,25} \cdot G^{-0,5} \cdot v^{-0,25}$ [65, 67, 69]. A gyakorlatban G és v kitevője $-0,25$ és $-0,5$ között van [66–68]. A PDAS aránya a 2. és a 18. vonalnál mérve $370/270 = 1,37$. A v a 2. vonalnál 0,08 mm/s, a 18. vonalnál pedig 0,14 mm/s volt (egy kicsit kevesebb, illetve több, mint a minta középső részén). Állandónál G -nél a számított PDAS aránya $[v(2. \text{ vonal})/v(18. \text{ vonal})]^{-0,25}$, így a PDAS-ok aránya 1,18 és 1,41 között változhat.

A K állandó tartalmazza a kristályosodási hőmérséklet-intervallumot: $\Delta T = T_L - T_E$. Ha az átlagos koncentráció nagyobb, a ΔT kisebb. Az első és a harmadik részben az átlagos koncentráció 6 t%, illetve 8 t%, így a ΔT 45 $^\circ\text{C}$, illetve 31 $^\circ\text{C}$, és a makroszegregáció hatása a PDAS-ra $\sim 10\%$ $[(45/31)^{0,25} = 1,1]$. Ez a két hatás az PDAS csökkenésének oka.

Az eutektikum mennyiségét és a szekunder dendritág-távolságot (SDAS) mind a 18 jelzett vonal mentén megmértük (lásd 5. ábra). A Si-koncentrációt a korábban említett eutektikum mennyiségéből számítottuk ki. A 10. ábrán ezeket az értékeket az első nem kevert (1., 2. és 3. vonal) és a kevert részek (10., 11. és 12. vonal) esetében hasonlítjuk össze.

Az első, nem kevert részben az eutektikum mennyisége és a számított Si-koncentráció a minta sugarának függvényében közel állandó (10a. és 10b. ábra). Átlagos értékük 39,3 t%, illetve ~ 6 t%. Az eutektikum mennyisége kisebb, mint az elméleti egyensúlyi fázisdiagramból számított 48,5 t%. A számított átlagos Si-koncentráció szintén kisebb, mint az ötvözet átlagos koncentrációja (7 t%). A mért és az elméleti értékek közötti különbség azt mutatja, hogy az eutektikum körülbelül 10%-a degenerálódott. A szekunder dendritág-távolság (SDAS) közel állandó a minta sugara mentén, az átlag 18,5 μm (10c. ábra).

A jól ismert egyenlettel [62–64, 67, 69] számított SDAS jó egyezést mutat a mérttel:

$$\begin{aligned} \text{SDAS} &= K \left(\frac{\Delta T}{G \cdot v} \right)^{1/3} \\ &= 4,5 \times \left(\frac{614 - 574}{7 \times 0,1} \right)^{1/3} = 16,88 \mu\text{m}. \end{aligned} \quad (4)$$

A kevert részben (10., 11. és 12. vonal) a CTL mikroszerkezetet a primer áramlás hozta létre. A minta szélein az eutektikum mennyisége csak 30 t% vagy valamivel kevesebb, és a középpont felé fokozatosan növekedik, a maximális érték 62 t% (10d. ábra). A számított Si-koncentráció 5 t%-ról 9 t%-ra nőtt. Az SDAS értéke fordítottan arányos a Si-koncentrációval, így a legkisebb SDAS a legnagyobb Si-koncentrációhoz tartozik. A széleken az SDAS 19 μm (valamivel nagyobb, mint a nem kevert részben, mert a Si-koncentráció kisebb), a minimális érték pedig ~ 12 μm a minta közepén (10e. ábra).

A két tranziens zónában a Si-koncentráció eloszlását a minta sugarának a függvényében mértük közvetlenül EDS-sel (Hitachi Scanning EM+ Brucker EDS). A mért eloszlásokat a 11a. ábra (4.–9. vonal, első tranziens zóna) és a 11b. ábra (13.–18. vonal, második tranziens zóna) mutatja.

A 4. vonal a keverékszóna közepén volt (sárga vonal: TE, fekete vonal: TL az 5. ábrán), amikor a keverés be volt kapcsolva. Mivel a keverékszóna ezen részének permeabilitása nagyon kicsi, a keverés hatása is kicsi. A minták közepén a Si-koncentráció valamivel nagyobb ($\sim 6,5$ t%), a széleken pedig valamivel kisebb (5,5–5,8 t%), mint a nem kevert részben mért eutektikum mennyiségéből számított átlagos érték (6 t%). Az 5. és 6. vonal a szilárd/olvadék front előtt volt, amikor

a keverés be volt kapcsolva, a keverőhatás nagyobb volt; ezért a Si-koncentráció is nagyobb a középpontban (7 t% és 8 t%). Az úgynevezett „eutektikus kupola” a 6. és 7. vonal között alakult ki. A 7., 8. és 9. vonal a kevert részben található. A koncentrációeloszlások e vonalak mentén nagyon hasonlóak a 10., 11. és 12. vonal mentén levő koncentrációeloszláshoz azzal a különbséggel, hogy a magban mért koncentráció abszolút értékei nagyobbak, mint az eutektikum mennyiségéből kiszámítottak. A számított és a mért koncentrációk közötti különbségeknek két oka van: az egyik az, hogy az eutektikum egyes részei degenerálódhatnak (ahogy fentebb említettük), a másik pedig az, hogy az Al és Si csúcsai (EDS-sel mérve) átfedésben vannak az EDS spektrumokon. Elválasztásuk etalon nélkül pontatlan. Ezekből a mért koncentrációeloszlásokból egyértelműen kiderül, hogy a CTL szerkezete a keverés bekapcsolása után fokozatosan alakul ki.

A keverékhőzóna a sárga és a fekete vonal között volt (5d. ábra), amikor a keverés ki volt kapcsolva. A 13. és 14. vonal a kevert részben volt, és a koncentrációeloszlás hasonló volt a 10., 11. és 12. vonal mentén. A 15-ös vonal az alján, a 16-os vonal pedig a keverékhőzóna tetején volt. A koncentrációeloszlások ezen vonalak mentén nagyon hasonlóak, ami azt jelenti, hogy a minta közepén makrodúsulás alakult ki a kristályosodás kezdetén, amikor a szilárd frakció tartalom alacsony volt, és a keverékhőzóna permeabilitása nagy volt. Végül a 17-es és 18-as vonal a keverékhőzóna előtt volt, amikor a keverést kikapcsoltuk. A Si-koncentráció a középpontban és a minta szélein ~9 t% és ~7.5 t%. Ez azt jelenti, hogy a szekunder áramlás nagy koncentrációjú olvadékat szállított a keverékhőzóna elejére, mielőtt a keverést kikapcsoltuk.

Az eutektikum átlagos mennyiségét és az eutektikum mennyiségéből számított Si-koncentrációt a 12a. és 12b. ábra mutatja a vizsgált vonalak mentén. Az eutektikum mennyisége ~40 t%-ról 45 t%-ra, míg a számított koncentráció 6 t%-ról 7 t%-ra nőtt. Ennek a jelenségnek az oka a szekunder olvadékáramlás (párhuzamos a minta tengelyével), amely a Si-t a „tulipánkehelyből” szállította (lásd a 6c. ábra) – ahol a Si-koncentráció meghaladja az átlagot – a minta teteje irányába. Ez a hatás nem volt túl erős, mert a szekunder olvadékáramlás sebessége kisebb volt, mint az primer áramlásé, és a szilárd/olvadék front sebessége nagy volt. Az EDS-sel mért Si-koncentráció nagyobb, mint a számított érték (okait korábban kifejtettük), de a jelenség ugyanaz.

5. Összefoglalás és következtetések

Az Al–7 t% Si ötvözetet egyirányúan kristályosítottuk egy korábban kifejlesztett saját módszerrel: a minta első és harmadik 1/3 részét mágneses keverés nélkül, a második 1/3 részt (a két nem kevert rész

között) mágneses keveréssel kristályosítottuk. A szilárd/olvadék front sebessége, a hőmérséklet-gradiens és a mágneses indukció rendre 0,1 mm/s, 7 K/mm és 10 mT volt. Ezzel a módszerrel lehetővé vált az oszlopos/ekvixiális (CET) és az ekvixiális/oszlopos (ECT) átmenet vizsgálata. A mezo- és mikroszerkezetet részletesen vizsgáltuk, így ebben a kutatásban adatok találhatók a szimulációk validálására, pl. a primer és szekunder dendritágok távolsága, a karácsonyfaszerű (CTL) mikroszerkezet geometriai paraméterei, a szemcsék paraméterei, a koncentrációeloszlás a nem kevert és kevert részekben. A fenti mérések alapján a következő főbb következtetéseket lehetett levonni:

- 1) Progresszív oszlopos/ekvixiális átmenet (CET) alakult ki a mágneses keverés hatására. A minta kevert részében karácsonyfaszerű (CTL) mezoszerkezet kristályosodott, közel hengeres maggal és sok oldalágakkal. A magban és az oldalágakban az eutektikum mennyisége (és így a Si-koncentráció) nagyobb, míg a minta szélein alacsonyabb, mint az ötvözet átlag koncentrációja.
- 2) A kevert részben a dendritikus szerkezet homogénebb, mint a nem kevert részben. A szekunder dendritágtávolság (SDAS) a minta sugara mentén változik, a két szélén nagyobb, mint az átlagérték, míg középen az átlagértéknél kisebb.
- 3) A szemcsék a kevert rész két szélén oszloposak, de a primer dendritágak nem párhuzamosak a minta tengelyével, és a szemcsék a CTL magjához közel ekvixiálisak. A kevert részben lévő szemek száma a keresztmetszetben háromszor annyi, mint a nem kevert részben.
- 4) A keverés kikapcsolása után az olvadékáramlás azonnal leáll, a CTL mikroszerkezet progresszív ekvixiális/oszlopos átmenettel (progresszív ECT) oszlopossá alakul.
- 5) A szekunder olvadékáramlás eredményeként mérsékelt makrodúsulás alakult ki a minta hossza mentén.

Köszönetnyilvánítás

A jelen munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Vizsgálati Hivatal „Megszilárdult szerkezet és makroszegregáció kialakulása egyirányú kristályosodás vonalán szabályozott áramlási körülmények között” című projektje (No. 130946) keretében valósítottuk meg.

Acronyms

PDA: Primary Dendrite Arm: Primer Dendritág
 PDAS: Primary Dendrite Arm Spacing: Primer Dendritág Távolság
 SDA: Secondary Dendrite Arm: Szekunder Dendritág

SDAS: Sucondary Dendrite Arm Spacing: Szekunder Dendritág
 EDS: Electron Energy Spectrometer
 SEM: Scanning Electron Microscop
 CET: Columnar/Equiaxed Transition: oszlopos/ekviaxiális átmenet
 ECT: Equiaxed/Columnar Transition: ekviaxiális /oszlopos átmenet
 PCET: Progresive CET: folamatos CET
 CTL: Cristhmas Tree Like: karácsonyfa szerű
 SCET: Sharp CET: éles (hirtelen) CET
 RMF: Rotated Magnetic Field: forgó mágneses mező

Irodalom

- [1] M. Wu, A. Ludwig, A. Kharicha: *Steel Res. Int.* 87 (2017) 1700037.
- [2] J. Li, M. Wu, A. Ludwig, A. Kharicha: *Int. J. Heat Mass Transf.* 72 (2014) 668–679. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2013.08.079>
- [3] S. Michelic, M. Riedler: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 161 (2016) S39–S43. <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0464-8>
- [4] L. Heyvaert, M. Bedel, M. Založnik, H. Combeau: *Metall. Mater. Trans. A* 48 (2017) 4713–4734. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4238-z>
- [5] A. Roósz, Z. Gácsi, E. Fuchs: *Acta Metall.* 32 (1984) 1745–1754. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90231-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(84)90231-1)
- [6] A. Roósz, H. E. Exner: *Acta Metall. Mater.* 38 (1990) 375–380. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(90\)90068-R](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90068-R)
- [7] G. Kasperovich, T. Volkman, L. Ratke, D. Herlach: *Metall. Mater. Trans. A* 39 (2008) 1183–1191. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9505-6>
- [8] R. Chen, Q. Xu, B. Liu: *J. Mater. Sci. Technol.* 30 (2014) 1311–1320. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.06.006>
- [9] O. Shatbhai, S. Roy, S. Ghosh: *Appl. Therm. Eng.* 113 (2017) 386–412. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.003>
- [10] G. Guillemot, C.-A. Gandin, H. Combeau: *ISIJ Int.* 46 (2006) 880–895. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.880>
- [11] M. Wu, A. Ludwig: *Metall. Mater. Trans. A* 37 (2006) 1613–1631. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0104-0>
- [12] M. Wu, A. Ludwig: *Acta Mater.* 57 (2009) 5632–5644. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.067>
- [13] V. Voller, C. Prakash: *Int. J. Heat Mass Transf.* 30 (1987) 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90317-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90317-6)
- [14] J. Ni, C. Beckermann: *Metall. Mater. Trans. B* 22 (1991) 349–361. <https://doi.org/10.1007/BF02651234>
- [15] M. Wu, A. Ludwig, A. Bührig-Polaczek, M. Fehlbier, P. R. Sahm: *Int. J. Heat Mass Transf.* 46 (2003) 2819–2832. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00054-1)
- [16] M. Wu, A. Fjeld, A. Ludwig: *Comput. Mater. Sci.* 50 (2010) 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.07.005>
- [17] M. Wu, A. Ludwig, A. Fjeld: *Comput. Mater. Sci.* 50 (2010) 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.07.006>
- [18] O. Budenkova, A. Noeppel, J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz, A. M. Bianchi, F. Baltaretu, M. Medina, Y. Fautrelle: *Mater. Sci. Forum* 649 (2010) 269–274. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.649.269>
- [19] H. Zhang, M. Wu, Y. Zheng, A. Ludwig, A. Karicha: *Mater. Today Commun.* 22 (2020) 100842. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100842>
- [20] S. Steinbach, L. Ratke: *Metall. Mater. Trans. A* 38 (2007) 1388–1394. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9162-1>
- [21] P. Mikołajczak, L. Ratke: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 27 (2012) 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/27/1/012024>
- [22] C. H. U. Gomes, R. H. L. Kikuchi, A. D. Barros, J. N. S. da Silva, M. A. P. D. da Silva, A. L. S. Moreira, O. F. L. da Rocha: *Mater. Res.* 18 (2015) 1362–1371. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.036315>
- [23] G. Reinhart, C. A. Gandin, N. Mangelinck-Noël, H. Nguyen-Thi, J. E. Spinelli, J. Baruchel, B. Billia: *Acta Mater.* 61 (2013) 4765–4777. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.067>
- [24] M. D. Dupouy, D. Camel: *J. Cryst. Growth* 183 (1998) 469–489. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(97\)00415-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(97)00415-6)
- [25] J. E. Spinelli, I. L. Ferreira, A. Garcia: *J. Alloys Compd.* 384 (2004) 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.04.098>
- [26] W. D. Griffiths, L. Xiao, D. G. McCartney: *Mater. Sci. Eng. A* 205 (1996) 31–39. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09859-3](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09859-3)
- [27] Y. Z. Li, N. Mangelinck-Noël, G. Zimmermann, L. Sturz, H. Nguyen-Thi: *J. Alloys Compd.* 836 (2020) 155458. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155458>
- [28] H. Nguyen-Thi, G. Reinhart, B. Billia: *C. R. Mec.* 345 (2017) 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.10.007>
- [29] A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: *Trans. Indian Inst. Met.* 62 (2009) 475–477. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0078-x>
- [30] D. R. Liu, N. Mangelinck-Noël, C.-A. Gandin, G. Zimmermann, L. Sturz, H. Nguyen Thi, B. Billia: *Acta Mater.* 64 (2014) 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.10.038>
- [31] I. V. Barmin, A. S. Senchenkov, A. Greif, O. Pätzold, U. Wunderwald, A. Cröll, A. Mitric: *Magnetohydrodynamics* 45 (2009) 325–332. <https://doi.org/10.22364/mhd.45.3.3>
- [32] Y. Z. Li, N. Mangelinck-Noël, G. Zimmermann, L. Sturz, H. Nguyen-Thi: *J. Alloys Compd.* 749 (2018) 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.300>
- [33] G. Zimmermann, L. Sturz, H. Nguyen-Thi, N. Mangelinck-Noël, Y. Z. Li, C.-A. Gandin, R. Fleurisson, G. Guillemot, S. McFadden, R. P. Mooney, P. Voorhees, A. Roósz, A. Rónaföldi, C. Beckermann, A. Karma, C.-H. Chen, N. Warnken, A. Saad, G.-U. Grün, M. Grohn: *JOM* 69 (2017) 1269–1279. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2397-4>
- [34] E. G. Fuchs: *Mater. Sci. Forum* 649 (2010) 1–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.649.1>

- [35] G. Chirita, D. Soares, F.S. Silva: *Mater. Des.* 29 (2008) 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.011>
- [36] J.F. Löffler, W.L. Johnson: *Intermetallics* 10 (2002) 1167–1175. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(02\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(02)00155-3)
- [37] Y. Yang, B. Song, Z. Yang, G. Song, Z. Cai, Z. Guo: *Materials (Basel)* 9 (2016) 1001. <https://doi.org/10.3390/ma9121001>
- [38] A. Viardin, R. Berger, L. Sturz, M. Apel, U. Hech: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 117 (2016) 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/117/1/012007>
- [39] A. Viardin, J. Zollinger, L. Sturz, M. Apel, J. Eiken, R. Berger, U. Hecht: *Comput. Mater. Sci.* 172 (2020) 109358. <https://doi.org/10.1016/j.commat-sci.2019.109358>
- [40] A. Roósz, A. Rónaföldi, J. Kovács, M. Svéda: Effect of low Rotating Magnetic Field (RMF) induced melt flow on the microstructure of unidirectionally solidified Al-7wt.%Si-1wt.%Fe alloy. In: *Proceedings of the 6th Decennial International Conference on Solidification Processing, Old Windvonal, (2017)* 308–311.
- [41] Svéda, A. Sycheva, J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz: Effect of rotating and travelling magnetic field on the solidified structure of peritectic Sn–Cd alloy directional solidification of Al-7wt.% Si alloy. *Mater. Sci. Forum* 649 (2010) 269–274. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.649.269>
- [42] J. Kovács, A. Rónaföldi, G. Gergely, Z. Gácsi, A. Roósz: Characterisation of the structure of Al-7Si-0.6 Mg alloys solidified unidirectionally in a rotating magnetic field. In: *Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing, Sheffield, (2007)* 405–410.
- [43] Y. Zuo, J. Cui, D. Mou, Q. Zhu, X. Wang, L. Li: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 24 (2014) 2408–2413. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63364-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63364-1)
- [44] G. Gerbeth, K. Eckert, S. Odenbach: *Eur. Phys J. – Spec. Top.* 220 (2013) 123–137. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01802-7>
- [45] H. Li, J. Jie, H. Chen, P. Zhang, T. Wang, T. Li: *Mater. Sci. Eng. A* 624 (2015) 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.064>
- [46] S.C. Lim, P.E. Yoon, J.S. Kim: *J. Mater. Sci. Lett.* 16 (1997) 104–109. <https://doi.org/10.1023/A:1018525506838>
- [47] B. Willers, S. Eckert, U. Michel, I. Haase, G. Zouhar: *Mater. Sci. Eng. A* 402 (2005) 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.108>
- [48] B. Frago, H. Santos: *J. Mater. Res. Technol.* 2 (2013) 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2012.12.001>
- [49] S. Nafisi, D. Emadi, M.T. Shehata, R. Ghomashchi: *Mater. Sci. Eng. A* 432 (2006) 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.076>
- [50] J. Kovács, G. Gergely, Z. Gácsi, A. Roósz, A. Rónaföldi: *Trans. Indian Inst. Met.* 60 (2007) 149–154.
- [51] J. Kovács, A. Rónaföldi, Á. Kovács, A. Roósz: *Trans. Indian Inst. Met.* 62 (2009) 461–464. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0085-y>
- [52] T. Wang, E. Wang, Y. Delannoy, Y. Fautrelle, O. Budenkova: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 529 (2019) 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/529/1/012030>
- [53] H. Zang, M. Wu, A. Ludwig, A. Kharicha: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 861 (2020) 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/861/1/012048>
- [54] D.R. Liu, N. Mangelinck-Noel, Ch-A. Gandin, G. Zimmermann, L. Sturz, N. Nguen Thi, B. Billia: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 117 (2016) 01009.
- [55] J.D. Hunt: *Mater. Sci. Eng.* 65 (1984) 75–83. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(84\)90201-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(84)90201-5)
- [56] Y. Sun, H. Muta, K. Kurosaki, Y. Ohishi: *Int. J. Thermophys.* 40 (2019) 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2497-1>
- [57] O.A. Chikova, K.V. Nikitin, O.P. Moskovskikh, V.S. Tsepelev: *Acta Metall. Slovaca* 22 (2016) 153–163. <https://doi.org/10.12776/ams.v22i3.774>
- [58] A. Rónaföldi, Zs. Veres, A. Roósz: *Cryst. Growth* 564 (2021) 126078. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126078>
- [59] Ph. Marty, L. Martin Witkowski, P. Trombetta, T. Tomasino, J.P. Garandet: On the stability of rotating MHD flows. *Transfer Phenomena in Magnetohydrodynamic and Electroconducting Flows* (1997) 327–343. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4764-4_23
- [60] O. Budenkova, F. Baltaretu, J. Kovács, A. Roósz, A. Rónaföldi, A-M. Bianchi, Y. Fautrelle: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 33 (2012) 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/33/1/012046>
- [61] A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: Investigation of transient phenomena generated by the on- and off switching of a rotating magnetic field in case of the unidirectional solidification of aluminum alloy. In: *Proceedings of 6. International Electromagnetic Processing of Materials (EPM) Conference, Dresden, (2009)* 628–632.
- [62] N. Whisler, T.Z. Kattamis: *J. Cryst. Growth* 15 (1972) 20–24. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(72\)90315-6](https://doi.org/10.1016/0022-0248(72)90315-6)
- [63] D.H. Kirkwood: *Mater. Sci. Eng.* 73 (1985) L1–L4. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(85\)90319-2](https://doi.org/10.1016/0025-5416(85)90319-2)
- [64] A. Roósz: *Cast Met.* 1 (1988) 223–226. <https://doi.org/10.1080/09534962.1988.11818972>
- [65] W. Kurz, D.J. Fisher: *Fundamental of Solidification*, Third Edition, Trans. Tech Publication, 1992.
- [66] D.G. McCartney, J.D. Hunt: *Acta Mater.* 29 (1981) 1851–1863. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(81\)90111-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(81)90111-5)
- [67] J. Jacobi, K. Schwerdtfeger: *Metall. Trans. A* 7 (1976) 811–820. <https://doi.org/10.1007/BF02644078>
- [68] M.A. Taha: *J. Mater. Sci. Lett.* 5 (1986) 307–310. <https://doi.org/10.1007/BF01748087>
- [69] D. Bouchard, J.S. Kirkaldy: *Metall. Mater. Trans. B* 28 (1997) 651–663. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0039-x>
- [70] C. Zhao, Y. Li, J. Xu, Q. Luo, Y. Jiang, Q. Xiao, Q. Li: *J. Mater. Sci. Technol.* 94 (2021) 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.02.065>
- [71] Y. Li, Y. Jiang, B. Liu, Q. Luo, B. Hu, Q. Li: *J. Mater. Sci. Technol.* 65 (2021) 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.075>
- [72] Y. Lia, B. Hu, B. Liu, A. Nie, Q. Gu, J. Wang, Q. Li: *Acta Mater.* 187 (2020) 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.039>

Critical Raw Materials Hungary Data Collection: Rare earth elements indications in Hungary

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből: Ritkaföldfém-indikációk Magyarországon

CSILLA BALASSA, PhD student, CSILLA PATAKY, MSc student,
CSABA TÁTRAI, MSc student, KRISZTIÁN ANTAL, MSc student,
IVÁN GYENES, BSc student, SÁNDOR SZAKÁLL, professor emeritus,
JÁNOS FÖLDESSY, professor emeritus
TEKH College, University of Miskolc

The Natural Resources Research and Utilization (TEKH) Special College of the Faculty of Earth and Environmental Sciences and Engineering, University of Miskolc set a goal in 2023 to pay special attention to critical raw materials (CRM). In addition to presenting the individual raw material types, it is also important to describe the Hungarian CRM anomalies. This article is dedicated to presenting the various rare earth elements (REE) indications, regardless of the type of geological formation containing the anomaly. Our starting point was the CriticEl project running in the 2010s, but where possible, we expanded the previous results with new ones. Although volcanic formations can also carry exceptionally high concentrations (Mecsek phonolite, Velence beforite), from an economic perspective, sedimentary deposits (Transdanubian bauxites, Mecsek coals) are more promising.

Keywords: Critical Raw Materials, rare earth elements, Hungary, metamorphites, alkaline magmatites, metamorphic volcanics, sedimentary deposits

A Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karán működő Természeti Erőforrás Kutatás és Hasznosítás (TEKH) Szakkollégium 2023-ban célul tűzte ki, hogy az Európai Unió törekvéseivel összhangban kiemelt figyelmet szenteljen a kritikus nyersanyagoknak. Az egyes nyersanyag típusok bemutatása mellett fontos a magyarországi kritikuselem-előfordulások ismertetése is. Cikkünk a különböző ritkaföldfém-előfordulásainkat mutatja be függetlenül azok földtani típusától. Kiindulópontunk a 2010-es években futó CriticEl project volt, de ahol lehetséges, a korábbi eredményeket újjal bővítettük. Bár vulkáni képződmények is hordozhatnak kiemelkedően magas koncentrációkat (mecseki fonolit, velencei beforsit), gazdasági szempontból az üledékes telepek (dunántúli bauxitok, mecseki szenek) ígéretesebbek.

Kulcsszavak: kritikus nyersanyagok, ritkaföldfémek, Magyarország, metamorfitek, alkáli magmatitok, metamorf vulkanitok, üledékes telepek

Introduction

Rare earth elements (REE) are crucial for today's technology, which are used in a range of modern technologies. A number of research projects, including the EURARE and ASTER projects, have been funded in Europe to investigate various steps along the REE supply chain. This paper addresses the initial part of that supply chain, namely the potential geological resources of the REE in Europe. Although the REE are not currently mined in Europe, potential resources are known to be widespread, and many are being explored. The most important European resources are associated with alkaline igneous rocks and carbonatites, although REE deposits are also known from a range of other settings. Within Europe, a number of REE metallogenic belts can be identified on the basis of age, tectonic setting, lithological association and known REE enrichments. This paper reviews those metallogenic belts and sets them in their geodynamic context. The most well-known of the REE belts are of Precambrian to Palaeozoic age and occur in Greenland and the Fennoscandian Shield. Of particular importance for their

REE potential are the Gardar Province of SW Greenland, the Svecofennian Belt and subsequent Mesoproterozoic rifts in Sweden, and the carbonatites of the Central Iapetus Magmatic Province. However, several zones with significant potential for REE deposits are also identified in central, southern and eastern Europe, including examples in the Bohemian Massif, the Iberian Massif, and the Carpathians (Goodenough K., et al., 2016). Because their high economic importance and supply risk, REEs are belonging to the group of Critical Raw Materials (CRM) in the EU. Jancsek (2023) made a brief review about REE potential and mining in a global perspective.

Natural Resources Research and Utilization Special College (after Hungarian abbreviation TEKH) is the association of talent-building for students at the Faculty of Earth and Environmental Sciences and Engineering, University of Miskolc. With this article the College continues the update the former CriticEl project, collect available new data about CRMs, as well as about Hungarian mineralizations, build a database from the collected data, and publish the results.

Table 1. List of the mineralizations presented in this paper, with the postal ID of the nearest settlement (indicated on Figure 1), rock type, and the other occurring CRMs or other trace elements

Location	Mineralization	ID	Rock type	Other CRMs + trace elements
Buda Mts.	Budaörs	2040	alkaline magmatites, clays, hydrothermally altered dolomites	Th
Bükk Mts.	Lillafüred	3517	Siliciclastic sedimentary rocks, meta-volcanics	Th, Zr, Nb, Ta (Li?)
	Bükkszentkereszt, Southern Bükk	3557	phosphatite layer, neighbouring volcanics	Be, Mn, U, W, As, Sn
Uppony Mts.	Dédestapolcsány	3643	siliciclastic sedimentary rocks	U, Ba, V, Ti, Cu, graphite
Rudabánya Mts.	Rudabánya	3733	siliciclastic sediments	Ba, Sr, Cu, Zn, Pb, Ag
Szendrő Mts.	Irota	3786	phyllite	Zr, Au, As, graphite
	Rakacaszend	3826		
Mecsek Mts.	Magyaregregy	7332	phonolite	Nb, Ta, Th, Hf, Zr
	Hosszúhetény	7694		
	Nagymányok	7355	hard coal	Nb, Ta, Zr, Hf, Ge
	Pécs-Vasas	7691		
Villány Mts.	Nagyharsány	7822	bauxite	Ga, Sc
Velence Mts.	Gánt	8082	bauxite	Ga, Sc,
	Pákozd	8095	granitoids	F, Nb, Ta, Th, Pb, Zn
	Sukoró	8096	oxidized berylite monchiquit	
Balaton Highlands	Balatonrendes	8255	sand, limonitic concretions	U, Th,
Bakony Mts.	Úrkút	8409	carbonatic Mn-ore	Mn, Co
	Halimba	8452	bauxite	Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th, U
	Nyirád	8454		
Sopron Mts.	Sopron	9400	mica schists	Th
	Felsőrákos	9421		Th, U, Ti, P

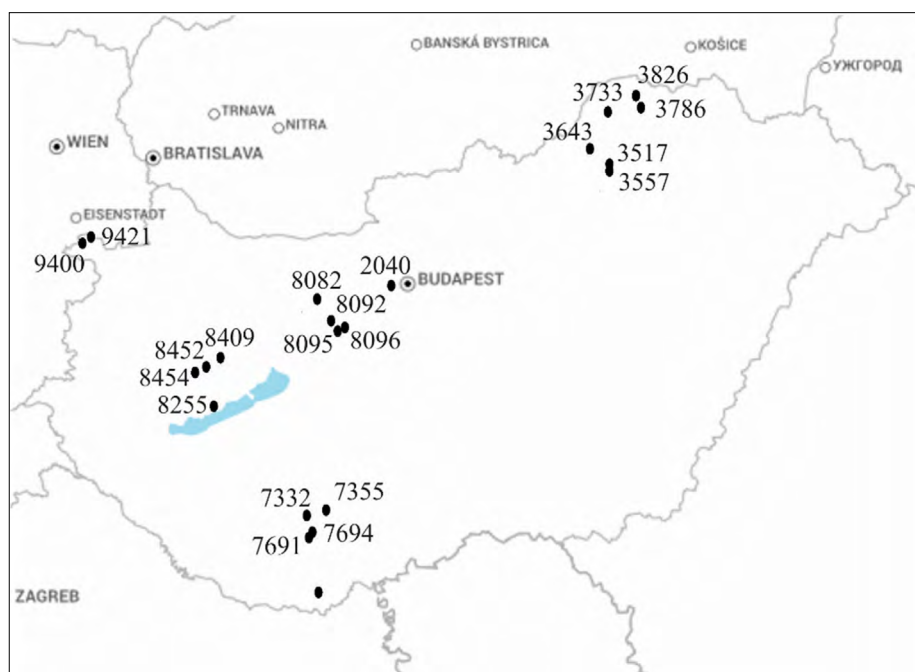


Figure 1. Location of the REE mineralizations presented in this paper. Numbers indicate the postal ID of the nearest settlements. List of IDs can be found in Table 1

The University of Miskolc coordinated the CriticEl project between 2012 and 2014, which was aimed at researching CRMs (at that time 14 raw materials compared to 34 items on the 2023 list). One of the main focus was on REEs. A whole volume of the CriticEl Monography Series was dedicated to this topic (Szakáll, 2014). In this paper we summarize the results of former CriticEl, and integrate it with the follow-up work, with new results. *Table 1* summarizes some relevant information about the occurrences, while the location of these are shown in *Figure 1*.

Hungarian REE-indications

Metamorphites

Sopron Mts.

The Sopron Metamorphic Complex (Babinszki et al., 2023) is one of the few metamorphic formations which was examined from the point of view of Rare Earth Elements during the 20th century. Results of the study made by the Mecsek Ore Company were summarized by Fazekas et al. (1975). More recent studies were made published by Nagy et al. (2002); Nagy and Draganits (1999); and Török (2020). The occurrence was not included in the CriticEl project.

Sopron Metamorphic Complex consists of mica schists, orthogneiss varieties and special metasomatic rocks. Early-stage metamorphic processes were connected to the Variscan Orogeny and the subsequent extension process, followed by the Alpine metamorphic period. Exhumation occurred during the late Creta-

ceous – early Paleogene. REE-indication is connected to boulders occurring at elevated terrains (Nagyfüzes, Szarvas Hill, Ház Hill), as well as to quartzite from Szarvas Hill. Altogether five different REE + Th-bearing rock types, kyanite-muscovite schists, quartz-muscovite-chlorite schist were distinguished. Trace elements were measured by semiquantitative and quantitative spectrographic analysis. Based on these early assays, the REE + Y concentration ranges between 0.7 and 8%, (Fazekas et al. 1975). The dominant REE-minerals are florencite and monazite. Probably the monazite is partly the alteration product of the florencite. Thorium is incorporated into thorite and thorianite (Fazekas et al., 1975). Nagy and Draganits (1999) and Nagy et al. (2002) also distinguished several generations of monazite, furthermore they detected the presence of rhabdophane.

In the Sopron Mts., the Fertőrákos Metamorphic Complex also has high REE concentrations (Vincze et al., 1996). This formation consists of graphitic phyllite, paragneiss, amphibole schists, pegmatites. The metamorphism has amphibolite and greenschist facies (Babinszki et al., 2023). Alpine metamorphism led to the mobilization of various chemical elements, including the Th, U and REEs, as well as Ti, P and base metals. Sulphide ore indications are present. The beginnings of the exploration are dated back to 1969, when a chlorite-apatite mica schist was explored with uranium anomaly, by Mecsek Ore Company. Observed rock alteration processes are chloritization, sericitization, tourmalinitization, pyritization. Total REE concentrations are between 0.013 and 0.038%. The most important

REE-bearing mineral is apatite, but epidote also occurs. Ház Hill occurrence is LREE-dominant, the Fertőrákos occurrence is HREE-dominant.

Alkaline magmatites

Mecsek Mts.

Mecsek Phonolite was a target during the CriticEl project for REE research (Szakáll et al., 2014). In the East Mecsek, two large shallow intrusive masses of phonolitic rocks are known, which can be examined over a large area at the surface: 1) the Köves-tető deposit north of Hosszúhetény and 2) the Somlyó - Szamár Hill deposit south of Szászvár. There is also a tephritic-tephri-phonolite layer with greater thickness in the Réka Valley with pegmatoid nests, and an iron-sulphide contact belt along the Toarcian black shale outcrop (Jäger & Molnár, 2006). The phonolite of Hosszúhetény, Köves-tető was quarried. The Köves-tető phonolite body can be followed with an average thickness of 100 m, traced in 1.7 km width (Némedi Varga, 1995), and it was intruded into the Jurassic coal-bed assemblage during the Lower Cretaceous magmatism. We can only extrapolate the depth of the intrusion from the sediment thickness data for the East Mecsek, as about 2 km. The known other intrusion at Somlyó and Szamár Hill near Szászvár is also a sill-like body, which intruded into the Jurassic fine-grained clastic assemblage (mainly Mollusca shell-bearing quartz bearing aleurolite) at a calculated depth of about 1.5 km. The thickness of this subvolcanic body reaches 300 m. The greater thickness and slower cooling have resulted in a higher degree of differentiation, with coarse-grained, pegmatoidal rock varieties occurring in some places.

Among the alkaline igneous rocks of Mecsek, phonolite has the highest total REE values (between 460–500 ppm), which is about 3–3.5 times enrichment compared to the average of the continental upper crust. The phonolites carry a wide range of REE minerals. To date, 14 such phases have been identified, including, for example, fluornatrophyrochlore among the oxides; lanthanite-(Ce), ancylite-(Ce), calcioancylite-(Ce), and bastnäsite-(Ce) among the carbonates; and joaquinite-(Ce), cerite-(Ce), and eudialyte among the silicates. REE minerals formed coeval with the predominant rock constituents and the phases formed in the miarolitic cavities during the mobilization of REEs. REE-bearing smectite was also detected. At the same time, the amount of REEs is strongly reduced at the contact of coal bearing sediments in contact with phonolite.

Velence Mts.

Occurrences of Velence Mts. were also examined in the frame of the CriticEl project (Szakáll et al. 2014).

The geological investigation of the Velence Mts. has been mainly focused on the granite, the contact shale surrounding the granite from the north and east, the andesite intrusions within the granite and the secondary, altered rocks (Eocene magmatic formations) east of the granite body. A major part of the Velence Mts. is composed of granite, intruded into a Paleozoic metamorphic assemblage. Upper Permian and Triassic sediments also appear from boreholes to the south-east part of the mountain. In the northeastern part of the mountain range, Eocene-Oligocene andesite and metamorphic varieties are found. The older formations of the mountain range are covered by Upper Miocene (Pannonian) and Quaternary sediments.

The granite porphyry is a characteristic feature of the mountain (Pákozd Granite Porphyry Member). The large number of dikes predominantly 5–25 m thick, were often detached from the granite and created a special relief. Two types can be distinguished, the Sukoró and the Pátka type. The Sukoró type is purplish-grey to purplish-red, slightly more basic (less porphyritic quartz, more common potassic feldspar and plagioclase porphyries), the Pátka type is greenish-grey to orange-brown, slightly more acidic, with porphyritic quartz crystals. In the late phase, microgranite intrusions were formed (Kisfalud Microgranite Member). Contact metasedimentary rocks have formed on the granite margin. Late Cretaceous carbonatite dikes (beforsite) intrude the earlier formations (Szakáll et al., 2014).

The total REE concentration values of the granitoids of the Velence Mts. range from 60 to 225 ppm. Practically, the REE concentration depends on the amount of accessories – among which biotite is the most important – because accessory phases are associated with the REE-bearing phases, such as monazite-(Ce), cheralite, xenotime-(Y), REE-bearing apatite, allanite-(Ce), REE-bearing epidote. REE concentration is around the crustal average, with slight relative enrichment of heavy REE (HREE).

The TREE concentration of oxidized beforsite can reach 600–740 ppm. It is worth to mention that while the REE carrier of the intact beforsite (from drillhole) is monazite-(Ce), in the oxidized rock collected at the surface is the florencite-goyasite mixed crystal, which was formed from REE mobilized during weathering processes in the oxidation zone. REE-concentration of monchiquite is also low. In this rock type the REE-bearing minerals are various phosphates, silicates and carbonates, which are difficult to identify because of their very small size (mainly REE-bearing apatite, monazite, britholite). The other alkaline magmatite, spessartite (for which trace analysis has not yet been carried out), is REE-bearing monazite-(Ce), xenotime-(Y) and zirconolite. Overall, beforsite is the

most promising rock for REE but its poorly known extension its potential cannot be judged.

Buda Mts.

The Buda Mountains is the extreme eastern segment of the Transdanubian Mountains built mainly from Mesozoic carbonate and siliciclastic sediments. The highest rare earth metal content was detected in relation of the Upper Cretaceous alkaline lamprophyres and carbonatite dikes similar to beforites found in the Velence. In the Buda Mts., indications of Th and REEs (Sc, Y, La) have become known. Th is found in clays filling fracture zones of tectonic origin in the Triassic basement. Their presence indicates hydrothermal processes. Sc, Y, La occur both together with Th and separately. Their presence indicates hydrothermal processes.

The other type of Th occurrence is associated with the fractures that cut through the layers of dolomite or Dachstein limestone of the Triassic bedrock, with the yellowish-brown, grayish-yellow or red clay with limestone and dolomite debris filling between the fault or strata-bound displacement planes. The source rock of the REEs is a deep alkaline igneous rock consisting predominantly of biotite. The thicknesses of the zones vary between 5 cm and 2 m and contains 0.2–0.3% Th on average. Th is also found in the youngest formations of the surface, directly on or below the surface, in the slope debris of the bedrock, in the clay fraction.

In two drillholes at the Nagykopasz Hill, dike rock was intersected consisting predominantly biotite, which also contains chlorite, apatite, zoisite, epidote, amphibole, enstatite, tourmaline and corundum. Orthoclase and feldspar, a little muscovite and quartz can also be found in it. The rock was subsequently carbonated, it contained 100 g/t Sc, 10–100 g/t Y and 100 g/t La. This rock may be the source rock of the indicated REEs.

Villány

In the northern foreground of the Villány Mts. hydrothermal sulphide bearing hydrothermal veins in rhyolites and microgranites contain 1300–2000 ppm REEs. No further information is known about this enrichment (Konrád et al., 2000). Polymetallic ore deposits Mátra, Reck.

Metamorphic sedimentary and volcanic environments

Bükk Mts.

Metavolcanics near Bükkzentkereszt were the target of several radiometric measurements and field investigations (Barabás, 1957; Csáki and Csáki, 1973; Kubovics

et al., 1989; Szabó, 2002; Wéber, 1975, 1968, 1967; Wéber and Csáki, 1971). First integral airborne gamma measurements were carried in 1955, followed by spectral airborne measurement between 1967 and 1969, which indicated elevated Th and U concentrations, and led to a detailed radiometric survey field investigations, drillings and trenching. Based on the results, a high U phosphoritic layer was found, (in Triassic Bagolyhegy Metarhyolite) near to Bükkzentkereszt, Hősök Spring, with 100–400 g/t U, as well as significant amount of P, Mn, Pb, Zn, REEs and Be (about 100–300 g/t). This layer was designated as a target of CriticEl project (Zajzon et al., 2014). In Mn-oxide rich phosphorite layers the average total REEs content is 143 ppm, from which the HREE + Y is 64 + 195 ppm. In the neighbouring chlorite-rich metavolcanics the average total REEs is 162 ppm (HREE+Y is 24+34 ppm). The occurring REE-and other critical element minerals are xenotime-(Y), monazite-(Ce), columbite-(Fe), REE-bearing titanite, pyrochlore-(Y) / niobaeschynite-(Y) and fluorapatite. The relative enrichment of the REEs (especially HREEs) probably occurred due to element mobility because of the interaction of two metavolcanic layers. The source of the critical elements can be the wall rock, or the magma residuum enriched in incompatible trace elements.

Beside Bükkzentkereszt, other mineralizations from the Southern Bükk Mts. also have REE potential. During the CriticEl project several other metavolcanics were sampled and analyzed for trace elements. A sample from SE Bükk showed extraordinarily high REE and other trace elements (e.g. Zr, Nb, Th, Ta) content (Németh et al., 2016). This result was followed by further research conducted by University of Miskolc, with the help of natural gamma measurements, taking advantage of the presence of radioactive Th (Németh et al., 2023). Samples with similar trace element geochemistry were found in two different territory, both of them are situated next to structural boundary zones: 1) in Vesszős Valley, near Lillafüred, NE Bükk., where Triassic siliciclastic metasedimentary rocks (Hegyestető Formation) contain enrichments, and 2) in a relatively wider territory of SE Bükk (Középszik, Kőrös Valley, Felső-Kecskevár), where Triassic siliciclastic metasediments (Felsőtárkány Formation) and metavolcanics (Szinva Metabasalt) are found.

High values were measured in a grab sample from Vesszős Valley, where REE+Y content reach 1890 ppm, Nb 200 ppm, Ta 24 ppm, Zr 3600 ppm; Average concentrations of the above-mentioned elements taking into account all the enriched bodies are REE+Y 317 ppm, Nb 59 ppm, Ta 4 ppm and Zr 534 ppm, respectively, lower values are often the result of peperitic mixing of metavolcanics. The most usual REE mineral is monazite-(Ce), but for individual rock bodies other minerals, like

REE-F-carbonates (parisite-(Ce), bastnäsite-(Ce) or REE-Nb-oxides (aeschnite-(Ce), aeschnite-(Y), as well as their niobian varieties), can be characteristic. Other trace elements which usually occur are zircon and niobian Ti-oxide. The enrichment of the critical elements probably the result of metasomatic processes and connected to an unknown source body.

In addition to these in addition to these relatively more significant values, smaller REE-indications can be found in the Triassic Szentistvánhegy Metavolcanics and in the various Miocene tuffaceous and ignimbrite bodies.

Szendrő Mts.

The territory of the Szendrő Mts. was the object of airborne radioactive and magnetic measurements in the 1960s, followed by drillings by MÉV in the vicinity of Irota (Szabó, 2002; Wéber, 1975). Here relatively high non-ferrous metal- and Fe-sulfide content were found, probably in the Irota Formation or in the Szendrő Phyllite. During the CriticEl project, the territory was assigned to further research, originally for metals and PGSSs, but based on their initial results REEs are also promising (Földessy and Németh, 2014). In the frame of the project, surface rock and soil sampling, as well as drill core re-sampling were carried out. Among REEs only Ce, La, Y and Sc were measured. The average values are Ce 66, La 34, Y 3, and Sc 13 ppm, respectively, while the maximums are Ce 147, La 75, Y 10 and Sc 70 ppm. Generally higher values were measured on the drill cores. Typical REE-minerals are monazite-(Ce) and various REE-F-carbonates (synchizite, parisite), rarer ones are REE-silicates (allanite, thorite) and REE-Nb-oxides (Czeglédi, 2013). REE-minerals are partly transported to the siliciclastic rocks as detrital components, but later they suffered coupled dissolution- reprecipitation processes due to hydrothermal alterations connected to metamorphism.

Leskóné Majoros (2019, 2021) investigated graphite occurrences in Rakaca Valley, in the vicinity of Rakacaszend. Graphitic samples often contain REE-miner-

als, which prompted the researchers of the University of Miskolc to explore the REE potential of the area, with the help of radiometric method (Balassa et al., 2024). New samples were collected from Szendrő Phyllite Formation. The highest REE+Y concentration measured by ICP-MS is 690 ppm, but Zr content is also noteworthy with its 360 ppm. The average values are REE+Y 265 and Zr 280 ppm. REEs are incorporated into monazite-(Ce), xenotime-(Y), and rarely to REE-F-carbonates (parisite, synchysite) or cheralite. Probably this occurrence has similar origin that in case of Irota, and presence of REE-minerals partly the result of element mobilization due to the Cretaceous metamorphism.

Uppony Mts.

In the Uppony Mts. MÉV conducted uranium prospecting in the 1970s, based on detected airborne radiometry anomaly (Elsholtz, 1973; Elsholtz et al., 1974; Szabó, 2002; Wéber, 1975). The U was found present as trace element in a hydrous Al-phosphate, kingite. Iron ore was historically mined in Uppony Mts. (Pantó, 1954). Later Leskóné Majoros (2019) examine the graphite occurrences in Rágyincs Valley, near Dédestapolcsány, and detected the presence of REE minerals. University of Miskolc are conducting new research in the territory, with radiometric measurements (Balassa et al., 2023, 2024). Analyzed samples are mainly siliciclastic sedimentary rocks, occasionally unconsolidated sediment from the Ordovician – Devonian Tapolcsány Formation. Samples are often (but not exclusively) from former iron ore adits (*Figure 2*). New samples were analyzed by ICP-MS. Maximum REE+Y concentration is 510 ppm, the average is about 300 ppm. Some other maximum (and average) minor and trace element concentrations: Zr: 285 ppm (163 ppm), U: 28 ppm (12 ppm), V: 2220 ppm (604 ppm), Ba: 3190 ppm (1070 ppm), P_2O_5 : 1.9% (0.54%), TiO_2 : 1.8% (0.92%). Based on correlation analysis, V, Ba and U show strong correlation relationships with each other and moderate to strong correlation with HREEs. The REEs are incorporated into monazite-(Ce), xenotime-(Y), and che-

ralite-huttonite solid solutions. Similarly to Szendrő Mts., presence of the REE minerals is partly the result of sediment supply, but metamorphism led to element mobilization and precipitation of new REE minerals.



Figure 2. Unconsolidated gamma-active siliciclastic sediment from the Uppony Mts., with the scintillation detector (on the left) and a formerly iron-ore adit (Alsó Mihály adit) (on the right)

The Úrkút manganese mineralization is the most significant manganese deposit in the Bakony Mts. In the vicinity of Úrkút, production has been going by open-pit and underground mining since 1925 (Horváth et al., 2014). Rare earth elements in the area were first noticed during a research on the distribution of P content in the 1960's (Grasselly et al., 1988). The most favorable values were found a drillhole U-307, with REE oxide values between 0.09–0.12 t% and on the surface at Csárdahegy with REE oxide values between 0.145 – 0.26 t% (Pálffy et al., 1970).

The appearance of REEs is mainly related to the phosphate minerals. In Eplény and Úrkút there are phosphorus rich fine-grained (2–5 µm) layers in the transition zone between Mn carbonate and Mn-oxide (Polgári et al., 2003). The manganese mineralization was briefly mentioned in relation to its cobalt content (Badawi et al., 2024). The total REE content of the carbonate ore samples varies between 90 and 387 ppm, with an average of 259 ppm and standard deviation of 66 ppm. The Sm, Eu, Gd, Tb and Dy are enriched the most. According to the SEM measurements, the correlation of phosphorus and REEs indicates that the phase carrying REEs in the carbonate ore is mainly apatite of biogenic origin.

Mecsek coal deposits

Among the Hungarian coal basins the Mecsek coals have the highest minor element potential. The main generation period of the Mecsek coal was in the Lower Jurassic, originally in limnic environment, but later the environment was changed to paralic, so the deposits can be divided into a limnic, a mixed and a paralic part. Several programs produced data in the more than fifty years after the first detailed publication of Csalagovits and Vigh-Fejes (1971). A study of 100 samples have been published by Kádas (1985). 66 samples have been taken for assay during the CriticEl program, and assayed by ICP-OES, ICP-MS in two laboratories. The average TREE content of black coals was 647 ppm in Pécs-Vasas, 528 ppm in Nagymányok, 545 ppm in Pécs-Szabolcs. In the last occurrence shales also contain 596 ppm total REE (Horváth, 2014). The average of all samples were 390 ppm TREE, 445 ppm TREE+Y+Sc, 10% of HREE ratio in total REE. The maximum values are 1231 ppm TREE, 1370 ppm TREE+Y+Sc. Research and exploration is recently going on the Nagymányok property. Other associated enrichments of minor elements include Nb, Ta, Zr, Hf, Ga and Ge. The results were evaluated and interpreted in regional context by Püspöki et al. (2018).

Bauxite deposits

The bauxite minerals that dominate the Hungarian deposits are böhmite, gibbsite and occasionally diasporite. The most common accompanying minerals of the deposits are hematite, goethite, kaolinite, anatase, rutile and quartz (Bárdossy, 1977).

Among the trace elements found in bauxites, mainly Ga, Sc, REE+Y, and the so-called High Field Strength (HFS) elements (U, Th, Nb, Ta) can be of any economic importance.

During the CriticEl project 10 bauxite samples were examined (Szabó et al., 2014). In the case of Halimba samples, SEM observations revealed a diverse mineralogical composition. Several types of terrigenous mineral grains were identified in these, such as zircon, monazite, xenotime, Fe-oxide, anatase and rutile. The size of the grains is around 5–10 µm, their shape varies from angular elongated to rounded grains. Several types of monazite with different rare earth metal content and xenotime grains with REE content were identified. LREEs appeared in monazite, while HREEs were enriched in xenotime.

During SEM examinations of the Nyirád samples zircon appears as an identifiable grain in the raw material, furthermore in some places Fe-oxide in an amorphous form and rarely with a spheroidal-veined, fibrous structure. Independent REE+Y-containing mineral phases were hardly found in the samples. A very small amount of 2–3 µm monazite can be classified here.

Immobile HFS elements during chemical weathering in the studied bauxite samples show small amounts and narrow concentration ranges (Zr: 40–550 ppm, Hf: 1–13 ppm, Nb: 7–51 ppm and Ta: 0.4–3.7 ppm).

Based on the geochemical tests, it can be established that the source rock of the studied bauxites is basic to neutral magmatic rock, or less probably sedimentary rock. The bauxites show a 3–6 times enrichment of total REE+Y elements compared to the modern continental upper crust.

The total REE+Y content of the examined Nyirád, Bakonyoszlop, Gánt, Halimba bauxites varies between 392–788 ppm. The largest TREE concentrations were detected in the Nagyharsány bauxite samples (969–1204 ppm)

Balaton Highlands

MÁFI has conducted research in the area of the Balatonrendes REE-uranium anomaly formerly investigated by the MÉV (former mining company) at the end of the 1960's.

By gamma spectrometry and dosage measurements at Balatonrendes were located the anomalous zones, where the collected samples discovered that

high Σ REE concentration is associated with samples with high U content. The uranium content is around 0.1 wt% and the amount of rare earth metals is also high between 0.04–0.21 wt%.

The total REE+Y contents of the sand samples are 115–222 ppm, these values are close to the average of the earth’s crust. Significant enrichment can be detected in limonitic concretions, where four times the average of the earth’s crust was measured (683 ppm). The high Y-content of the sample (254 ppm) is particularly noteworthy. According to the main element analysis, this sample contains a significant amount of iron and manganese. This sample also has the highest U (66 ppm) and Th (11.9 ppm) contents. This finding correlates to the MÉV report, as rocks with the highest U content contains the most REE. The U content of iron concretions is generally higher (12.3–66 ppm) than that of sands (2.1–13.4 ppm) and they show enrichment in heavy REEs compared to

sands. In addition to radioactive trace elements, As, Mo, Cd are enriched in iron concretions, and Rb, Zr, Nb and Cs in sands.

Pathfinder radioactive elements for REE enrichments in coals

In earlier coal explorations REE chemical assays were seldom done, meaning that these databases have only small value to obtain direct REE information. However, air-borne gamma ray spectrometry was a customary reconnaissance method. Also, radioactive logs, like natural gamma were regularly measured in coal exploration drillholes. For the CriticEl coal assay data (71 samples) >100 ppm TREE were summarized and correlated with K, Th, U assay values. It was found, that both U and Th data are strongly correlated with TREE content (0.90 and 0.75 coefficients), while K does show weak correlation with TREE (0.45 co-

Table 2. Selected results of the CriticEl project. Chemical data represent average values of samples with TREE > 130 ppm. The number of the samples considered are given in the second column. (Pzo = Paleozoic, C = Carboniferous, T = Triassic, J = Jurassic, K = Cretaceous, Pg = Paleogene, M = Miocene; LREE: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu; HREE: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)

	Number of samples	Age	TREE	TREE+Y+Sc	HREE	HREE%
			ppm	ppm	ppm	%
Erdőbénye	1	M	205	249	27	13
Gánt	3	Pg	550	669	61	11
Bakonyoszlop	2	K	495	586	44	9
Nyírád	2	K	362	386	32	9
Nagyharsány	4	K	969	1204	66	7
Halimba	8	K	747	862	69	9
Hosszúhetény	12	K	461	502	30	7
Nagymányok	5	J	476	539	40	8
Szászvár	4	J	618	684	49	8
Váralja	4	J	499	583	53	10
Máza	7	J	457	517	39	9
Komló	4	J	386	436	31	8
Pécs-Szabolcs	18	J	448	509	35	8
Pécs-Vasas	22	J	259	303	28	11
Eplény	3	J	333	378	29	9
Úrkút	89	J	325	384	34	10
Nagykovácsi	2	T	620	656	26	4
Rudabánya	7	T	177	216	19	11
Bükkszentkereszt	13	T	170	308	49	32
Szendrőlád	5	C	143	188	19	17
Szakácsi	4	C	195	235	21	11
Irota	6	C	315	375	32	10
Velence hg.	39	C	179	244	33	23
Sopron	1	Pzo	4750	4762	92	2

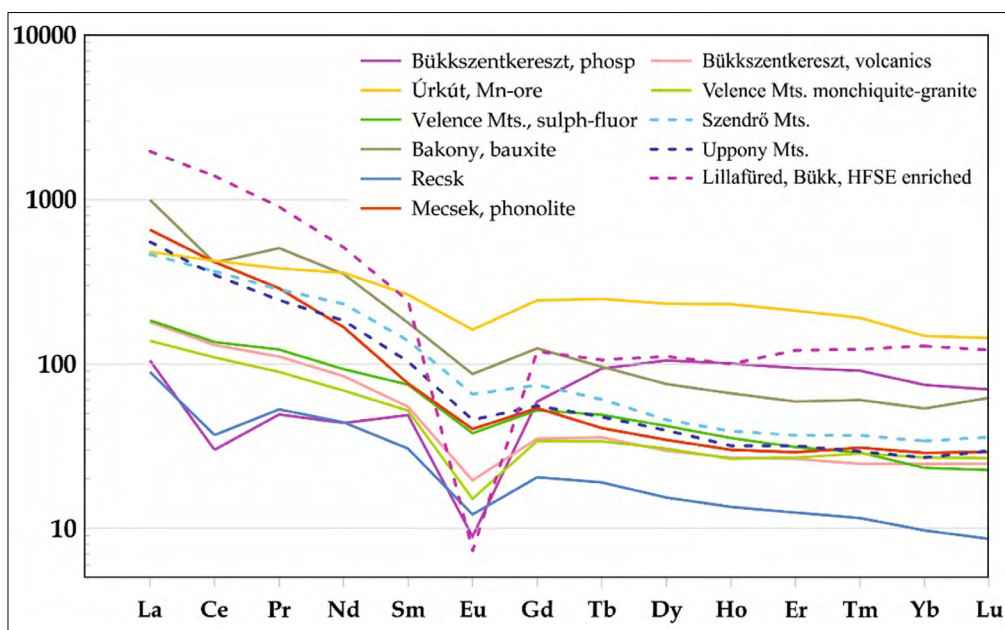


Figure 3. Chondrite-normalized plots of selected samples studied during the CriticEl, as well as of same new samples (with dashed line). The main aspect of the selection was the high REE content

efficient). This is a promising early finding to work out an exploration tool revising coal outcrops and coal drillhole logs.

Of course, natural gamma measurements are useful for REE-exploration also in other type of rocks, as it could be seen in the example of Bükk, Uppony, and Szendrő Mts. in this paper.

Summary and conclusions

REEs are one of the important element groups considered as Critical Raw Materials. In Hungary, the first attempt to make a brief review about REEs was made during the CriticEl project, led by the University of Miskolc. As a part of its activity, the Natural Resources Research and Utilization Special College tries to summarize its previous results and supplement them with new ones, if possible. Average REE concentrations measured during the CriticEl project are summarized in Table 2. Figure 3 compares the REE-characteristics of some samples, which has relatively high REE-concentrations. Among the volcanic deposits, exceptionally high values can also be measured in the Mecsek phonolite and in the oxidized beforosite of Velence Mts. On the other side, sedimentary deposits might be also promising from the point of view of economic utilization. From this group Mecsek coal deposits, Bakony bauxite deposits and Úrkút Mn-deposits can be highlighted. In the future further research of these deposits could provide important results for the evaluation of Hungarian REE-potential.

References

- Babinszki, E., Piros, O., Budai, T., Gyalog, L., Halász, A., Király, E., Haranginé Lukács, R., M. Tóth, T. 2023: Magyarország litosztratigrafiái egységeinek leírása I.: Preakainozoos képződmények / Description of the lithostratigraphic units of Hungary I.: Precainozoic formations. Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest. (in Hungarian)
- Balassa, Cs., Kristály, F., Németh, N., 2023: Ritkaföldfém-hordozó ásványok ÉK-magyarországi földtani képződményekben / Rare Earth Element bearing minerals in NE Hungarian geological formations. In: Szabó, N. P., Virág, Z. (eds.), Új Eredmények a Műszaki Föld- és Környezettudományban 2023. Miskolci Egyetem / University of Miskolc Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar / Faculty of Earth and Environmental Sciences, Miskolci Egyetem. pp. 209–221. (in Hungarian)
- Balassa, Cs., Németh, N., Kristály, F., 2024: Radioaktív anomáliát mutató kőzettestek az Upponyi- és Szendrői-hegységekből / Rock bodies with radioactive anomalies from the Uppony and Szendrő Mts (MTMT). Tert. Quat. STRATA 2, 4–7. (in Hungarian)
- Balassa, Cs., Pataky, Cs., Antal, K., Tátrai, Cs., Gyenes, I., Etaraf, H., Földessy, J. 2024: Critical Raw Materials Hungary Data Collection 2. Minor element enrichments in certain sedimentary mineral formations. BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK 157, II., 25–31.
- Barabás, A., 1957: Jelentés a Bükk hegységben 1956. évben végzett radiológiai kutatásokról / Report on the radiological research carried out in the Bükk Mountains in 1956 (Kézirat / Manuscript No. J-0446). MÉV Adattár / Database. (in Hungarian)
- Bárdossy Gy., 2007: A halimbai bauxit-előfordulás / Bauxite occurrence of Halimba. A Magyar Állami Földtani Intézet Alkalmi Kiadványai, 208, pp. 73–119. (in Hungarian)
- Barnabás K. 1968: A nyírádi bauxit terület további kutatásának várható eredményessége / Expected effectiveness of further research in the Nyírád bauxite area, Földtani Kutatás, 11(2), pp. 10–16. (in Hungarian)

- Bíró L., Pál-Molnár E., 2015: A bakonyi primer ooxidos mangánérccek nyomelem- és ritkaföldfém- geokémiai vizsgálata / Trace element and rare earth geochemical analysis of primary oxide manganese ores in Bakony, Földtani Közlöny, 145/2, pp. 119-126 (in Hungarian)
- Csáki, F., Csáki, Fné, 1973: Összefoglaló jelentés a bükkszentkereszti kutatási területen 1969-1973 között végzett kutatómunkáról / Summary report on the research work carried out in the Bükkszentkereszt research area between 1969-1973. (Kézirat / Manuscript). Mecsekérc Zrt. Adattár / Database, Kővágószőlős. (in Hungarian)
- Csalagovits I., Vigh-Fejes M., 1971: Geokémia – A meddőközetek és a kőszén nyomelemei. / Geochemistry – Trace elements of the barren rocks and coals, MÁFI Yearbook 51.2. b, 520-574. (in Hungarian)
- Czeglédi, B., 2013: A Gadna-Irota terület kutatási adatainak, geokémiai és geofizikai viszonyainak együttes értékelése / Joint evaluation of the research data, geochemical and geophysical conditions of the Gadna-Irota area. MSc diplomatervezés / MSc thesis, Miskolci Egyetem / University of Miskolc. (in Hungarian)
- Elsholtz, L., 1973: Összefoglaló jelentés az 1968-69-70. évi kutatásokról az Uppony-hegységben / Summary report for 1968-69-70. on research in the Uppony Mountains (Kézirat / Manuscript No. 07 téma). MÉV Adattár / Database. (in Hungarian)
- Elsholtz, L., Selmecziné Antal, P., Selmeczi, B., 1974: Kingit előfordulás Magyarországon, a kingit derivatogramja / Kingite occurrence in Hungary, kingite derivatogram. Földtani Közlöny, 104, 328–335. (in Hungarian)
- Fazekas, V., Kósa, L., Selmeczi, B., 1975: Ritkaföldfém ásványosodás a Soproni hegység kristályos paláiban / Rare earth mineralization in the crystalline schists of the Sopron Mountains. Földtani Közlöny, 105, 297–308. (in Hungarian)
- Földessy, J., Németh, N., 2014: Ritkaföldfémek a Cserehát néhány földtani képződményében / Rare earth elements in some geological formations from Cserehát in: Szakáll, S. (ed.): Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations, CriticEl Monográfia Sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc, pp. 203–210. (in Hungarian)
- Goodenough, K., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E.A., Sadeghi, M., Schiellerup, H., Müller, A., Bertrand, G., Arvanitidis, N., Eliopoulos, D., Shaw, R., Thrane, K., Keulen, N., 2016: Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. Ore Geology Review 72(1), 838–856. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.019>
- Horváth, R., 2014: Mecseki széntelepekhez kötődő ritkaföldfém anomáliák / Rare earth element anomalies connected to Mecsek coal deposits, in Szakáll, S. (ed.): Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations, CriticEl Monográfia Sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc, pp. 159–170. (in Hungarian)
- <https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/37811/MacsaiCecilia.pdf;jsessionid=23FB18C0AFC6CB929050592613277868?sequence=1>
- https://library.hungaricana.hu/hu/view/SZAK_ASVA_Kozl_13/?pg=0&layout=s
- Jäger, V. & Molnár, F. 2006: Metasomatic-hydrothermal processes along the contact zone of Lower Cretaceous magmatic sills intruded into Lower Jurassic coal beds at Pécs-Vasas, Mecsek Mts., Hungary. Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series 5, 50
- Jancsek, K., 2023: A ritkaföldfém-bányászat jelene és perspektívái a világban / The present and perspectives of rare earth elements mining in the world. Bányászati és Kohászati Lapok, 156, 16–23.
- Juhász E., Polgári M. 1987: A halimbai bauxit az elektron-mikroszkopos vizsgálatok tükrében / Halimba bauxite in the light of electron microprobe studies, Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1985. évről / Annual Report of the Hungarian State Geological Institute for the year 1985. pp. 261–278. (in Hungarian)
- Kásas M. (1985): A mecseki feketekőszén nyomelem vizsgálatának újabb eredményei / Newer results of the research of trace elements from the Mecsek black coal. Földtani Kutatás 26, 81–82. (in Hungarian)
- Konrád Gy., Ádám I., Barabás A., Barabás A., Hámos G., Csicsák J., Barabásné Stuhl Á., Csóvári M., Gerzson I., Harsányi L., Lenvai L., Majoros Gy., Máthé Z. 2000: Zárójelentés a magyarországi uránérc-kutatásról és a Ny-mecseki uránérc-bányásatról (1 CD, szén, bauxit, szulfidos ércek, festékkő, tűzállóanyag, talk, perlit, víz, ritkaföldfém, gipsz-anhidrit, környezetvédelem) / Final report on Hungarian uranium ore exploration and W Mecsek ore mining (1 CD, coal, bauxite, sulfide ores, pigment earth, refractory clay, talc, perlite, water, rare earth metals, gypsum anhydrite, environmental protection)., MÉRCE Bt. Kézirat. Mecsekérc Zrt. Adattár, Kővágószőlős, 457 p. (in Hungarian)
- Kovács Z., 1970: Ritkaföldfémek koncentrációja az oxidos mangánérc átmeneti övezetében / Concentration of rare earth elements in the transition zone of oxidic manganese ore, Földtani Közlöny 100. pp. 91-95 (in Hungarian)
- Kubovics, I., Nagy, B., Nagy-Balogh, J., Puskás, Z., 1989: Beryllium and some other rare element contents of acid volcanics (tuffs) and metamorphites in Hungary. Acta Geologica Hungarica, 21, 219–231.
- Leskóné Majoros, L. 2019: Upponyi- és Szendrői-hegységi feketepalákban lévő grafitos anyagok ásvány- és kőzettani vizsgálata, illetve kárpáti kapcsolataik / Mineralogical and petrological examination of graphite materials in the black shales of the Upponyi and Szendrő Mountains, and their Carpathian connections. MSc szakdolgozat / MSc thesis. Miskolci Egyetem / University of Miskolc, Műszaki Földtudományi Kar / Faculty of Earth Sciences and Engineering (in Hungarian)
- Leskóné Majoros, L., Leskó, M.Z., Szakáll, S., Kristály, F., 2021: Kristikus ásványok és elemek a Szendrői Fillit Formációban (Szendrői-hegység, ÉK-Magyarország) / Critical minerals and elements in the Szendrő Fillite Formation (Szendrő Mountains, NE Hungary). Multidiszciplin. Tudományok, 11, 90–97. (in Hungarian) <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.1.9>
- Mácsai C. 2014: Ritkaföldfémek bauxitból való kinyerésére vonatkozó technológiák összehasonlítása / Comparison of technologies for the extraction of rare earth metals from bauxite. TDK work, ELTE, Budapest (in Hungarian)
- Mindszenty A., 2020: A magyarországi bauxitok kutatásának rövid története (1903–2020) / A brief history of bauxite research in Hungary (1903–2020), Földtani Közlöny, 150/4, pp. 529–544. (in Hungarian) <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.4.529>
- Nagy, G., Draganits, E., 1999: Occurrence and mineral-chem-

- istry of monazite and rhabdophane in the Lower and Middle Austroalpine tectonic units of the southern Sopron Hills (Austria). *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Österreich*, 42, 21–36. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00147-X)
- Nagy, G., Draganits, E., Demény, A., Pantó, G., Árkai, P., 2002: Genesis and transformations of monazite, fluorite and rhabdophane during medium grade metamorphism: examples from the Sopron Hills, Eastern Alps. *Chem. Geol., Chemistry and Physics of Accessory Minerals: Crystallisation, Transformation and Geochronological Applications* 191, 25–46. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00147-X)
- Némedi Varga, Z. (ed.) 1995: A mecseki feketeköszén kutatása és bányaföldtana / Research and mining geology of Mecsek hard coal. Miskolci Egyetem / University of Miskolc, Miskolc. 472 p. (in Hungarian)
- Németh N., Baracza M.K., Kristály F., Móricz F., Pethő G., Zajzon N. 2016: Ritkaföldfém- és ritkaelem-dúsulás a Bükk hegység délkeleti részének vulkáni eredetű kőzettestekben / Rare earth element and rare element enrichment in the volcanic rock bodies of the SE part of the Bükk Mountains. *Földtani Közlöny*, 146, 11–26. (in Hungarian)
- Németh, N., Kristály, F., Balassa, Cs. 2023: Hydrothermal high field strength element enrichment in the Bükk Mts. (NE Hungary). *Journal of Geochemical Exploration*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107159>
- Pantó, G., 1954: Bányaföldtani felvétel az Upponyi-hegységben / Mining geological survey in the Uppony Mts. Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1952-ről / Annual Report of the Hungarian State Geological Institute for 1952, 91–111. (in Hungarian)
- Pécsi M. 1974: A Budai-hegység geomorfológiai kialakulása, tekintettel hegytípusaira / The geomorphological formation of the Buda Mountains, with regard to its mountain types *Földrajzi Értesítő* XXIII(2). pp. 181–192. (in Hungarian)
- Püspöki Z. (szerk.) (2018): A hazai szénvagyon és hasznosítási lehetőségei / National coal resources and their utilization possibilities. MBFSZ, Budapest, 282 p. (in Hungarian)
- Szabó Cs., Márai V., Márkus I. (2014): Ritkaföldfémek dunántúli bauxitjainkban / Rare Earth Elements in Transdanubian bauxite occurrences. In: Szakáll S. (ed.): *Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations*, CriticEl Monográfia Sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc. 133–160.
- Szabó, I., 2002: Az Upponyi- és a Bükk hegységi sugárzóanyag-kutatások története / History of the radioactive material exploration in the Uppony and Bükk Mts. In: Szakáll, S. and Morvai, G. (eds.): *Érckutatások Magyarországon a 20. században, Közlemények a Magyarországi Ásványi Nyersanyagok Történetéből / Ore Explorations in Hungary in the 20th Century*, Publications from the History of Hungarian Mineral Resources. Miskolci Egyetem / University of Miskolc, Miskolc – Rudabánya. pp. 217–234. (in Hungarian)
- Szakáll, S. (ed.) 2014: Ritkaföldfémek magyarországi földtani képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations. CriticEl monográfia sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc. 210 p. (in Hungarian)
- Szakáll, S., Gyalog, L., Kristály, F., Zajzon, N., Fehér, B. 2014: Ritkaföldfémek a velencei-hegységi granitoidokban és alkali magmas kőzetekben / Rare earth elements in granitoids and alkaline igneous rocks of the Velence Mountains. In: Szakáll (ed.): *Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations*, CriticEl Monográfia Sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc. pp. 67–90. (in Hungarian)
- Szakáll, S., Jáger, V., Fehér, B., Zajzon, N. 2014: A mecseki fonolit ritkaföldfém-tartalma és ásványi hordozói / The rare earth element content and mineral carriers of Mecsek phonolite. In: Szakáll (ed.): *Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations*, CriticEl Monograph Series / CriticEl Monográfia Sorozat. Milagrossa Kft., Miskolc. pp. 47–66. (in Hungarian)
- Szakáll, S., Morvai, G., (eds.) 2002: *Érckutatások Magyarországon a 20. században / Mineral exploration in Hungary in the 20th century*, Miskolci Egyetem / University of Miskolc, Miskolc – Rudabánya, 247 p. (in Hungarian)
- Török, K., 2020: Multiple fluid migration events and REE+Th mineralisation during Alpine metamorphism in the Sopron mica schist from the Eastern-Alps (Sopron area, Western Hungary). *Földtani Közlöny*, 150, 45–61. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.1.45>
- Vincze, J., Fazekas, V., Kósa, L., 1996: A fertőrákosi kristályospala összetétel urán-tórium-ritkaföldfém és szulfidos ásványosodásai / Uranium-thorium-rare earth and sulphide mineralization of the Fertőrákos crystalline schist assemblage. *Földtani Közlöny*, 126, 359–415. (in Hungarian)
- Wéber, B., 1967: Jelentés a 193 és 195–196a. (Bükkszentkereszt) légi anomáliák földi azonosításáról / Report on 193 and 195–196a. (Bükkszentkereszt) on ground identification of aerial anomalies. (Kézirat / Manuscript No. J-0240.). MÉV Adattár / Database. (in Hungarian)
- Wéber, B., 1968: A Bükkszentkereszt környéki anomáliák kutatása / Research of anomalies in the vicinity of Bükkszentkereszt (Kézirat / Manuscript). MÉV Adattár / Database. (in Hungarian)
- Wéber, B., 1975: Az urán és a tórium eloszlása az Északi-középhegység földtani képződményeiben a légi-gamma spektrofotometriai mérések alapján / The distribution of uranium and thorium in the geological formations of the Northern Central Mountains based on airborne gamma spectrophotometric measurements. *Földtani Közlöny*, 105, 309–319. (in Hungarian)
- Wéber, B., Csáki, F., 1971: Éves jelentés a Bükkszentkereszt környéki kutatásokról / Annual report on research around Bükkszentkereszt (Kézirat / Manuscript). MÉV Adattár / Database. (in Hungarian)
- Wein Gy. 1977: A Budai-hegység tektonikája / Tectonics of the Buda Mts. Magyar Állami Földtani Intézet Alkalmi Kiadványa. 77p. (in Hungarian)
- Zajzon, N., Németh, N., Szakáll, S., Gál, P., Kristály, F., Móricz, F. 2014: Ritkaföldfémek a bükkszentkereszt Mn-U-Be geokémiai anomáliában / Rare earth metals in the Bükkszentkereszt Mn-U-Be geochemical anomaly. In Szakáll, S (ed.): *Ritkaföldfémek Magyarországi Földtani Képződményekben / Rare earth elements in Hungarian geological formations*, CriticEl Monográfia Sorozat / CriticEl Monograph Series. Milagrossa Kft., Miskolc. pp. 91–108. (in Hungarian)

125 éve született dr. Tárczy-Hornoch Antal

Megemlékezés a Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék egykori soproni, szakmailag elismert professzoráról

Dr. Tárczy-Hornoch Antal was born 125 years ago
Commemoration about the former, highly respected professor of the Department of Geodesy and Mine Surveying in Sopron

HAVASI ISTVÁN 

intézeti tanszékvezető egyetemi docens

Miskolci Egyetem Földrajz–Geoinformatika Intézet (FGI),
Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszék (GBIT), Miskolc



A jelen megemlékezés célja, a születési jubileum alkalmából, dr. Tárczy-Hornoch Antal akadémikus (a tanítómester, az iskolateremtő, a tudós polihisztor, a kiváló műszerfejlesztő, a szakmai közéletben mind hazánkban, mind pedig külföldön nagy tiszteletnek örvendő professzor) teljes életműjének részletes ismertetése. Ennek kapcsán az összeállított anyagból megismerhető az élete, oktatói, szakmai tudományos munkássága, a szakterületeihez (bányamérés, geodézia, geofizika) kötődő rendkívül széleskörű, külföldön is nagyra értékelt tevékenysége. Ő volt a hazai geodéziai és bányamérési iskola megalapítója, valamint a geofizikai oktatás és kutatás elindításának meghatározó kezdeményezője.

Kulcsszavak: 125 éve született dr. Tárczy-Hornoch Antal

The aim of the commemoration, on the occasion of the anniversary of his birth, is to provide a detailed description of the entire career of academician dr. Antal Tárczy-Hornoch (the professor, the school founder, the scientific polymath, the excellent survey instrument developer, the professor who is highly respected in professional public life both in Hungary and abroad). In this regard, the compiled material will provide information about his life, his teaching and professional scientific work, and his extremely broad activities related to his special fields (mine surveying, geodesy, geophysics), which are highly evaluated abroad. He was the founder of the Hungarian geodetic and mine surveying school and the decisive initiator of starting geophysical education and research.

The first part of the study deals with the life of the scientist professor. In this regard, it is possible to know where he completed his higher education and what professional research topics he dealt with while obtaining his various scientific degrees. At the Department of Geodesy and Mine Surveying of the Sopron College, and later the University Faculty, he carried out his teaching and research activities as head of the department with great expertise, and even held the position of dean. He introduced the education of applied geophysics. For 33 years, he educated students; many of them later became outstanding professionals in Hungarian technical public life.

The second part of the compiled material presents the significant publication activity and scientific work of academician Antal Tárczy-Hornoch, including in more detail his articles published in this professional journal (Mining and Metallurgical Journal) in 3 groups; and in more detail the two articles dealing with the survey instrument-making activities of the department's workshop in Sopron.

In the third part of this professional historical material, the professor's positions in professional and scientific organizations, his active work related to the OMBKE Mine Surveying Specialist Group, and his professional, scientific and other recognitions can be known.

Finally, in the last fourth part, some of the commemorative events related to his person are briefly presented.

Keywords: Dr. Antal Tárczy-Hornoch was born 125 years ago

1. A tudós professzor életének bemutatása [1–8]

Tárczy-Hornoch Antal 1900. október 13-án született a Bereg megyei Oroszvégen. Édesapja földmérő mérnök volt. Matematikai és fizikai tudására oktatói már gimnazista korában is felfigyeltek. 1918-ban Munkácsen érettségizett. Egy évig katona volt, majd 1923-ban az ausztriai leobeni Bányászati Főiskolán megkapta bányamérnöki oklevelét, ezt követően pedig 1924-ben bányamérő mérnöki képesítését is. Mindkettő minősítése kiváló volt. Még 1924-ben az „Új szempontok a bányamérési feladatok számítási megoldásaiban” című értekezésével summa cum laude értékelésű egyetemi doktori fokozatot is szerzett. Ezután itt még két évig a híres bányamérő Aubell professzor mellett tudományos munkatársként dolgozott. Az 1925. év végén benyújtott habilitációs tanulmányában a vetőproblémák megoldásával foglalkozott, amelyre már nemzetközileg is felfigyeltek. 1926-ban – Szentisványi Gyula utódaként – megbízást kapott a soproni Bánya- és Erdőmérnöki Főiskola Bányamérési Tanszékének vezetésére. 1928-ban vette feleségül Tárczy Irént, és eredeti Hornoch vezetéknévét Tárczy-Hornochra egészítette ki. 1934-ig főiskolai tanárként működött, majd 1959-ig a főiskola önállóságának elvesztését követően egyetemi tanárként dolgozott tovább tanszéke Miskolcra költözéséig, ahova ő már nem került át. 33 évig látta el a tanszékvezetői feladatokat, és az 1942–1943 időszakban a soproni egyetemi karon dékáni tisztséget is betöltött.

Szádeczky-Kardoss Gyula elbeszélése szerint jól beszélt különböző idegen nyelveken. Német tudása magas szintű volt (édesanyja német származása révén), gyermekkori környezete pedig a szlovák nyelvtudáshoz is hozzásegítette, de megtanult oroszul,

franciául és angolul is, sőt az első lengyel útja során bizonyos szintű lengyel nyelvtudásra is szert tett [6].

A soproni főiskolán oktatói és kutatói tevékenységét igen nagy szakértelemmel és kiemelkedő szorgalommal végezte. Működése során a geodéziával és a bányaméréstanal foglalkozó tantárgyak addig elégtelennek bizonyult szintű óraszámát egyrészt felemelte, másrészt pedig a tartalmukat kibővítette és korszerűsítette is. 1933-ban bevezette az alkalmazott geofizika oktatását is, amely fontos alapul szolgált a később elindított bányakutató és geofizikus mérnökök főiskolai képzésében. A háborús időkben az egyetemi kar dékánjaként szilárdan kiállt a magyar érdekek mellett, megakadályozva a soproni egyetemi kar személyzetének és értékeinek Németországba telepítését. Neki volt az is köszönhető, hogy a szovjet hadsereg csak rövid ideig használta az egyetemi épületeket, és így Sopronban már 1945-ben megindulhatott az oktatás. Az 1. ábra Tárczy-Hornoch professzort mutatja.

Egy idegen nyelvű szakfolyóirat első szerkesztőként történő 1929-es megindításával, amelyben számos kutatási eredményét bemutatta, világszerte nemzetközi tudományos kapcsolatokat alakított ki. Ennek alapját akkor a társintézmények közötti folyóiratcsere tette lehetővé, és így a híres selmeci főiskola soproni jogutód intézményét szakmai szempontból a világ több országában is megismerték, elismerték.

A háborús károk felszámolása után döntő szerepe volt abban, hogy Sopronban önálló szakként 1949-ben megindult a földmérő mérnökök, majd pedig 1951-ben a geofizikus mérnökök képzése.

„Szemléletes előadó volt. Barna vászonra festett műszerek képeivel készült mindig az előadásokra, továbbá az előadói asztalon is mindig sorakoztak a műszerek.” (Szádeczky-Kardoss Gyula) [6]



1. ábra. Fényképek dr. Tárczy-Hornoch Antaltól



2. ábra. Fényképe a miskolci tanszéken



3. ábra. A soproni hivatalos pecsétje

„Egykori tanítványai szerint ő csak a legjobb és legrosszabb diákokat vizsgáztatta, a többieket pedig a tanársegédeire bízta.” (Patvaros József em. prof.) [6]

Az egyetemi katedrán 33 éven át nevelt szakembereket a bányászat, a geodézia, a műszaki felsőoktatás számára. Környezetére gyakorolt hatása lemérhető azon is, hogy a maga választotta közvetlen munkatársai közül később többen is a magyar műszaki közélet kimagasló egyéniségei lettek. Tanítványait tisztelte, szerette, akik a professzor 70 éves korától ötvenként Sopronban, az ország minden részéről összegyűltek, hogy köszöntsék őt, és élvezzék szelleme lankadatlan sugárzását. 1985-ben, a 85. születésnapján, került sor az utolsó ilyen találkozóra.

Tanítványai, munkatársai között olyan ismert bányamérési szakemberek voltak, mint pl. Milasovszky Béla (1926), Konrád Ödön (1927), Zahorecz János (1940), Ormos Károly (1943), Faix László (1944), Jármái Ervin (1945), Farkas Béla (1950), Hoványi Lehel (1950), Bérces József (1953), Farkas Béla Miklós (1953), Ódor Károly (1953), Fónay Valér (1954), Juhász Béla (1954), Kolozsvári Gábor (1954), Lóránt Miklós (1959), Zambó János (1942), Feigly Béla (1950), Szádeczky-Kardoss Gyula (1950), Alpár Gyula (1951), Halmos Ferenc (1953), Staudinger János (1952), Zólmay Miklós (1954), Németh József (1956) és Zachár Gyula (1956). A zárójelekben megadott évszámok az egyes személyek főiskolai végzési évet jelentik.

Alpár Gyula így jellemezte: „A főnök a realitások professzora volt. Iskola-teremtő. Nagy tekintélyével, tudásával, és nemzetközi kapcsolataival messze fölötünk állt, de mindent összevetve jó, sőt kellemes vezetőnk volt.” [6]

Hoványi professzor: „Tőle tanultuk meg tisztelni és becsülni a munkát és egymást is.”

Kezdeményezője volt annak is, hogy az Akadémia Sopronban Geodéziai, majd Geofizikai Kutató Laboratóriumot létesítsen. A két intézményből jött később létre a Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet (GGKI), amelyet Tárczy-Hornoch professzor igazgatóként 1972-ig, nyugállományba vonulásáig, vezetett.

Tárczy-Hornoch Antalt 1986. január 24-én kísérték utolsó útjára a soproni Szent Mihályról elnevezett temetőben. Egykori tanszékvezetőm, dr. Kolozsvári Gábor – aki szintén nincs már közöttünk – mondott a sírjánál búcsúbeszédet.

A bányászati oktatás 1959 nyarán Sopronból Miskolcra került át, a földmérőmérnöki képzés pedig Budapesten folytatódott. 1950–1959 között a soproni tanszékkel párhuzamosan Milasovszky Béla vezetésével is működött egy geodéziai tanszék. A Miskolcon 1950 őszén életre kelt új geodéziai tanszék az első években csak a Bányamérnöki Kar alsó évfolyamainak hallgatósága részére oktatta a „Geodézia és térképrajzkészítés” című tárgyat. 1955 őszétől kezdve emellett a Földmérőmérnöki Kar alsó évfolyamú hallgatóinak képzését is végezte a „Geodézia”, a „Kiegyenlítő számítás” és a „Térképrajz” tárgyakból.

Tárczy-Hornoch professzor (2. ábra) Geodéziai és Bányaméréstani Tanszéke – az ő személyét kivéve – a Bányamérnöki Kar 1959-es Miskolcra történt átköltözése után Milasovszky Béla vezetésével Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék néven az ott működő tanszékkel egyesült. A Miskolci Egyetem jelenlegi Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszéke – mint az egykori soproni tanszék jogutóda – egyetemi műszerkiállítás formájában ma is őrzi a Tárczy-Hornoch professzor tanszékéről átkerült gyönyörű műszereket. Ezek Miskolcra történt átköltöztetői között volt Zachár Gyula akkori fiatal tanársegéd is. Tőle 2000. december 15-én, a miskolci Tárczy-Hornoch Antal-Emlékülésem a professzor egyik munkaeszközét, a



4. ábra. Bányaméréstan II. és I. jegyzetei

régmúlt soproni egyetemi időszak pecsétjét (3. ábra) vehettem át, amelyet azóta is gondosan őrzök. Ezen a nagyon becses emléktárgyon a következő felirat olvasható: „Műegyetem Bánya-Kohó-Erdőmérnöki Kar Geodéziai és Bányaméréstani Tanszék *Sopron*”. A feliratról kitér, hogy ez volt a tanszék hivatalos pecsétje 1948-ig. Minket, utódokat e becses ereklye is emlékeztet az egykori előd tanszékünkre és annak kiváló professzorára, dr. Tárczy-Hornoch Antalra.

2. Tárczy-Hornoch professzor publikációs tevékenysége és tudományos munkássága [2, 6, 7]

A bányaméréstan oktatásához több jegyzetet is írt (4. ábra), amelyek egyes részeire később megírt tankönyvek is támaszkodtak.

A kutatási eredmények közzétételére – amint azt már korábban említettük – 1929-ben idegen nyelvű Főiskolai Közleményeket indított el, mely kiadvány XXV. kötete már Miskolcon, az utódok tanszékeken jelent meg. Tudományos munkássága a geodézia, a geofizika, a bányamérés és technikatörténet területeire terjedt ki. Szakirodalmi munkásságának 1976. évi adatai: 6 könyv, 250 tanulmány 14 ország 50 folyóiratában. Publikációinak teljes számáról elmondható, hogy 359 tudományos cikk szerzője. Közülük most három csoportban, csak a BKL-ben 1931 és 1975 között megjelent, a bányaméréshez kötődő 21 cikk kapcsán em-

líteném meg azokat a kutatási témákat, amelyekkel azokban foglalkozott [7].

Az első csoport a föld alatti mérések, mérőeszközök, eszközfelvételek (11 cikk):

- ❑ acél-mérőszalagos hossz-méréssel a bányában (1931), két folytatás is a bányaméréstan jegyzetének része is lett,
- ❑ a Schmidt-féle aknafüggélyezés korszerűsítése (1936),
- ❑ a soproni lejtaknamérő műszer (1938),
- ❑ a bányatérképezés egységesítése (1951),
- ❑ a műszergyártás szolgálatát ellátó soproni tanszéki műhely (1955, műhelyvezető: Bummer Antal, 5.–8. ábra, egy folytatás is),
- ❑ a bányabeli sokszögvonal hibaelméletileg legkedvezőbb oldalának kiválasztása giroteodolittal való tájékozódáshoz (1966),
- ❑ a behajlási korrekció pontosabb kiszámítása szabadon lengő mérőszalag esetében (1967).

A második, szakmatörténeti csoport kapcsán pedig az alábbiakról írt (8 cikk):

- ❑ egy 1797-ből való, magyarországi bányaméréstan (1939),
- ❑ régi tanulmányi emlékérmek (1939),
- ❑ 1627. évi robbantásról felvett bányabírószági jegyzőkönyv (1941),
- ❑ dékáni székfoglaló beszéde (1942),
- ❑ a kompenzáló planiméter feltalálója (1948),

- ❑ a magyar bányamérés múltja (1972),
- ❑ kettős jubileumhoz kötődő megemlékezés Mikoviny Sámuel életéről és munkásságáról (2 cikk, 1975).

A harmadik csoport a geofizika és annak bányászati alkalmazása (3 cikk):

- ❑ a szénbányászat karsztvízveszélyének leküzdése (1947),
- ❑ a gradiensek kiegyenlítése (1949),
- ❑ geofizika a bányászat szolgálatában (1950).

A fenti csoportokban felsorolt cikkeinek részletes áttekintését e tanulmány – figyelembe véve annak elfogadható terjedelmi elvárását – nem teszi lehetővé, ezért azokból kiragadva most csak az első csoportbeli soproni tanszéki műhely műszergyártó tevékenységével foglalkozó két cikkre térek ki. A professzor e két írása az ottani műhelybeli szakmai munka bemutatásával foglalkozott. Abban kiegészítő tartozékokat készítettek a meglévő műszerekhez, az eszközöket továbbfejlesztették és új típusokat kísérleteztek ki (5.–8. *ábra*). Közülük most néhány geodéziai és bá-

nyamérési célú műszert említünk meg. Ezek pedig a következők: szögszorzó műszertalp (6. *ábra*), soproni irányrögzítő készülék (7. *ábra*), kiegészítő bányateodolit (8. *ábra*), speciális aljzat a Wild T4 csillagászati teodolithoz, a libellák hitelesítésére szolgáló libellamérleg. A szögszorzó műszertalp a szögmérések pontosságának fokozását szolgálta, a kiegészítő bányateodolit pedig a fejtések gyors felmérését segítette. Az eszközfejlesztésekhez az elméleti hátteret az ő irányításával a tanszéki személyzet, a gyakorlati kivitelezést pedig a Bummer Antal vezette műhely biztosította. A műhelyvezető több eszköz, mint pl. libellamérleg, műszergyártó berendezések, a szabatos körosztógép vagy a prizmacsiszoló fejlesztésében is igen jelentős szerepet vállalt. A professzor műszergyártáshoz kötődő eredményeit (pl. a soproni lejtaknamérő és a soproni irányrögzítő készülék) több hazai és külföldi szabadalom is tükrözi.

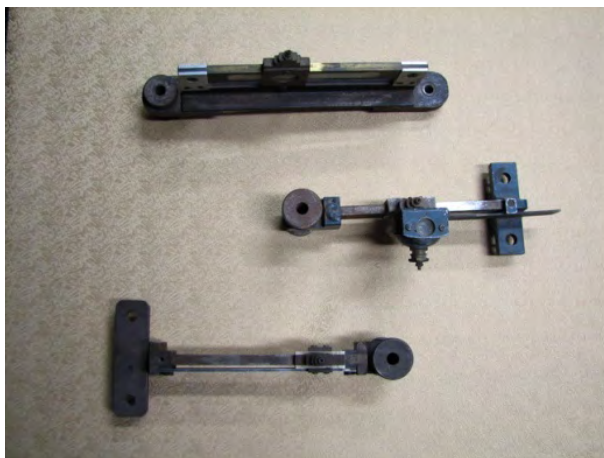
A 84 oldalas leírás új soproni lejtaknamérő kapcsán nagy hangsúlyt helyezett a kényszerközpontosítás kérdésére, ahol a hüvelyes megoldást tartotta a legalkalmasabbnak. Ehhez az eszközhöz különleges szerkezetű műszertalpat és köldökcsavart gyártottak,



5. *ábra.* Soproni aknafüggélyező



6. *ábra.* Szögszorzó műszertalp



7. *ábra.* Soproni irányrögzítő



8. *ábra.* Kiegészítő bányateodolit

és az alhidádé libella helyett pedig pontosabb nyereglibellát alkalmaztak. A prototípus eszköz gyártását külföldön a Zeiss, nálunk pedig a Süss cég kapta meg.

A MOM tudományos tanácsadójaként munkatársaival jelentősen hozzájárult a gyár geodéziai műszer-gyártásának nemzetközi szintre történő emeléséhez.

Az előzőekben bemutatott BKL-írásairól összességében a következő megállapítások tehetők. A bányamérésben mint kiváló műszer- és mérési technológiafejlesztő szakember maradandót alkotott. A bányabeli acél mérőszalagos hossz méréshez fűződő eredményeit a szabatos hossz mérésnél hosszú ideig használták. A soproni lengésmegfigyelő berendezésnél (5. ábra) használt fejlesztési elképzeléseit később a miskolci tanszéki hasonló eszköz kialakításakor is figyelembe vették. Elsőként javasolta a giroteodolitok alkalmazását a tájékozási és a mélybányászatban. Szakmatörténeti cikkeiből a szakmaszeretet és a szakmai múlt iránti érdeklődés tükröződik vissza. A geofizikához társítható bányászati cikkei pedig az új iránti fogékonyság jellemzi.

Az előzőeken kívül kutatási munkái kapcsán kiemelendő még a vetülettanhoz, a hibaelmélethez, a kiegyenlítő számításokhoz, a fotogrammetria bányamérési alkalmazásának vizsgálatához kötődő magas színvonalú tevékenysége is.

3. Dr. Tárczy-Hornoch Antal szakmai és tudományos szervezetekben betöltött tisztségei, az OMBKE Bányamérő Szakcsoporthoz kötődő tevékenysége, szakmai, tudományos és egyéb elismerései, [1, 3–7]

Számos tudományos és társadalmi funkciót töltött be. 1941–1944 között az Országos Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) alelnöke volt, később pedig a Geodéziai és Kartográfiai Egyesület elnöke lett. A 60-as évek közepén ellátta a Magyar Geofizikus Egyesület társelnöki feladatait is, továbbá ő végezte az MTA Nemzetközi Geodéziai és Geofizikai Unió (IUGG) Nemzeti és Geodéziai Bizottságainak elnöki munkáját is. 1972-től az OMBKE tiszteleti tagjává választották. Az *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* szakmai folyóiratnak pedig a főszerkesztője volt.

Tárczy-Hornoch professzornak az OMBKE Bányamérő Szakcsoportját és a Nemzetközi Bányamérő Egyesületet (International Society for Mine Surveying, ISM) érintő tevékenysége [6, 7] során hasznos tanácsaival már az alapítók is segítette, és gyakran vett részt az éves rendezvényeken. Előadásaival, felhívásaival hozzájárult a helyes út kiválasztásához.

„Szakjaink szeretetéből fakad, hogy annak továbbfejlesztésén, megjavításán dolgozunk úgy, hogy az nemzetközi elismerést jelent. Ezt kérem valamennyiüktől, ezt érezzék kötelességüknek a tudományunk, hazánk elismerése számára.”

A nemzetközi ISM kongresszusokon a következő előadásokat tartotta:

- ❑ Nyitott giroszkópikus sokszögvonal végpontjának koordináta-középpontja (német nyelvű tanulmány), I. ISM Kongresszus, PRÁGA (Csehszlovákia), 1969.
- ❑ A magyar bányamérés története (német nyelvű tanulmány), II. ISM Kongresszus, BUDAPEST (Magyarország), 1972. (A bányamérés egyik bölcsőjének az egykori Magyarországot tekintette.)
- ❑ Két függőleges akna közötti vágat kihajtásának iránymegadása giroteodolittal (német nyelvű tanulmány), IV. ISM Kongresszus, AACHEN (NSZK), 1979.

A hazai induló, évenkénti Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere (BTT) rendezvényeken pedig a következő szakmai előadásai hangzottak el:

- ❑ Beillesztett sokszögvonal különböző kiegyenlítése (I. BTT, Pécs 1963),
- ❑ A nyitott sokszögvonal giroteodolittal való tájékoztatásának néhány hibaelméleti kérdése (III. BTT, 1966),
- ❑ A nemzetközi együttműködésre vonatkozó elképzelések előterjesztése, Prága, I ISM Kongresszus (V. BTT, Oroszlány, 1969),

A Nemzetközi Bányamérő Egyesület létrehozásában is jelentős szerepet játszott. 1976-ban Aachenben a III. ISM Kongresszuson az ISM első tiszteleti tagja lett. A külföldi szakmai rendezvényekre kiutazó képviselőink rendszeresen számoltak be arról, hogy Lappföldtől Bulgáriáig a vendéglátók első kérdése mindig rá vonatkozott.

Professzor dr. Tárczy-Hornoch Antal valóban kiváló ember volt. Tudományos munkássága a geodézia, a bányamérés, a geofizika, a technika története területekre terjedt ki. Magas színvonalú szakmai és tudományos tevékenységét a határokon túl is igen nagyra értékelték. Élő kapcsolatai voltak számos üzemmel, műszergyárral, a munkahelyeken örömmel fogadták hasznos, célravezető és a gyakorlati élettel összefüggő mérési eljárásait, tanácsait. Tudományos és oktatói munkája mellett közéleti ember is volt, aki intézménye vagy szeretett városa döntő kérdéseit illetően mindig állást foglalt, érvényesítette tekintélyét, befolyását. Sopron 1970-ben Pro Urbe kintüntetéssel, 1975-ben pedig díszpolgársággal ismerte el a város tudományos-kulturális életében elért érdemeit. Az MTA 1946 júliusában levelező, még az év decemberében rendes taggá választotta. 1949-ben Kossuth-díjat, 1966-ban pedig Állami Díjat kapott. A Francia Tudományos Akadémia levelező tagja, az osztrák, bolgár és lengyel tudományos akadémiák külföldi tag-



Fényképek a miskolci emlékülsről

ja, a freiburgi, leobeni, bécsi és gráci egyetemek tiszteletbeli doktora volt. 1976-ban pedig mind a soproni Erdészeti és Faipari Egyetem, mind pedig a miskolci NME tiszteletbeli doktorává választották. Tiszteleti tagja volt a Magyar Geofizikusok Egyesületének is. Munkáját OMBKE és GKE érmekkel ismerték el.

Mi, az utódok dr. Tárczy-Hornoch Antal személyére mindig szeretettel gondolunk vissza, elismerve a professzor sokoldalú egyéniségét és azt a szakmai, tudományos és iskolateremtő tevékenységet, amelyet a földtudomány területén a jövő mérnökei érdekében kifejtett. Emlékét örökre megőrizzük. Sopronban a rá való megemlékezés kapcsán emléktábla és emlékszóbor felavatására került sor, továbbá az Aranyhegyen róla utcát is elneveztek.

4. A személyéhez kötődő néhány megemlékezés [7, 8]

Dr. Tárczy-Hornoch Antal professzor tiszteletére a XXVI. BTT-n (SIÓFOK, 1987) emlékkiállítás tartottak.

Élénken élnek még bennem azok a kedves emlékek, amelyeknek a részese lehettem, amikor a 2000. évben Tárczy-Hornoch Antal születésének 100. évfordulójára emlékeztünk. E jeles esemény alkalmából október 13-án Sopronban emlékünnepet tartottak,



10. ábra. Dr. Tárczy-Hornoch Antal soproni emlékszobra [9]

amelynek keretében a földtudományok nemzetközi és hazai kiválóságai méltatták a professzor gazdag szakmai, tudományos és közéleti tevékenységét. Aznap délben került sor a szobrának avatására is, ahol akkor dr. Kapolyi László akadémikus mondott beszédet, majd a társegyesületek képviselői helyeztek el koszorúkat. Ezt követően tiszteletadás céljából az emléknapi résztvevői a Szent Mihály temetőben felkeresték a professzor sírját is.

2000. december 15-én hasonló okból rendeztünk emlékülést és kiállítást a Miskolci Egyetem Selmeci Műemlékkönyvtárában (9. ábra). Ezen a rendezvényen is több előadás foglalkozott Tárczy-Hornoch Antal munkásságával. A résztvevők megismerhették a Bányamérnöki Kar életében betöltött jelentős szerepét, tevékenységét a hallgatók szakmai képzésében Sopronban, sokrétű szakmai és tudományos munkásságát, kezdeményező szerepét a geofizika hazai oktatásában, kapcsolatát a Bányamérő Munkabizottsággal. A kiállításon nyomon követhető volt a professzor rendkívül gazdag életútját.

2009-ben pedig a Bányamérnöki Kar 1959-es Miskolcra költözésének 50. évfordulója alkalmából, a soproni ünnepi rendezvényén engem ért a megtiszteltetés, hogy a GGKI-nál található szobra előtt (10. ábra) megemlékező beszédet tarthattam.

Összefoglalás

Professzor dr. Tárczy-Hornoch Antal születésének 125 évfordulója alkalmából a megemlékező szakmatörténeti írás olvasói megismerhették a professzornak mind hazánkban, mind pedig külföldön egyaránt nagyra értékelt főiskolai, egyetemi oktatói tevékenységét és tudományos szakmai munkásságát. Színvonalas munkájának eredményessége megmutatkozik az általa oktatott és e cikkben felsorolt, több később szintén komoly szakmai elismertséget elérő tanítványa kapcsán is, akik őt nagyon kedvelték és tisztelték. Ez utóbbi igazolására szolgál az, hogy idős korában az ötévente megtartott születésnapi rendezvényein volt tanítványai mindig sokan és nagy örömmel vettek részt. Szakmai területeinek nagy elhivatottságú kiváló oktatója volt. Kimagasló tudományos eredményei visszatükröződnek egyrészt a jelentős számú hazai, másrészt a különböző nyelveken összeállított külföldi szakmai folyóiratokban megjelent cikkeiből.

Dr. Tárczy-Hornoch Antal világhírű kutatóprofesszor volt, amit az itt is ismertetett különböző hazai és nemzetközi szervezetekben betöltött tisztségei, az elnyert kiemelkedő elismerései, kitüntetései egyaránt visszaigazolnak. E helyen érdemes azt is megemlíteni, hogy egy általa 1973-ban Dr. Hoványi Lehelnek írt levélből megtudható, hogy akkor a Francia Tudományos Akadémia 307 éves fennállása alatt ő volt a második Magyarországról megválasztott levelező tag, szakterületét illetően pedig az első. Személyére mind a bányamérő, a geodéta, mind pedig a geofizikus szakmai közösség nagy tisztelettel emlékszik vissza. Ez igaz az általa kedvelt Sopron városára is, ahol különböző emléktárgyakkal (emléktábla és szobor), továbbá a róla elnevezett utcával ismerték el a hazai és külföldi szakmai körökben nagyra értékelt szakmabeli és tudományos munkásságát.

IRODALOM

- [1] Molnár László: Dr. Tárczy-Hornoch Antal 1900–1986 (Gyász hírek). Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat, 1986/3, 203–204.
- [2] Molnár László: Tárczy-Hornoch Antal professzor technikatörténeti munkássága. Központi Bányászati Múzeum, Sopron, Templom u. 2., pp. 137–147.
- [3] Szerkesztőbizottság: Búcsúzás dr. h.c. mult. dr. Tárczy-Hornoch Antal akadémikustól. Geodézia és Kartográfia, 38/1, 1986, 1–2.
- [4] Martos Ferenc: Búcsúbeszéd Tárczy-Hornoch Antal ravatalánál. Geodézia és Kartográfia, 38/1, 1986, 3–4.
- [5] Somogyi József: Tárczy-Hornoch Antal (1900–1986), Elhangzott 2000. 11. 13, MTA, Budapest, 2001.
- [6] Kurgyis K.: Ismert magyar bányamérők – Tárczy-Hornoch Antal. PP előadás, (konzulens: dr. Havasi I.), XLIX. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere, Salgótarján, 2010. 06. 10.
- [7] Havasi István, Szabó László: Tárczy-Hornoch Antal munkássága a bányászati lapok tükrében, Tárczy-Hornoch Antal-Emlékülés és -Kiállítás a Miskolci Egyetemen, 2000. 12. 15; KOMPASZ az OMBKE Bányamérő Szakcsoport Információs füzet, 2000.
- [8] Havasi István: Kettő ünnepi megemlékezés Tárczy-Hornoch Antal professzor szobránál, 1: a BK Miskolcra költözésének 50. évfordulója, Sopron 2009 (OMBKE Bányamérő Szakcsoport története. Dr. Füst Antal, pp. 141–144. és 2: a LVIII. BTT, Sopron 2019.
- [9] <https://www.sopronitema.hu/hirek/varosi-hirek/tar-czy-hornoch-antal-mellszobra>

Kőzetek hasításának fizikai folyamatairól

On the physical processes of rock cleavage

OMASZTA ISTVÁN

okleveles bányagépész- és villamosmérnök,

okleveles mérnök-közgazdász

E-mail: omaszta1957@gmail.com



Napjainkban az energiahatékonyság fontos kérdéssé vált. Nem mondhatunk le a kőzetek jövesztéséről, a bányászatról, tovább kell keresni az energiafogyasztás minimalizálásának lehetőségeit. Elő kell segíteni az alkalmazott kőzetbontó szerszámok optimális kialakítását az energiaköltségek, valamint a fellépő kopás költségeinek optimalizálásával [3]. A jelen munkában kívánom leírni egy egyszerű esetben, a kőzethasításkor lejátszódó fizikai folyamatot egy kvázistatikus fizikai modell segítségével. A jelenség dinamikus leírása [1] most nem célunk, így nem célunk továbbá a vágóerő sztochasztikus tulajdonságának leírása [2] sem.

A vágóerő meghatározása és az energetikai jellemzők ismerete központi jelentőséggel bír, erre támaszkodva lehetséges a kőzetek vágásakor használt eszközök tökéletesítése [3]. Továbbra is, mint az ezt megelőző írásomban [4], az Evans által tárgyalt hasítási feladat [5] teljes fizikai leírását tűztem ki célul: a szerszám behatolásától kezdve, a törés bekövetkezésén keresztül, a kőforgács lehasadásáig.

Egy ilyen leírást olvashatunk kúp formájú szerszámokra [6], ahol a vágóerőre egy elméleti modellt dolgoztak ki a szerzők, valamint regresszióanalízissel hasonlították össze a kísérleti adatokat és az elmélet adta számítások eredményeit. Az erő-behatolás függvény alakját meghatározták [7] a törés bekövetkeztéig, ami sok tekintetben elméleti egyezést mutat a kísérleti eredményekkel [8]. Az erő-behatolás $T(p)$ függvény meghatározása az alapját képezi minden további elemzésnek. A modell egy egyszerű b szélességű, síklapokkal határolt, θ félvágószögű vágóél, amely nem ideálisan „éles”, azaz tompaságát $Q \neq 0$ lekerekítéssel vesszük figyelembe. Az elrendezést az 1a, b. ábrán mutatjuk be. A ∞ negyedtérről rögzített.

Kulcsszavak: hasítási elmélet, vágóél, forgácsoló erő, repedés terjedése

Nowadays, energy efficiency has become an important issue. We cannot give up on the extraction of rocks and mining, we must continue to look for ways to minimize energy consumption. The optimal design of the used cutting tools must be promoted by optimizing energy costs and the costs of wear and tear [3]. In this work, I want to describe the physical process taking place during rock splitting in a simple case using a quasi-static physical model. The dynamic description of the phenomenon [1] is not our goal now, so neither is the description of the stochastic property of the cutting force [2].

The determination of the cutting force and the knowledge of the energetic characteristics are of central importance, based on this it is possible to improve the tools used for cutting rocks [3]. As in my previous article [4], I set out to provide a complete physical description of the splitting task [5] discussed by Evans: from the penetration of the tool, through the occurrence of the fracture, to the splitting of the stone chips.

Keywords: splitting theory, cutting edge, cutting force, crack moving

1. A behatolás fázisának egyenletei

A szerszám (vágóél) az x - y koordináta-rendszer origójában hatol be az y tengely és a T sík által határolt ∞ negyedtért kitöltő közetbe, a P ponton lép be, és az x tengely mentén halad előre. Az első fázisban a „tompá” él Q rádiuszával határolt henger nyomul be a közetbe, ami az S pontig tart, ahol a behatolás eléri az ékhatást kifejtő θ szögű lejtőt. A behatoláskor az anyag az ékfelület p nyomásának hatására porrá omlik össze. A szerszám az elemi felületdarabon dN normálerőt fejt ki az anyagra, és az elmozdulás hatására mozgásba jövő tömör porrétegre hat a dS elemi súrlódási erő. Az ék és a még intakt anyag között porágy helyezkedik el, ami egyfajta „hidraulikus” állapottal jár, amit a porrá tört anyag fizikai jellemzői biztosítanak [8]. Mindenesetre a hidraulikus állapot [11] bevezetése biztosítja, hogy az elemi dN normálerő számítható a porágy p nyomása szerint:

$$dN = p dA \geq \sigma_1 dA,$$

$$dS = \mu dN$$

az egyenlőség a porrá töréskor érvényes. A folyamat igen bonyolult, a továbbaprózódást és egyéb kísérőjelenségeket most nem vesszük figyelembe. Igaz, az előtoló erő munkája fedez minden energiaigényt, ami a hasításkor fellép. A dA az elemi felület és az anyag nyomó-törősszilárdsága, a porrá való összenyomás törőfeszültsége. A porágyban működik a p nyomás által a felületre kifejtett elemi erő dN . Az elmozdulás, ill. a por u áramlási sebessége okozta poráramlás által

gerjesztett súrlódás $dS = \mu dN = \mu \sigma_1 dA$, ahol $\mu = \tan \rho$ a súrlódási faktor és a ρ súrlódási szög tangense.

1.1. Az elemi felületi erők meghatározása

Ennek a feltételnek az [1] bevezetésével felírhatjuk azokat az egyenleteket, amelyek a kis sugarú hengerfelülettel határolt élre vonatkoznak. Felhasználjuk az ék felületéhez illesztett helyi koordináta-rendszer n és t tengelyét az egységvektorokkal:

$$\overline{dK} = \overline{dN} + \overline{dS} = \sigma_1 dA \vec{n} + \mu \sigma_1 dA \vec{t}. \quad (1)$$

A globális x - y koordináta-rendszer (i, j) és a lokális (n, t) egységvektorok közötti transzformációs összefüggés egy általánosságban a koordinátatranszformáció és az egységvektorok segítségével felírható:

$$\begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{t} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ \cos \alpha & -\sin \alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

mivel másfelől a globális koordináták szerinti elemi erők az előtoló erő $\overline{dF}$ és a repesztőerő $\overline{dR}$ komponensei $\overline{}$ -nak adódik (az előtolás iránya $\vec{e} = \vec{e}_i$):

$$\begin{aligned} \overline{dK} &= \overline{dF} + \overline{dR} \\ &= \sigma_1 dA (\sin \alpha \vec{i} + \cos \alpha \vec{j}) \\ &\quad + \mu \sigma_1 dA (\cos \alpha \vec{i} - \sin \alpha \vec{j}). \end{aligned}$$

Az egyenleteket komponensenként szétválasztva kapjuk a globális elemi erőkomponenseket, amelyeket az A felületre integrálva kapjuk meg az eredő erőket a lokális α szög és a $\mu = \tan \rho = dS/dN$ súrlódási szög függvényében:

$$\overline{dF}(\alpha) = dF \vec{i} = \sigma_1 (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) dA \vec{i}, \quad (3)$$

$$\overline{dR}(\alpha) = dR \vec{j} = \sigma_1 (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) dA \vec{j}. \quad (4)$$

1.2. A „tompá” vágóél okozta erőhatás

A vágóél Q sugarú hengerfelület, ezért $dA = b Q d\alpha$, és így a dF és dR -re a hengerfelületre (3) és (4) alapján következik:

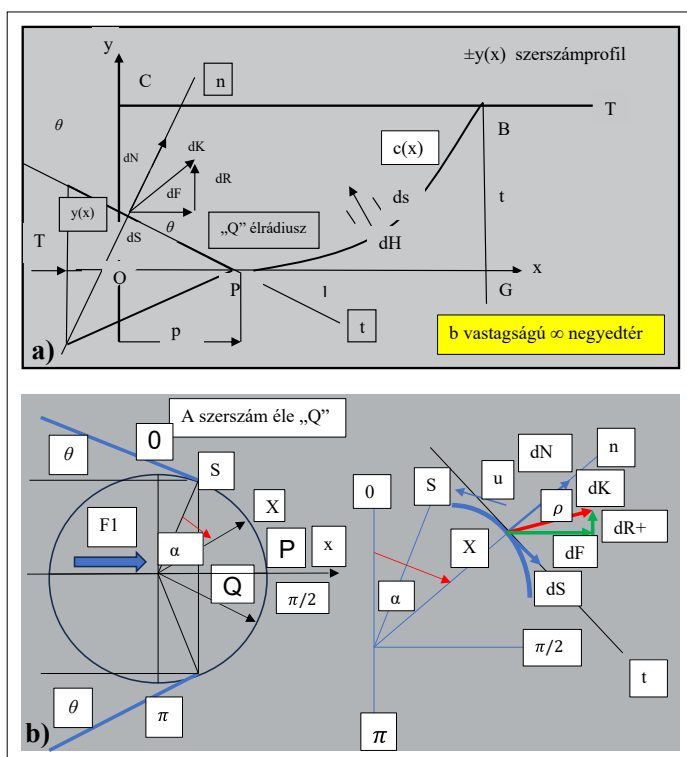
$$\overline{dF}(\alpha) = \sigma_1 b Q (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) d\alpha, \quad (5)$$

$$\overline{dR}(\alpha) = \sigma_1 b Q (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) d\alpha. \quad (6)$$

Az eredő erők az α tartományra számított általánosan érvényes egyenleteket nyerünk:

$$F_1(\theta) = 2\sigma_1 b Q \int_{\alpha=\theta}^{\pi/2} (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) d\alpha, \quad (7)$$

$$F_1(\theta) = 2\sigma_1 b Q [\cos \theta + \mu(1 - \sin \theta)]. \quad (8)$$



1. ábra.

A repesztő R_1 erő integrálja a teljes felületre a szimmetria okán nullát eredményez. Ennek az erőnek csak az egyik, a nyitott felület felé mutató komponensét számoljuk ki, amely a t vastagságú forgácsot választja le a b vastagságú ∞ negyedtérről. Ezért dR_1 -gyel számolunk (1 jelzi az első behatolási szakaszt):

$$R_1(\theta) = \sigma_1 b Q \int_{\alpha=\theta}^{\pi/2} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) d\alpha, \quad (9)$$

$$R_1(\theta) = \sigma_1 b Q [(1 - \sin \theta) + \cos \theta]. \quad (10)$$

Az egyenletek könnyen átszámíthatóak a p behatolás mértékétől függő egyenletekké:

$$p = Q(1 - \sin \alpha), \quad \sin \alpha = 1 - p/Q,$$

$$\cos \alpha = \sqrt{2 \frac{p}{Q} - \left(\frac{p}{Q}\right)^2}.$$

Ezek felhasználásával a behatolás függvényében tudjuk az erőhatásokat meghatározni:

$$F_1(p) = 2\sigma_1 b Q \left[\sqrt{2 \frac{p}{Q} - \left(\frac{p}{Q}\right)^2} + \mu \frac{p}{Q} \right], \quad (11)$$

$$R_1(p) = \sigma_1 b Q \left[\frac{p}{Q} + \mu \sqrt{2 \frac{p}{Q} - \left(\frac{p}{Q}\right)^2} \right]. \quad (12)$$

Ez a behatolási szakasz, amely a Q sugarú ék hegyének behatolása, az S pontig tart, ettől a ponttól kezdve hat az ék, és megkezdődik a feszítés intenzív szakasza. Ezen az első szakaszon a behatolástól függően nő az elemi előtoló dF , és a dR feszítőerő hat a „tompá” $Q \neq 0$ hegy esetében is. Mikor a behatolás eléri az éksík tangensét, a θ félszögű, esetünkben síkokkal határolt ék feszíteni kezdi a t vastagságú szeletet, ami a b szélességű ∞ negyedtérrésze. Ezen szakasz láthatóan a geometriai feltételek és a szingularitáshoz $Q \sim 0$ közeli állapot miatt nemlineáris erőhatásokat eredményez. A $\theta = 90^\circ$ -nál, a szerszámnak nincs éle, így behatolás sincs!

1.3. Az $F_1(p)$ erő munkája W_1 a behatolási fázisban

Az (5) egyenlet átalakításával (p változó p/Q helyett) és integrálásával megkapjuk az $F_1 = 2b\sigma_1[2Qp - p^2]^{1/2}$ erő által végzett munkát a behatolás p_1 , S pontig történő 1. fázisára, az intenzív repesztő hatás határáig, azaz p_1 -ig:

$$W_1 = \int F_1(\zeta) d\zeta$$

$$= 2\sigma_1 b Q \int_{\zeta=0}^{p_1} \left[\sqrt{2 \frac{\zeta}{Q} - \left(\frac{\zeta}{Q}\right)^2} + \mu \frac{\zeta}{Q} \right] d\zeta;$$

az integrált többszöri helyettesítéssel oldhatjuk meg:

$$W_1 = \frac{1}{2} b Q^2 \sigma_1 (\pi - 2\theta + \sin 2\theta), \quad (13)$$

$$p_1 = Q(1 - \sin \theta).$$

Megjegyzés: a fenti a ábrán lévő példa szerint, a $p_1 = 0,35$ mm behatolásig az F_1 erő által végzett munka $W_1 = 2675$ J, ami a közet porrá töréséhez és a sűrűdés leküzdéséhez szükséges.

2. Az ékhatás kiteljesedésének fázisa

Visszanyúlva az általános érvényű (3), (4) egyenletekhez a síkokkal határolt ék további behatolása értelemszerűen θ szerint lineárisan növekvő erőhatásokat generál. Ekkor az ék félfelülete $A = b[(p_2 - p_1)/\cos \theta]$ szerint alakul, ahol p_2 a teljes behatolás a repedés keletkezéséig, p_1 az első fázis alatt elért behatolás. Az ékre ható globális erők így könnyen, integrálás nélkül felírhatók:

Előtoló erő: $\theta(x, y) = \text{konstans}$ feltétellel

$$F_2(p) = F_1(\theta) + \sigma_1 A (\sin \theta + \mu \cos \theta), \quad (14)$$

$$F_2(p) = C_1 + C_2 p_2, \quad (15)$$

$$C_1 = F_1(\theta) - \sigma_1 b (\tan \theta + \mu) p_1, \quad (16)$$

$$C_2 = \sigma_1 b (\tan \theta + \mu). \quad (17)$$

A teljes előtoló erő a felület $2A$ és az egyirányúság miatt: $T_2(p) = 2F_2(p)$, azaz

$$T_2(p_2) = F_1(\theta) + 2\sigma_1 b (\tan \theta + \mu) p.$$

Repesztőerő: $\theta(x, y) = \text{konstans}$ feltétellel

$$R_2(p) = R_1(\theta) + \sigma_1 A (\cos \theta - \mu \sin \theta), \quad (18)$$

$$R_2(p) = D_1 + D_2 p_2, \quad (19)$$

$$D_1 = R_1(\theta) - \sigma_1 b (1 - \mu \tan \theta) p_1, \quad (20)$$

$$D_2 = \sigma_1 b (1 - \mu \tan \theta). \quad (21)$$

A teljes repesztőerő a felület $2A$ és az ellenkező értelmű irány miatt $G_2(p) = 0$. A végtelen féltér ($-y$) felé mutató erő kompenzálja a forgácsra ható $R_2(p)$ erőt.

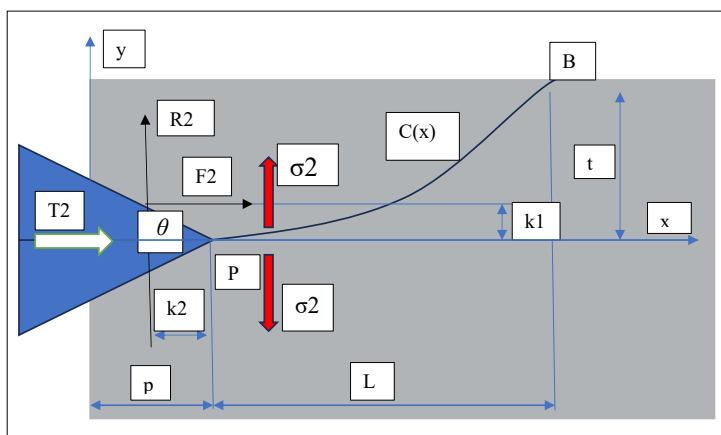
2.1. A $T_2(p)$ erő munkája W_2 a repedés megindulásáig.

$$W_2 = \int T_2(\zeta) d\zeta = \int_{\zeta=p_1}^{p_2} 2(C_1 + C_2 \zeta) d\zeta, \quad (23)$$

$$W_2 = 2C_1(p_2 - p_1) + C_2(p_2 - p_1)^2. \quad (24)$$

A 2. fázisban az erők lineárisan alakulnak a behatolási mélység függvényében. Ez a szakasz addig tart, míg az ék hegyénél a húzófeszültség eléri a vágóél közelében a törést okozó feszültség nagyságát és egy repedés csatorna alakul ki, aminek a frontja az ék további behatolásának hatására a $\overline{PB}$ íven tovaterjed.

A repedéscsatorna kialakulásának és terjedésének törvényszerűségei bonyolultak [9–11]. Nagy valószínűséggel Q rádiuszú vágóélen keletkező mikroszkopikus méretű repedésekből indul ki a fő repedéscsatorna, ami a P pontban szignifikánsan az x tengely mentén halad. Mivel, az ún. fő repedéscsatorna (elméleti) iránya az x tengely mentén prognosztizálható, azaz jó közelítéssel vehetjük alapul, hogy a repedésgörbe $c(x)$ a P pontban érinti az x tengelyt. A közetek inhomogenitása és gyakran anizotróp volta növeli az elméleti bonyolultságot. Mindenesetre a közetek jól modellezhetőek az anyagban bezárt, az erőbehatás előtt stabilis, az anyagban az adott közetre jellemzően eloszló üregek (mikrorések) rendszerével. Ezen üregek külső feszültségtér hatására instabillá válnak, összenőnek és hosszabb repedéssé fűződnek össze. A mérési eredmények is egyöntetűen azt bizonyítják, hogy az erőbehatolás-görbén fellépő helyi csúcsok és völgyek a repedési folyamat fékeződése és annak gyorsulása, (konstans feltételek mellett is) sztochasztikusan változik a lokális anyaginhomogenitások függvényében. A repedés megindulását az $F_2(p)$ és az $R_2(p)$ erők által a P pont közvetlen környezetében terhelt anyagra ható, többtengelyű feszültségkoncentráció idézi elő. Mivel a közetek törésekor fellépő húzófeszültségek kb. egy nagyságrenddel kisebbek, mint a nyomófeszültség, a közet nyomásra és nyírásra ellenállóbb, a repedés jellemzően az ék behatolása által okozott húzófeszültség törést okozó hatása következtében alakul ki. A kristálysíkok (kristályos anyagnál) a húzó erőhatásra annyira eltávolodnak, hogy az atomsíkok közötti rövid hatótávú erők hatása megszűnik, a felületek elválnak, a fizikai jellemzők ezen a síkon ugrásszerű változást szenvednek. Az elvált felületek ún. felületi energiája (feszültsége) megnő, a W rugalmas energia egyenlő lesz az elvált felületek felületi energiájának 2α növekményével: $W = 2\bar{P}B\alpha$, mert két szabad felület keletkezik a $\bar{P}B$ szakaszon, azaz a $c(x)$ görbe mentén, a P pontban, az x tengely érintője mentén indul a törés, amely a B pontban lép ki a szabad felületre. A törés a gyakorlatban rendkívül gyorsan megy végbe.



2. ábra.

Ebben az egyszerű esetben a belső felületet szétválasztó, törést előidéző, húzó hatást vesszük figyelembe, amelyet a P pontban ébredő σ_2 , a törésfelületre merőleges húzófeszültség jellemez. Ennek a feszültséghatárnak az elméleti értéke az agyag atomi struktúrája alapján ugyan levezethető, de a kapott elméleti értékek nagyságrendileg nagyobbak, mint a kísérleti adatok. Az eltérések oka a diszlokációk és az anyag szerkezeti hibahelyek hatásán túl a hőmozgások hatására vezethető vissza. A hibahelyek az atomsíkok közötti elektromos vonzóerő potenciálviszonyait döntően befolyásolják [9]. A σ_2 feszültséget a P pontban fellépő nyomaték (M) hozza létre.

$$M = M_1 + M_2 = k_1 F_2(p) + k_2 R_2(p), \quad (25)$$

$$\text{ahol } k_1 = (1/2)p \tan \theta; k_2 = (1/2)p.$$

Így a nyomatékegyenlet:

$$M_1 = A_1 p + A_2 p^2, \quad (26)$$

$$M_2 = B_1 p + B_2 p^2, \quad (27)$$

ahol

$$A_1 = (1/2) \tan \theta [F_1(\theta) - \sigma_1 b (\tan \theta + \mu) p_1], \quad (28)$$

$$B_1 = (1/2)[R_1(\theta) - \sigma_1 b(1 - \mu \tan \theta)p_1], \quad (29)$$

$$A_2 = (1/2) \tan \theta \sigma_1 b (\tan \theta + \mu), \quad (30)$$

$$B_\gamma = (1/2)\sigma_1 b(1 - \mu \tan \theta), \quad (31)$$

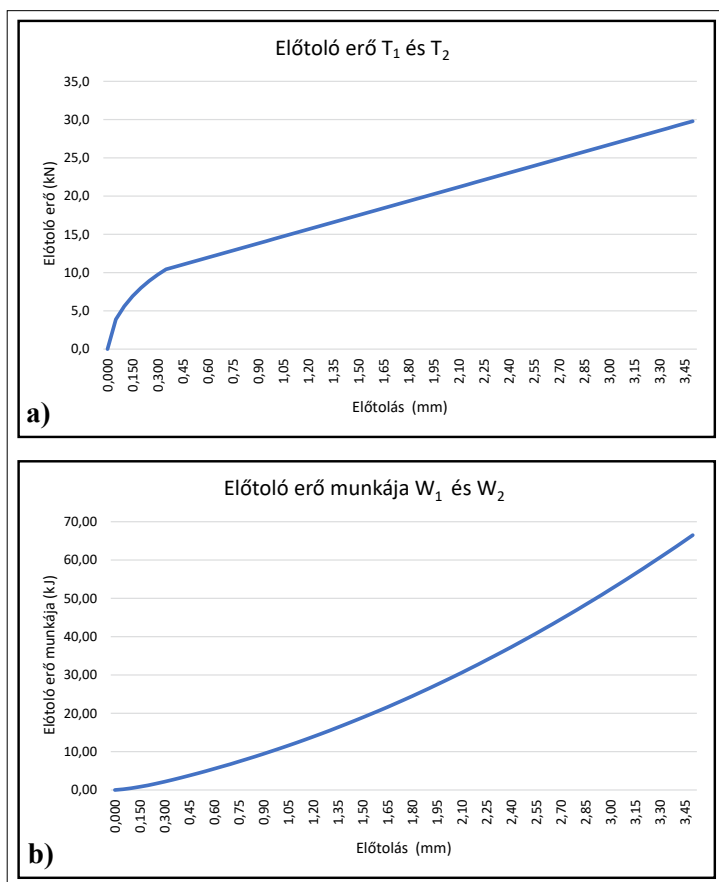
$$Z_1 = A_1 + B_1, \quad (32)$$

$$Z_2 = A_2 + B_2 = (1/2)\sigma_1 b [1 + (\tan\theta)^2]. \quad (33)$$

A törés bekövetkezik, ha $M = Z_1 p + Z_2 p^2 \geq M_{\max}$ -nál, a törőnyomatéknál. Az ék behatolása kiváltotta $\sigma_2(x = p_2)$ értéke a $P(x = p_2)$ pontban maximális, és túllépi a töréshez szükséges határt $\sigma_{2\max} = (M/\eta)K$, ahol η a feszültségeloszlástól és K geometriai szituációtól függő faktor. Amennyiben a K tényező meghatározásához abból a bizonyított tényből indulunk ki, hogy a törés egy vagy több, a közetben megálló repedés külső erőhatásra történő kinyílásával jön létre és terjed, a K meghatározásához a törésmechanikai elméletekre kell támaszkodni [11, 13]. Mivel a közetek hasítása dinamikus folyamat, az erők impulzusszerűek, bonyolult problémával állunk szemben. Ezt az elméleti bonyolultságot az erőhatás okozta többtengelyű feszültségállapot, valamint a közetek nem izotróp és homogén anyagi tulajdonságai csak tovább fokozzák.

Amennyiben $\sigma_{\max}$ értéke kísérletekkel meghatározható, annak értékében a repedések hatása megjelenik, K csak a geometriai paraméterek függvénye. Dimenzióanalízist végrehajtva adódik, hogy $K = K$, azaz K csak b és t függvénye,

$$K = c(\theta) b t^2,$$



3. ábra.

ahol $c(\theta)$ egy, a geometriai elrendezésből adódó konstans, meghatározásával most nem foglalkozunk. A tiszta hajlítás esetén – a θ ékszög hatásától eltekintve $c(\theta)$ – ez definitív $c = 1/6$. Ezzel

$$Z_1 p + Z_2 p^2 = \eta c(\theta) b t^2 \sigma_{2\max}, \quad (34)$$

azaz

$$p^2 + (Z_1/Z_2)p - [\eta c(\theta) b t^2 \sigma_{2\max}]/Z_2 = 0. \quad (35)$$

Közelítő értéke a $Z_1 = 0$, ($Q = 0$, tökéletes él) esetre, így

$$p_2^2 = [\eta c(\theta) b t^2 \sigma_{2\max}]/Z_2, \quad (36)$$

$$p_2 = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\sigma_{2\max}}{\sigma_{1\max}} t \cos \theta}. \quad (37)$$

Példaképpen ($c = 1/6$, $\eta = 1$) hasításkor, $\sigma_{2\max}/\sigma_{1\max} = 0,1$ mellett, $\theta = 15^\circ$ -os ékkel, $t = 20$ mm fogásmélység esetén $p_2 = 0,18 \cdot 20 \cos 15^\circ$ mm $\sim 3,5$ mm, közelítőleg a behatolás, ami töréshez és repedéses állapothoz vezet. A törésig a T előtoló erő (a törés pillanatában ~ 30 kN) által végzett munka $\sim 66,5$ kJ, ha a súrlódási tényező $0,5$.

3. A forgácsleválás folyamata

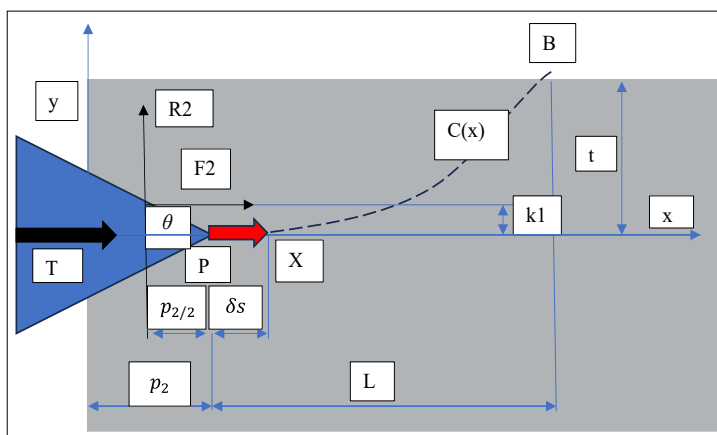
A repedés keletkezése után a P pontnál létrejött X repedésfront a $\overline{PB}$ görbén helyezkedik el, és a B pont felé terjed (piros nyíl). Nem ismerjük a $c(x)$ görbét, és nem tudjuk, hol van a B pont a peremfelületen. Az viszont ismeretes, hogy az előtoló és repesztőerő a p -nél elérte a maximális értékét. A folyamat leírása érdekében tekintsük a 4. ábrát:

Az ék további, az X repedésfront terjedésével járó behatolása gyors és heves energiaátalakulásokkal járó folyamat. A forgácsban és környezetében, ha a törés az anyag ellenállása (helyi hibahelyek ritkulása) miatt megakad, E_{rug} rugalmas energia halmozódik fel, amit a behatoló ék által előzetesen közölt mechanikai munka biztosít. Mindez főleg a $T(e)$ erő növekedése az X pontban lévő repedésfronton a repedést tovább hajtó tendenciát erősíti, míg nem a repedés tova-terjed (δs), és akkor áll meg, ha a közetben tárolt rugalmas energia elfogy, illetve az ék δe behatolása ezt még nem képes fedezni. Valójában mindkét folyamat egy időben, váltakozva történik, a vágóél által közölt mechanikai munka egy időben fordítódik a rugalmas energia növelésére és a hasadásra.

Ez egy gyors lengés. A folyamat ciklikusan ismétlődik a forgács leválásáig. Ezeket a tendenciákat látjuk a kísérleti eredményekben [6]. A $c(x)$ görbe alakja attól függ, hogy a repedés a görbe egy pontját elérve melyik irányban terjed. A fő terjedési irány minden pontban a $c(x)$ irántangense. Ezt a legvalószínűbb iránynak tekinthetjük.

$$W_e = E_{\text{rug}} + E_A, \quad (38)$$

ahol W_e az előtoló erő $T(e) = 2F(e)$ munkája az ék elmozdulása az 1 és 2 pont között, azaz az 1 és 2 pont között δe az elemi előtolás.



4. ábra.

$$W_e = \int_{e_1}^{e_2} T(e) \delta e. \quad (39)$$

A rugalmas energia főleg a forgács hajlításából és a nyomófeszültségből adódik. A forgács hossza a $p_2 + s$, azaz az X repedésfrontig $p + \delta s$, ahol s a $c(x)$ törésgörbe ívhossza. Tételezzük fel a lineárisan rugalmas tulajdonságot és hajlító és nyomó erőhatást:

$$E_{\text{rug}} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{M^2}{2IE} \delta s + \int_{p_2}^p \frac{N^2}{2AE} \delta s, \quad (40)$$

a továbbiakban az N normálerő által indikált rugalmas energiát elhanyagoljuk,

$$E_{\text{rug}} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{M^2}{2IE} \delta s, \quad (41)$$

ahol E a rugalmassági modulus, $I = (bt^3)/12$ az inercianyomaték, $M(p)$ a forgácsra gyakorolt hajlítónyomaték

$$E_A = \int_{p_2}^p (2\alpha b) \delta s, \quad (42)$$

ahol α a felületi energia, δs a repedés elemi hossza.

3.1. A repedés terjedéséről

Ebben a kezdeti szakaszban az előtoló erő felépíti a kőzetben a rugalmas energiát, ami megindítja a repedést és fedezi annak a terjedését. A repedést a rugalmasan tárolt energia hajtja előre, amit a behatolás

környezete tárol. A (34) összefüggés szerint kiszámítottuk azt a behatolási mélységet, amelynél a repedés megindul. A lejátszódó folyamatban a kőzet vágóél általi aprítása és őrlése, valamint a repesztő hatás egy időben történik. Amennyiben a 2. szakaszban az ékhatás okán az aprózódásra fordított energiát elhanyagoljuk, és (40) szerint eltekintünk a normálerő okozta rugalmas energia hatásától, (25) értelmében a $Z_1 = 0$, $p_1 = 0$ feltétel mellett írható:

$$E_{\text{rug}} = \int_0^{p_2} \frac{(Z_2 s^2)^2}{2IE} \delta s, \quad (43)$$

ahol s a behatolás ívhossza. Mivel $Z_2 = (1/2)\sigma_1 b [1 + (\tan\theta)^2]$ konstans:

$$E_{\text{rug}} = \frac{[(1/2)\sigma_1 (1 + (\tan\theta)^2)]^2}{IE} \int_0^{p_2} s^4 \delta s \quad (44)$$

$$E_{\text{rug}} = \frac{15}{2} \frac{\sigma_1^2}{E} [1 + (\tan\theta)^2]^2 \frac{b}{t^3} p^5. \quad (45)$$

A (42) egyenlet alapján a kinyílt repedés felületi energiáját megkapjuk, ha az α felületi energiát a repedés hossza mentén konstansnak tekintjük. A szám szerű adatok (37) szerint ez az energia $p = 3,5$ mm behatolás behelyettesítése esetén 0,113 J. Ez az érték a törésig végzett mechanikai munka kb. 66,5 kJ értékéhez képest rendkívül kicsi, ami azt mutatja, hogy a kőzet rugalmasenergia-tároló képessége (ebben az esetben) elenyésző. Hallgatólagoosan azt is feltételezzük, hogy az ék mozgató szerkezete is ideálisan merev. Így írhatjuk:

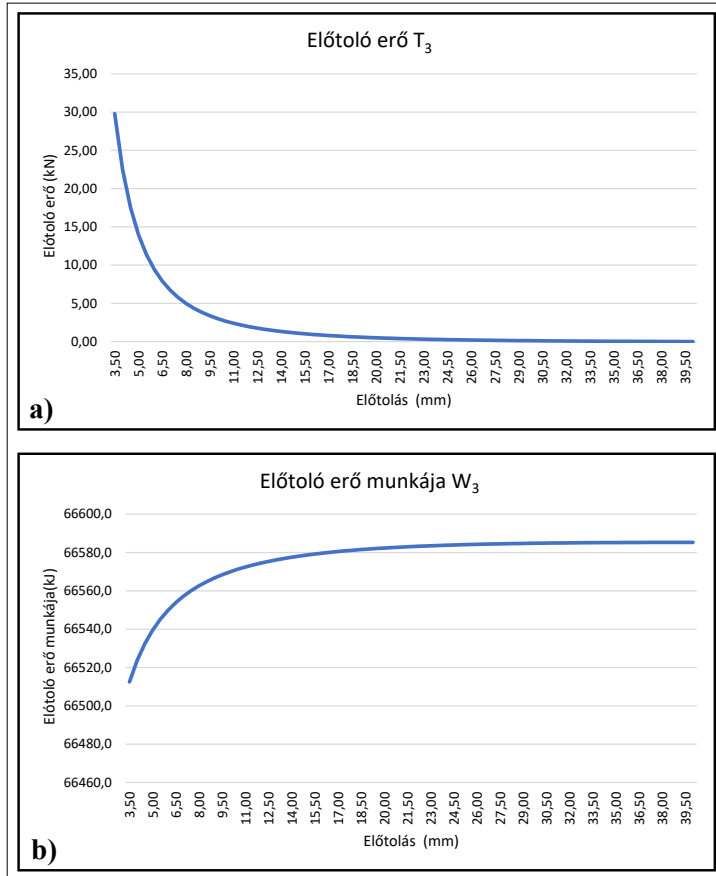
$$\int_{e_1}^e T(e) \delta e = E_A = \int_{p_2}^p (2\alpha b) \delta s, \quad (46)$$

$$\hat{T}(e - e_1) = 2\alpha b(p - p_2). \quad (47)$$

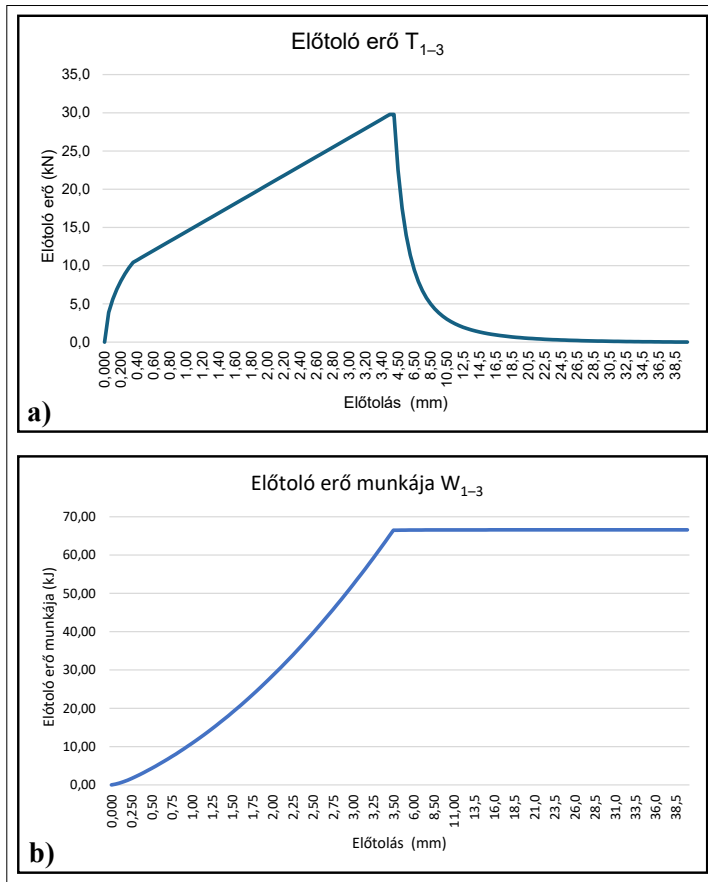
Mivel p_2 -ig $e \equiv p$, a repedés megindulásáig az átlagos előtoló erő $\hat{T}$ értékére teljesül:

$$\hat{T} = 2\alpha b \frac{\Delta p}{\Delta e}. \quad (48)$$

Sajnos (46) alapján a $T(e)$ függvény nem számítható, mert nem ismerjük a $p = f(e)$ függvényt. Az $f(e)$ függvény ismeretében $T(e) = 2\alpha b(df(e)/de)$. Az $f(e)$ függvény az előállítás a repedésterjedés mélyebb vizsgálatát vonja maga után, amivel most nem foglalkozunk. Mindenesetre, ha a rugalmas energia nem játszik szerepet, a repedésterjedés kis szakaszaira az átlagos előtoló erő az előtolással csökkenő tendenciát mutat. Ez egyezik a tapasztalattal a repedés megindulása utáni szakaszra. A $T(e)$ függvény 3. szakaszra (forgács leválása) érvényes közelítése kapható, ha $T(e)$ -t a $T \sim 1/e^2$ alakban



5. ábra.



6. ábra.

vesszük fel. A konstansok megfelelő behelyettesítésével $e_{\max}$ (max. előtolás) bevezetésével a függvény p_2 és $e_{\max}$ tartományra:

$$T_3(e) = T(p_2) \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - p_2} \left(\frac{p_2}{e} \right)^3. \quad (49)$$

A függvény alakja a számszerű értékekkel, $e_{\max} = 40$ mm-t a 3.2 szakaszt alapul véve.

Értelemszerűen a $p_{\max} - p_2$ a $c(x)$ törésgörbe hossza a $\overline{PB}$ íven. A (49) függvény integrálása p_2 és $e_{\max}$ (a forgács leválása) között a következő egyszerű eredményre vezet:

$$W_3 = \frac{1}{2} T(p_2) \left(p_2 - \frac{p_2^2}{e_{\max}} \right). \quad (50)$$

Ha $e_{\max} = p_2$, W_3 értelemszerűen 0. Ha $e_{\max} \gg p_2$, az eddigi számítások szerint $W_3 = 88$ J-nak adódik. A végeredményt a teljes előtolás tartományára a 6a, b. diagramok mutatják.

3.2. A forgácsleválás és az adhéziós erő

Hivatkozunk a [4]-ben tárgyalt evansi elmélet továbbfejlesztésének tekinthető eredményekre, ahol az F és R erők együttes nyomatékát a törés B kifutási pontjára vontakozóan határozzuk meg, $\lambda = (1 - \mu \tan \theta)/$

$(\mu + \tan \theta)$. Az adhéziós erő a $c(x)$ görbe ds elemi ívhosszára $dH = \sigma_2 b ds$. A dH adhéziós erőt p_2 -től a B pontig integrálva, M -mel egyenlővé téve kapjuk:

$$\frac{T}{2} \left[\left(-t - \frac{p_2}{2} \tan \theta \right) + \left(l - \frac{p_2}{2} \right) \right] \lambda = \frac{1}{2} \sigma_{2\max} b t^2 + \frac{1}{2} \sigma_{2\max} (l - p_2), \quad (51)$$

$$T(p_2) = \sigma_{2\max} b \frac{t^2 + (l - p_2)^2}{\lambda \left(1 - \frac{p_2}{2} \right) - \left(t - \frac{p_2}{2} \tan \theta \right)}.$$

Amennyiben $p_2 \ll l$, ami általában teljesül, megkapjuk a [4] szerinti erőfüggvényt μ -vel való összefüggésekkel kiegészítve:

$$T \cong \sigma_{2\max} b \frac{t^2 + l^2}{l\lambda - t}, \quad (52)$$

ami a [4]-ben közölt eredménnyel egyező, ha λ helyébe $\mu = 0$; $\lambda = 1/\tan \theta$ kerül. Az optimális forgács hossz az $\eta = l/t$ helyettesítéssel a fajlagos forgácsolási ellenállás $f = T/(bt)$ bevezetésével [4]: $f = \sigma_{2\max} [(1 + \eta^2)/(\lambda\eta - 1)]$, amelynek a szélső értékéhez tartozó forgácsméretet tekintjük optimumnak: $df/d\eta = 0$, amiből $\eta^2 - (2/\lambda)\eta - 1 = 0$ következik. Így $\eta_{\text{opt}} = (1/\lambda) \{ 1 + [1 + (1/\lambda)^2]^{1/2} \}$. Ez a példa szerint $\eta_{\text{opt}} = 2$ és $l = 40$ mm optimális forgács hosszát eredményez. Az (52) összefüggés számszerű kiértékelése az $\eta_{\text{opt}} = 2$ esetre, T -re 260 kN erőt ad ($f = 324$ N/mm²), ami jelentősen eltér a (37) alapján számított 30 kN maximális értéktől. Ez mutat rá, hogy mindazon kísérletek, amelyek az erőket nem a repedések terjedésének fizikája alapján írják le, a forgácsleválást, a felületek elválását, a leírást a teljes felületen egyszerre megvalósuló folyamatként kísérlék meg, elvileg sem adhatnak helyes eredményt.

4. Néhány következtetés

4.1. Az él jósági foka

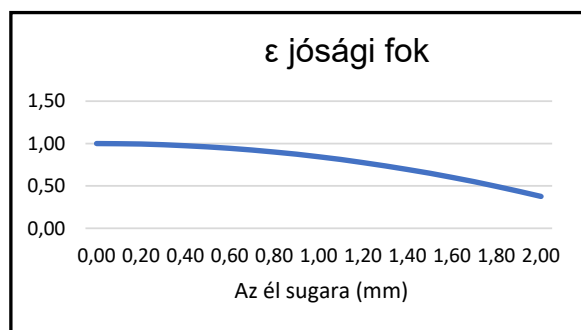
$$\varepsilon = 1 - \frac{W_1}{W_2} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Q}{p_2} \right)^2 \beta,$$

$$\beta = \frac{\pi - 2\theta - \sin 2\theta}{\tan \theta + \mu} = 3,81,$$

$$p_2 = 3,51 \text{ mm}, \quad \varepsilon = 1 - 0,156 Q^2.$$

Az ε tényező mutatja, hogy mekkora a tompa él okozta W_1 veszteség és a hasítási munka W_2 aránya a vágóél sugara Q függvényében. Az $\varepsilon = 1$ az ideálisan éles $Q = 0$ szerszám esete. $\varepsilon = 0$, ha $Q = \sqrt{2} p_2$.

A példa esetében $Q \sim 5$ mm az extrém életlen szer-
szám esete.



7. ábra.

4.2. Fajlagos forgácsolási energia e

$$e = \frac{\sum_1^3 W_i}{V},$$

mivel $W_1 = 2674$ J, $W_3 = 53$ J, a példa szerint elha-
nyagolhatóak. V a porzóna térfogata: $V = 131$ mm³
 $= 131 \cdot 10^{-9}$ m³. A forgács össztérfogata a 3.2 szakasz
szerinti optimális 40 mm forgácsszal, 32 000 mm³,
ami 32 000 m³. Az összenergia értéke: ~ 67 kJ.

$$e \sim \frac{W_2}{V} = \frac{67 \text{ kJ}}{32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 2,1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}.$$

Ez kerekítve 583 kWh/m³ térfogatra vett energiaszük-
ségletnek felel meg.

5. Összefoglalás

A közethasítás fizikai leírása nem kerülheti meg a
repedések keletkezésének és terjedésének beható
fizikai vizsgálatát. A vágóél geometriáján kívül, a
vágóél hatására kialakuló feszültségmező indukálta
repedések és azok tovaterjedésének fizikai törvény-
szerűségei játszanak döntő szerepet abban, mekkora
erők ébrednek és mennyi energia szükséges a kőzetek
bontásának folyamatához. A rugalmas energia kérdé-
se a dinamikus jelenségek erősödésével a kőzetben
fellépő rugalmas hullámok vizsgálatához vezet. A
(46) összefüggés vezet a töréskor keletkező új felü-
letek megemelkedett energiaszintjének kérdéséhez,
a kőzetek felületi energiájának α kérdéséhez. A $p =$
 $f(e)$ függvény a repedés megindulásától játszik döntő
szerepet, ettől kezdve a repedés p hossza és az e elő-
tolás kapcsolata bonyolulttá válik. Az előtoló erő az
elemzések (48) szerint az e előtolás értékével négy-
zetes fordított arányban van, és gyorsan nullára csök-
ken. Az is megállapítható, hogy a mechanikai munka
zöme a porzóna kialakítására fordítódik, ami egyben
azt is jelenti, hogy a vágóél geometriai kialakítása a
porzóna p_2 mélységének megfelelő hosszban a leg-
fontosabb. Annak az általános elméleti tisztázása,

hogy a vágószerszám geometriája és a kőzetjövész-
tés fajlagos energiafelhasználása milyen számszerű
kapcsolatban van. Továbbá nyílt kérdés, hogy van-e
olyan matematikai elemzésre alkalmas szintetikus
eljárás, amely az energiamennyiség optimalizálását
a vágószerszám felületének variációs módszerekkel
való meghatározásával oldja meg.

Irodalom

- [1] J. Rojek (2007): Discrete element modelling of rock cutting. Computer Methods in Material Science, Vol. 7. No. 2.
- [2] Duan Xiong, Yu Li, Cheng Dazhong (1995): Chaotic dynamical features of rock breakage mechanism with self-controlled hydro pick. Chinese Journal of Rock Mech. and Engng., 14, supp., 484–491.
- [3] J. Rostami, L. Ozdemir, D. M. Neil.: Roadheaders Performance Optimizatin for Mining and Civil Const-
ruction. Earth Mechanics Institute, Golden, Colorado 80401
- [4] Omaszta István (2024): Gondolatok Evans közethasí-
tási modelljéről. Bányászati és Kohászati Lapok, 157/
II, 19–24.
- [5] A. A. Evans, C. D. Pomeroy (1966): The Strength,
Fracture and Workability of Coal. Pergamon Press
- [6] Gao Kuidong, Du Changlong, Jiang Hongxiang, Liu
Songyong: A theoretical model for predicting the
peak cutting force of conical picks. School of Mecha-
nical and Electrical Engineering, China University of
Mining & Technology
- [7] Yinghui Liu, Y. Bar-Cohen, Zensheu Chang: Procee-
dings of IDETC/CIE 2005 ASME 2005 International
Design Engineering Technical Conferences & Com-
puters and Information in Engineering Conference,
2005, Long Beach, California, USA
- [8] M. H. Miller, D. L. Sikarskie: On the penetration of
rock by three-dimensional indentors. Space Systems
Division AVCO Corporation, Department of Aerospace
Engineering, University of Michigan
- [9] L. D. Landau, E. M. Lifsic: Elméleti fizika VII. Ru-
galmasságtan, Diszlokációk és üregek elmélete
- [10] Ch. Lunow: Two-dimensional simulation of the
pressing and the cutting rock destruction. TU Ber-
gakademie Freiberg Geotechnical Institute Chair for
Rock Mechanics
- [11] Hua Guo: Rock cutting studies using fracture mecha-
nics principle. University of Wollongong, Research
online
- [12] Dr. Bocsányi János: Bányagéptan, Jövesztő és Ra-
kodógépek 151–153. o.
- [13] H. Blumenauer, G. Pusch: Műszaki törésmechanika.
3. fejezet
- [14] Anjana Thoroppady Kittu: Surface energy characte-
ristics of granite and limestone aggregates with res-
pect to 2D and 3D surface roughness measurements.
Bachelor of Technology in Civil Engineering Mahat-
ma Gandhi University Kottayam, Kerala, 2007. Sub-
mitted to the Faculty of the Graduate College of the
Oklahoma State University in partial fulfilment of the
requirements for the Degree of Master Of Science.
December, 2013.

Poszterek a BKL-ben – Az MFK Kar és a TEKH Szakkollégium 2024-es terméséből

Posters in BKL – From the 2024 crop of the MFK Faculty and the TEKH College

A poszterek tisztavirág életűek, amelyeket egy-egy konferencián, vándorgyűlésen mutatnak be, majd 1-2 napos élet után a mindennapok témáiba merülve a legtöbbször elfelejtődnek, ugyanakkor viszonylag kevés érik közülük tovább folyóiraticské, könyvfejezetté. Viszont pillanatképet adnak az adott műhelymunka mindennapjairól.

A Bányászati és Kohászati Lapok és a TEKH Szakkollégium az év során közösen tár a nagyobb nyilvánosság elé a műszaki föld- és környezettudományt különböző (BSc, MSc, PhD) szinten tanuló hazai és külföldi diákok korábban konferenciákon, vándorgyűléseken szereplő olyan posztereit, amelyek témája fokozottan érdekelhetik az olvasókat.

A mostani és következő BKL-számokban egy-egy posztert mutatunk be. Ez oly módon történik, hogy a szerzőkre és műhelyeikre vonatkozó információk után a poszteren szereplő témát részletezik röviden a szerzők, hozzáfűzve néhány, az életből vett példát, hasonlatot, amelyek esetleg nem bírnák el a szigorúbb tudományos kritikát.

Az ismertető után következik a poszter – a hivatkozással elérhető elektronikus verzióban teljes méretben –, amelyet az olvasó letölthet, böngészhet, s megfelelően hivatkozva idézhet is.

Reméljük, hogy a kísérlet mindenki hasznára lesz: növeli a szerzők ismertségét, a karok láthatóságát, illetve az olvasók szakmai tudásának naprakészségét.

The poster is a short-lived publication. It appears at conferences and symposiums, and after a brief lifespan of one or two days, it often fades into everyday obscurity and is largely forgotten. Only a few of them become later as journal article or book chapter. However, they provide a snapshot of the daily work within research groups.

Throughout the year, the Bányászati és Kohászati Lapok (Mining and Metallurgical Journal) and the TEKH Student College jointly provide greater visibility to posters presented by both Hungarian and international students studying technical earth and environmental sciences at various levels (BSc, MSc, PhD). These posters cover topics that may be of particular interest to many readers.

In this and upcoming issues of BKL, we will introduce selected posters. This will be done by first providing information about the authors and their research groups, followed by a brief summary of the topic presented in the poster. The authors will also include a few relatable, real-life examples or analogies—ones that might not necessarily withstand strict scientific scrutiny but help illustrate the subject matter in a more engaging way.

After the introduction, the full poster will follow (in the electronic version, it will be available in full resolution via a reference link), allowing readers to download, browse, and cite it properly.

We hope that this initiative benefits everyone involved by increasing the visibility of the authors and their faculties while also keeping readers informed and up to date in their respective fields.

Nagy térerősségű (HFSE) kémiai elemek dúsulása a Bükkben – geokémia és ásványos összetétel

BALASSA CSILLA , KRISTÁLY FERENC , NÉMETH NORBERT 

Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar,
Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet

A poszter a PDAC-SEG Student Minerals Colloquium, online (Toronto, Kanada), versenyén (2022. június 28–29). PhD-kategória megosztott 2. helyezést nyert.

A szerzők: Balassa Csilla, MSc, földtudományi mérnök az Intézet PhD-hallgatója, és témavezetője dr. Németh Norbert egyetemi docens, illetve dr. Kristály Ferenc tudományos főmunkatárs.

A kutatócsoport több éve foglalkozik a Bükkben jelentkező ritkaföldfém-anomáliákkal. Az itt közreadott poszteren a HFSE-elemek dúsulásának vizsgálati eredményeit mutatják be.

A HFSE-elemek a földkéregben szereplő litofil elemek közül azok, amelyek kis ionrádiusz – nagy kationtöltés-erősség következtében az anionokhoz nagy kötési-erővel kapcsolódnak (többek között Nb, Ta, Zr, Th, RFF).

A poszteren egy rövid földrajzi-földtani jellemzést olvashatunk a vizsgált két előfordulásról: az egyik az ÉK-Bükkben (Lillafüredi, Vesszős-völgy) a másik a DK-Bükkben (Kőris völgy, Közép-szék-lápa) található. A dúsulások triász korú sziliciklasztos üledékes kőzetekben (Hegyes-tetői és Felső-tárkányi Formációk) és szintén triász korú metavulkanitokban (feltehetően Szinvai Metabazalt) vannak jelen.

Az ICP-MS módszerrel meghatározott nyomelem-geokémiai összetétel a Nb, Ta, Zr, Th, RFF anomális dúsulását mutatja, melyhez a kálium-tartalom jelentős megemelkedése kapcsolódik. Apró méretű (legfeljebb ~10 µm) és viszonylag alacsony koncentrációjuk miatt sem az optikai mikroszkópia, sem az XRD nem

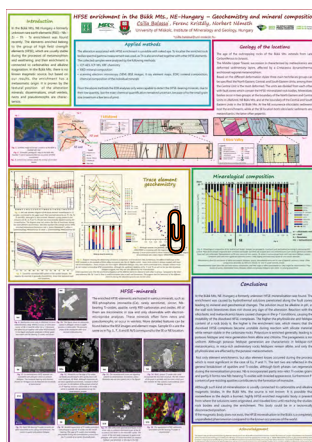
alkalmas a ritkaföldfémeket hordozó fázisok kimutatására, egyedül az elektronmikroszkópos vizsgálatok képesek erre. Az eredmények alapján a HFSE-ásványok a következők: RFF-foszfátok (monacit-(Ce)), RFF-karbonátok (parisit-(Ce), bastnäsit-(Ce)), Nb-Ti-oxidok (eszkinit-(Ce) és -(Y)), Nb-tartalmú Ti-oxid, cirkon. A nagy K-tartalmat a fengit nevű csillám és K-földpátok hordozzák. Általában a megnövekedett HFSE-koncentráció együtt jár ezen ásványok magasabb részarányával.

A hasonló ásványos összetétel és elemcsoport ismert példák alapján alkáli intrúziókhoz kapcsolódik. Ilyeneket a Bükkben nem ismerünk, de valószínűsíthető, hogy az átalakulási ásványegyüttes megjelenése itt is egy eltemetett alkáli magmás ható miatt jöhetett létre. Elképzelhető, hogy a későbbi tektonikai mozgások hatására ez a magmás test elszakadt a dúsulást hordozó kőzettestektől.

* * *

A poszter életnagyságban letölthető az alábbi képre *duplán* kattintva.

További információ: csilla.balassa@uni-miskolc.hu



Szerzői életrajzok

GREGA OSZKÁR  okleveles kohómérnök, 1972-ben végzett a Nehézipari Műszaki Egyetem Kohómérnöki Karán. Három évig a Borsodi Ércelőkészítő Mű technológusa, 1975-től az NME Vaskohászattani Tanszékén adjunktus. 1991-től a Dunaferr műszaki fejlesztési igazgatója, majd a DAM Steel Rt. műszaki és termelési igazgatója. 2003-tól 2009-ig, nyugdíjazásáig a Miskolci Egyetem Vaskohászattani Intézeti Tanszékének a vezetője. Jelenleg címzetes egyetemi tanár a Miskolci Egyetemen és a SteelTech Center vezető szakértője. Euromenedzser, szakokleveles közgazda, Lean szakmérnök, igazságügyi szakértő.

HAVASI ISTVÁN  intézetvezető egyetemi docens a Nehézipari Műszaki Egyetemen szerzett bányamérnöki oklevelet 1985-ben. 1986 óta az egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Tanszékén dolgozik tanársegédként, ill. adjunktusként, majd 1997-től, PhD-fokozata megszerzésétől docensi kinevezést kapott. 2000-től tanszékvezető. Az OMBKE Egyetemi Osztály elnöke.

NAGY CSENGE  a Miskolci Egyetem vegyészmérnök-hallgatója. A mesterképzést végzi, és a Kerpely Antal Doktori Iskola hallgatója. A duális képzéséből következően 2,5 év szakmai tapasztalattal rendelkezik, amelyet a Wanhua-BorsodChem Zrt.-nél szerzett. Jelenleg a Miskolci Egyetem Kémiai Intézetének részfoglalkozású alkalmazottja, elsősorban a nitrobenzol hidrogénezésével és katalizátorfejlesztéssel foglalkozik. Tanulmányai során aktívan részt vett tudományos kutatásokban és konferenciákon.

OMASZTA ISTVÁN  1985-ben szerzett diplomát az NME-n Bányagépész és Villamosmérnök szakon. Ezt követően az Országos Érc- és Ásványbányák Vállalatnál tervezőmérnök-ként, majd tervezési osztályvezető-helyettesként dolgozott. Ez idő alatt elvégezte a Budapesti Közgazdaságtudományi Egyetem mérnök-közgazdász szakát. 1990-ben az ausztriai Allgaier Verfahrenstechnik GmbH, Hofkirchen fejlesztőmérnöke lett. A Montanuniversität Leoben (Ausztria) magánhallgatójaként a végeselemes módszerek használatát sajátította el. 2000-től a Semperit Technische Produkte GmbH, Wimpasing nemzetközi projektvezetőjeként dolgozott, magyarországi műanyag- és gumiipari fejlesztéseken és Kínában. 2008–2015-ig a GWT GmbH munkatársaként fatüzelésű erőművek fejlesztésén és hatásfokának javításán dolgozott. 2015-től 2022-ig, nyugdíjba vonulásáig az Edtmayer Systemtechnik GmbH, Wien szenior projektvezetőjeként tervező- és fejlesztőmérnök-ként tevékenykedett energetikai területen mint energetikai tanácsadó.

RÓNAFÖLDI ARNOLD címzetes egyetemi tanár, a HUN-REN – Miskolci Egyetem Anyagtudományi Kutatócsoport tagja, a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézet munkatársa.

ROÓSZ ANDRÁS  kohómérnöki diplomáját a Miskolci Egyetemen 1968-ban szerezte. Széchenyi-díjas, Gábor Dénes életműdíjas magyar kohómérnök, egyetemi tanár, a magyar űranyagtudományi program irányítója, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja, a műszaki tudomány doktora. A Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Kar Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet Fémtani és Képlékenyalakítási Intézeti Tanszékének professor emeritusa.

SVÉDA MÁRIA  a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének tudományos főmunkatársa.

TASZNERZOLTÁN  okleveles kohómérnök, 2003-ban végzett a Miskolci Egyetemen, 2003-tól 2007-ig a Kerpely Antal doktori iskola hallgatója. 2007-től a Thyssen Krupp Steelnél technológusi és projektvezetői, majd főmetallurgus helyettesi feladatokat látott el. 2013-tól a Max Aicher német vállalatcsoport több cégénél műszaki igazgatói és ügyvezetői beosztásokban dolgozott. jelenleg az Ózdi Acélművek Kft. ügyvezető igazgatója. az ombke ózdi helyi szervezetének elnöke.

VERES ZSOLT  a HUN-REN – Miskolci Egyetem Anyagtudományi Kutatócsoport tagja, a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézet docense.

TOVÁBBI SZERZŐK: Balassa Csilla , Földessy János, Gyenes Iván, Kristály Ferenc , Németh Norbert , Pataky Csilla, Sycheva Anna, Szakáll Sándor, Tátrai Csaba

Útmutató a *Bányászati és Kohászati Lapok* szerzői számára

A folyóirat célja. A *Bányászati és Kohászati Lapok* az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) hivatalos tudományos szakfolyóirata. Célja eredeti tudományos munkák, áttekintő szemlék, rövid közlemények, vitairatok megjelentetése, sikeres poszterek bemutatása a bányászat és kohászat területéről, magyar és/vagy angol nyelven.

A folyóirat lehetőséget biztosít az Egyesület társadalmi és szakmai eseményeivel foglalkozó hírek közlésére, rendezvényeinek, konferenciáinak, valamint szakmai iránymutatásainak, ill. szakkönyvek ismertetésére. A folyóirat a társszakmák képviselőinek is biztosít publikálási lehetőséget. Alkalmat ad arra érdemes (PhD, MSc) disszertációk, továbbá (szakmai, akadémiai stb.) előadások közlésére.

A 2025. évtől kezdődően a szakcikk DOI-azonosítókkal ellátottak, miáltal ezek a cikkek a <https://doi.org/> nemzetközi felületen is elérhetővé válnak. Az egyes szerzők pedig ORCID-azonosítókkal adhatják meg szakmai profiljukat.

A kéziratok elbírálásának és elfogadásának joga a Szerkesztőséget illeti meg. A dolgozatok elbírálása szakmai lektorálás után történik. A közlemények végső elfogadásának feltétele, hogy azok formailag megfeleljenek a jelen Útmutatóban foglalt ajánlásoknak.

A kéziratok beküldése. A közleményeket az OMBKE, 1107 Budapest Hízaló tér 1. címen vagy *Hajnal József* felelős szerkesztő részére, e-mail: hirfor2000@gmail.com keresztül lehet benyújtani.

A kézirat készüljön közismert szövegszerkesztő(v/kk)el (Word, (La)TeX stb.) vagy egyértelműen strukturált, egyszerű szövegfájlként, különleges formátumok mellőzésével. A kéziratból készült PDF-formátumú másolatot elsősorban a lektorálás megkönnyítése céljából kérjük mellékelni.

A kéziratok szerkezete. A kéziratokkal kapcsolatos általános követelményként az alábbiak szem előtt tartását kérjük a Szerzőktől. A kézirat benyújtásának feltétele, hogy

1. a dolgozatot korábban még nem publikálták (kivéve előadás-kivonat vagy PhD-tézis formájában),
2. a kéziratot valamennyi szerző jóváhagyta,
3. a dolgozat nem sérti a Helsink Deklaráció (1975, revízió 2008) előírásait.

A kéziratnak a következőket kell tartalmaznia: 1. címmel; 2. magyar összefoglalás, kulcsszavak; 3. angol összefoglalás (angol címmel), keywords; 4. szöveg; 5. irodalomjegyzék; 6. táblázatok; 7. ábrajegyzék; 8. ábrák. Az oldalszámozást a címtől kezdve folyamatosan kell megadni.

1. A **címtől** sorrendben a következők szerepeljenek:
 - a kézirat címe magyar és angol nyelven, amely rövidítést nem tartalmazhat;
 - a szerzők neve (főnyelven, titulussal együtt), valamint a szerzők munkahelyének pontos, hivatalos megnevezése, a helységnevével együtt (és ha van ORCID-azonosítója);
 - a levelező szerző megjelölésével együtt a postai és e-mail címe.

2–3. Az **összefoglalások és kulcsszavak** megadása:

- *magyar nyelvű* cikk esetén rövid magyar nyelvű tartalmi kivonat (összefoglalás) és a témát jellemző kulcsszavak, ehhez csatlakozó hosszabb, egy oldalt lehetőleg nem meghaladó terjedelmű, részletes angol nyelvű tartalmi kivonat („abstract”) és kulcsszavak („keywords”);
- *angol nyelvű* cikk esetén rövid angol nyelvű tartalmi kivonat

és a témát jellemző kulcsszavak, valamint ezt követő hosszabb magyar nyelvű kivonat és kulcsszavak;

4. A kézirat világos szerkesztése különösen fontos az olvasó számára.

Bevezetés, előzmények: A munkához kapcsolódó azon legfontosabb korábbi szakirodalmi kutatási eredmények összefoglalása, melyekhez szorosan kapcsolódik a tanulmány egyértelműen megfogalmazott célja.

Anyag és módszerek (opcionális): A vizsgált anyag, esetleg korábbi származó adatok, azok forrása, az alkalmazott mérési, kiértékelési eszközök és módszerek ismertetése, a kapcsolódó hivatkozásokkal együtt. Standard eljárások esetén csak a hivatkozott módszertől való eltérést kell megfogalmazni.

Eredmények: A téma kifejtése, az új adatok és elért kutatási eredmények ismertetése, dokumentációja jól áttekinthető ábrákkal és táblázatokkal, ha szükséges megfelelő alcímekkel tagoltan.

Diskusszió: A kapott eredményeknek a saját korábbi eredményekkel és a szakirodalmi ismeretekkel való összevetése, értékelése, beágyazása a tágabb tudományos környezetbe, az új eredmények kiemelése. Indokolt esetben az eredményekkel összevonnak.

Következtetések: A tanulmány következtetései tézisszerű, rövid ismertetése az eredmények és a diskusszió ismertetése nélkül.

A szerzői **Köszönetnyilvánítást** a kézirat végén kérjük feltüntetni. A köszönetnyilvánítás opcionális.

5. Hivatkozott irodalom:

A hivatkozásokat a szövegbeli megjelenés sorrendjében kell megadni. A hivatkozás történhet számozott (pl. [1, 2], ..., [12]) megjelöléssel vagy szerzői névre való hivatkozás (pl. (Andersen 1988); (Frank N., et al. 2017); stb.) formájában.

Számozott hivatkozások esetén pl.:

- [1] Kleiber M., Havasi I., Konkoly Á. (2015): Bányamérési munkák a Mátrai Erőmű Zrt. Bükkrábrányi Bányüzemében. *Bányászati és Kohászati Lapok*, 148/2, 7–14.
- [2] Hári L. (2021): Nyersvasgyártás példatár. Magánkiadás. Dunaújváros, p. 26.

Szerzői névre történő hivatkozások esetén pl.:

Frank N., et al. (2017): Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 44/5, 333–343. DOI: 10.1080/03019233.2017.1303914.

Kérjük az irodalomjegyzékben felsorolt hivatkozások gondos ellenőrzését, és amennyiben rendelkeznek megjelenési adatokkal (<http>, DOI, [arXiv](https://arxiv.org/) stb.), szíveskedjenek azokat is feltüntetni.

6. A **táblázatokat** Word dokumentumként kell beküldeni, címmel kell ellátni. A címben és a táblázatban szereplő esetleges rövidítések magyarázata a táblázattal együtt szerepeljen.

7. **Ábrajegyzék:** Valamennyi ábra címét és a hozzájuk tartozó esetleges rövidítések magyarázatát egy közös lapon kérjük megadni.

8. Az **ábrák** mérete lehetőleg 8,5 vagy 17,5 cm széles legyen. Korábban már közölt ábra csak a szerzője és a kiadója engedélyével közölhető. A beküldött képfájlok grafikai minősége: szöveges ábrákat Power Point/Excel stb., egyéb ábrákat min. 300 dpi felbontású jpg, tif, külön fájlban, tömörítve (*.zip) és nem a kézirat szövegbe másolva kérjük mellékelni.

Elindult az OMBKE hivatalos Facebook- és LinkedIn-oldala

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület mostantól
a legnagyobb közösségi platformokon is elérhető!

**Az új oldalak célja, hogy tagjaink és az érdeklődők naprakész
információkat kapjanak az egyesület tevékenységeiről, eseményeiről,
és szakmai hírekről.**

Kövessen minket a Facebookon és a LinkedIn-en, hogy elsőként értesüljön
az iparág friss híreiről, eseményeinkről és a bányászati-kohászati közösség
életéről.

Csatlakozzon hozzánk online, és segítsen terjeszteni a hírt, hogy minél
többen megismerhessék Egyesületünk munkáját és hagyományainkat!

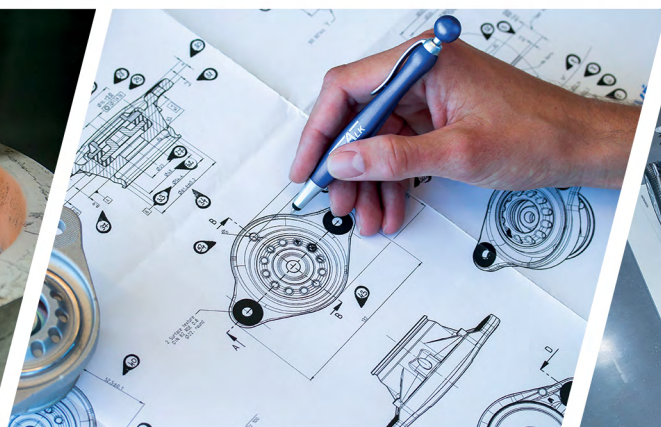
Facebook: <https://www.facebook.com/ombke1892/>

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/ombke>

Kövesse és ajánlja ismerőseinek az oldalakat!

Jó szerencsét!

FÉMALK



A FÉMALK ZRT. MÁR
TÖBB MINT HARMINC ÉVE
MEGHATÁROZÓ SZEREPLŐJE
AZ AUTÓIPARNAK.

CSATLAKOZZ
CSAPATUNKHOZ!

WWW.FEMALK.HU/KARRIER

Introduction

In the Bükk Mts, NE-Hungary a formerly unknown rare earth elements (REE) – Nb – Zr – Th – Ta enrichment was found recently. The elements enriched belong to the group of high field strength elements (HFSE), which are usually stable during the processes of metamorphism and weathering, and their enrichment is connected to carbonates and alkaline magmatism. In the Bükk Mts. there is no known magmatic source, but based on our results, the enrichment has a metasomatic origin. It is proven by the textural position of the alteration minerals: disseminations, small veinlets, nests and pseudomorphs are characteristic.

HFSE enrichment in the Bükk Mts., NE-Hungary – Geochemistry and mineral composition



Csilla Balassa*, Ferenc Kristály, Norbert Németh

University of Miskolc, Institute of Mineralogy and Geology, Hungary

*csilla.balassa@uni-miskolc.hu



2022 THE WORLD'S PREMIER MINERAL EXPLORATION & MINING CONVENTION

JUNE 13-15 IN PERSON JUNE 26-28 ONLINE

Applied methods

The alteration associated with HFSE enrichment is unvisible with naked eye. To localise the enriched rock bodies spectral gamma measurement was used, as Th is also enriched together with other HFSE elements. The collected samples were analysed by the following methods:

- ICP-AES, ICP-MS, XRF: chemistry
- XRD: mineral composition
- scanning electron microscopy (SEM) (BSE images, X-ray element maps, EDX): mineral composition, chemical composition of the individual minerals

From the above methods the EDX analyses only were capable to detect the HFSE-bearing minerals, due to their low quantity, but of the exact chemical quantification remained uncertain, because of the small grain size (maximum a few tens of μm).

Geology of the locations

The age of the outcropping rocks of the Bükk Mts. extends from Late Carboniferous to Jurassic.

The Middle-Upper Triassic succession is characterized by metavolcanics and deformed sedimentary layers, affected by a Cretaceous dynamothermal anazonal regional metamorphism.

Based on the different deformation styles three main tectofacies groups can be specified: the North Eastern, Central, and South Eastern Units; among them the Central Unit is the most deformed. The units are divided from each other with fault zones which contain the HFSE-mineralized rock bodies. Mineralized bodies occur in two groups: at the boundary of the North Eastern and Central Units in Lillafüred, NE Bükk Mts, and at the boundary of the Central and South Eastern Units in the SE Bükk Mts. At the NE occurrence siliciclastic sediments host the enrichments, while at the SE location both siliciclastic sediments and metavolcanics, the latter often perperitic.

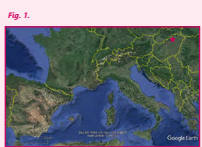


Fig. 1. Satellite image of Europe. Location of the Bükk is marked with star.



Fig. 2. Schematic geological map of the Bükk Mts. Number 1 and 2 represents the two occurrence of HFSE-enrichment.



Fig. 3. and 4. Cross sections about the vicinity of enriched bodies

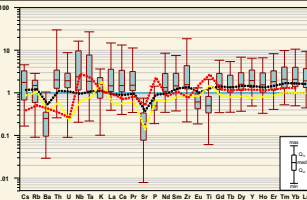
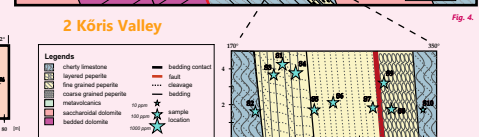
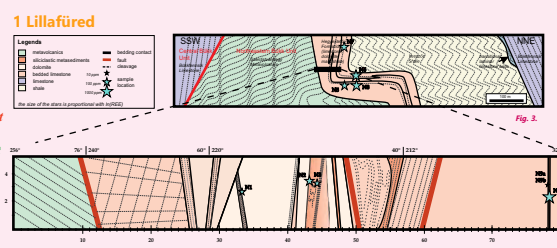


Fig. 4. Box and whiskers diagram of the trace element concentration in 27 samples, normalized to the upper crust. Most enriched elements are Th, Nb, Ta, Zr and REE, although K is also enriched. Elements usually present in low amounts are Ba, Sr, P and Ti, the last two most probably depleted during the mineralisation. The diagram does not contain the data of limestones, having low trace element concentration. Dot lines represent the average of non-HFSE enriched metavolcanic formations (red = Száva Metabazalt; yellow = Szentsárványi Metavolcanics SE; black = Szentsárványi Metavolcanics NE).

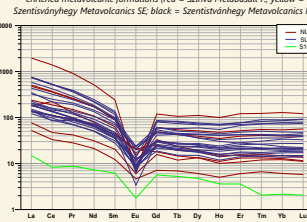
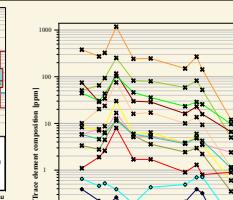


Fig. 5. Chondrite-normalised REE-pattern of the studied samples. The negative Eu-anomaly is generally characteristic. Green line represents wall rock limestone.

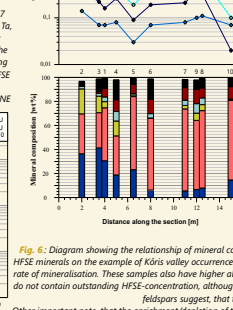
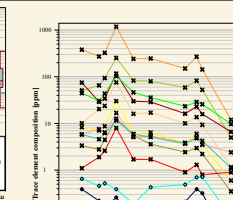


Fig. 6. Diagram showing the relationship of mineral composition and enrichment rate; furthermore, the different behaviour of the HFSE minerals on the example of Kőrös valley occurrence (see Fig. 4). Higher calcite - lower mica content is always coupled with lower rate of mineralisation. These samples also have higher albite/feldspar ratio, than more mineralised ones. Samples without micas do not contain outstanding HFSE-concentration, although the significant depletion of Eu, Ti and Th, as well as the low rate of potassic feldspars suggest, that they are also affected by the mineralisation.

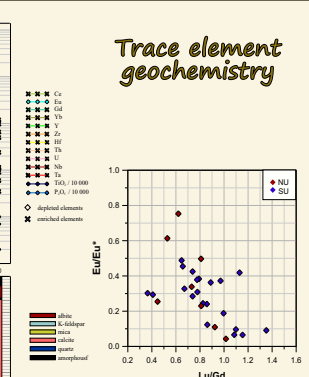


Fig. 7. Although samples are generally LREE-dominant, the ratio of HREE/MREE is increasing with the negative Eu-anomaly. As the Eu-anomaly is more accentuated in more mineralised rocks, higher degree of enrichments also means higher HREE/MREE fractionation.

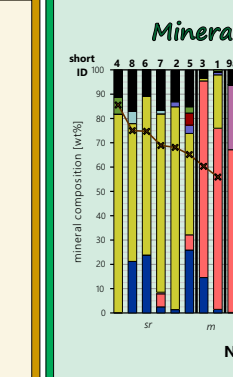


Fig. 8. Mineralogical composition of the studied rock bodies. Samples are grouped by structural units and ordered according to decreasing REE-content. Most of the samples originated from enriched rock bodies, but there are samples from non-enriched layers with similar genetic and others from wall rock carbonates. Metasediments of NE unit consist of mica, quartz, Fe-oxides in various proportions, with only minor feldspar content. Carbonate wall rocks have significant dolomite content, while slightly enriched marly layers do not contain dolomite.

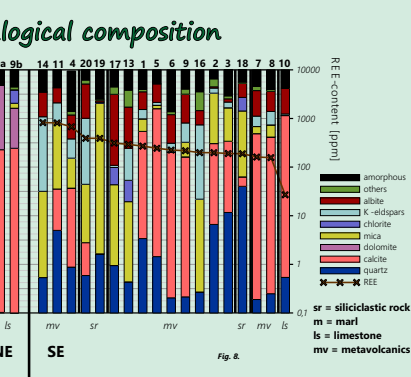


Fig. 8. Mineralogical composition of the studied rock bodies. Samples are grouped by structural units and ordered according to decreasing REE-content. Most of the samples originated from enriched rock bodies, but there are samples from non-enriched layers with similar genetic and others from wall rock carbonates. Metasediments of NE unit consist of mica, quartz, Fe-oxides in various proportions, with only minor feldspar content. Carbonate wall rocks have significant dolomite content, while slightly enriched marly layers do not contain dolomite.

Metavolcanics from SE unit consist of albite and potassic feldspars, quartz, diactheedral micas and in case of perperitic volcanics, calcite. Other components detectable by XRD are chlorite, Fe- and Ti-oxide minerals, biotite. Metasedimentary layers from this unit have various composition, and their origin is often questionable (i.e. they might be volcanoclastics). They consist of quartz, diactheedral micas, feldspars (albite and potassic feldspars) and calcite in varying proportions.

HFSE-minerals

The enriched HFSE-elements are hosted in various minerals, such as REE-phosphates (monazite-(Ce), rarely xenotime), zircon, Nb-bearing Ti-oxides, apatite, rarely REE-carbonates and oxides. All of them are micrometric in size and only observable with electron-microprobe analyses. These minerals often form nests and pseudomorphs, or occur in veinlets. More detailed features can be found below the BSE images and element maps. Sample ID-s are the same as in Fig. 3., 7., 6 and 8. N/S correspond to the SE or NE location.

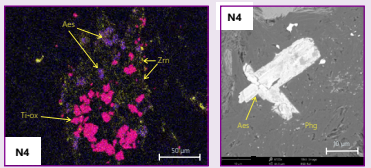


Fig. 9. Aeschynites occur only in Lillafüred, in some metasiliciclastic beds. Where it occurs, it is the main carrier of Nb. It could be either Ce or Y dominant, and often occurs together with other HFSE minerals. In this figure aeschynite substitutes a former grain associated with Nb-bearing Ti-oxides and zircon.

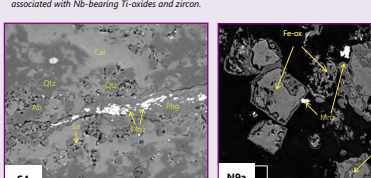


Fig. 10. This figure shows an aeschynite crystal in phenitic matrix. A slight zoning is observable. The prismatic shape of the aeschynite refers to a twinned rutile precursor.

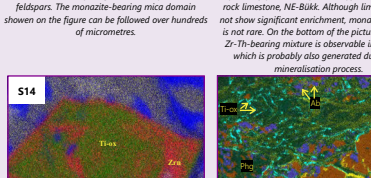


Fig. 11. In metavolcanics HFSE minerals are associated with phenitic micas or potassic feldspars. The monazite-bearing mica domain shown on the figure can be followed over hundreds of micrometres.

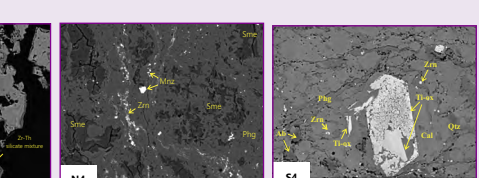


Fig. 12. Monazites on the edge of Fe-oxides (probably pseudomorphs after pyrite) from wall rock limestone, NE-Bükk. Although limestones do not show significant enrichment, monazite in them is not rare. On the bottom of the picture a kind of Zr-Th-bearing mixture is observable in Fe-oxide, which is probably also generated during the mineralisation process.

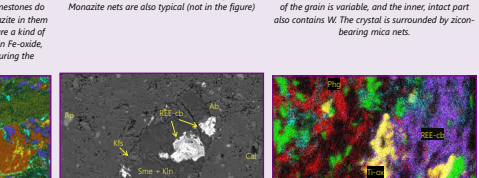


Fig. 13. The monazite and zircon are regularly present as disseminated, micrometric grains. Monazite nets are also typical (not in the figure).

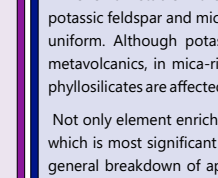


Fig. 14. Relict, porous Ti-oxides also could incorporate Nb into their structure. The Nb-content of the grain is variable, and the inner, intact part also contains W. The crystal is surrounded by zircon-bearing matrix.

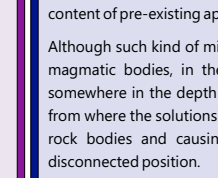


Fig. 15. Relict Nb-bearing Ti-oxide minerals are often associated zircon, along microfractures. The matrix is quartz and potassic feldspar.

Conclusions

In the Bükk Mts, NE-Hungary a formerly unknown HFSE-mineralisation was found. The enrichment was caused by hydrothermal solutions penetrated along the fault zones, leading to mineral and geochemical changes. The solution must be alkaline in pH, as the wall rock limestones does not shows any sign of the alteration. Reaction with the siliciclastic and metavolcanics layers caused changes in the p-T conditions, causing the instability of the dissolved HFSE-complexes. The higher the phyllosilicate and feldspar content of a rock body is, the higher is the enrichment rate, which means that the dissolved HFSE-complexes became unstable during reaction with silicate material, while remain stable in the carbonate rocks. Potassium is enriched generally, leading to potassic feldspar and mica generation from albite and chlorite. The paragenesis is not uniform. Although potassic feldspar generation are characteristic in feldspar-rich metavolcanics, in mica-rich sedimentary rocks feldspars remain albite, and only the phyllosilicates are affected by the potassic metasomatism.

Not only element enrichments, but also element losses occurred during the process, which is most significant in the case of Eu, P and Ti. The last two are reflected in the general breakdown of apatites and Ti-oxides, although both phases can regenerate during the mineralisation process. Nb is incorporated partly into relict Ti-oxides grains and partly it forms new Nb-bearing Ti-oxides with braided appearance, furthermore P-content of pre-existing apatites contributes to the formation of monazite.

Although such kind of mineralisation is usually connected to carbonate and alkaline magmatic bodies, in the Bükk Mts. the source is not known. It is possible that somewhere in the depth a buried, highly HFSE-enriched magmatic body is present, from where the solutions were originated, and traveled kms until reaching the studied rock bodies and causing the enrichment. This body could be in a tectonically disconnected position.

If the magmatic body does not exist, the HFSE mineralisation in the Bükk is a completely unparalleled phenomenon compared to the known occurrences of the world.

Acknowledgement

The research was carried out at the University of Miskolc both as part of the „More efficient exploitation and use of subsurface resources” project implemented in the framework of the Thematic Excellence Program funded by the Ministry of Innovation and of Hungary (Grant Contract reg. nr.: NKFIH-2019-1.1-PALY-2020) and the project titled as Developments aimed at increasing social benefits deriving from more efficient exploitation and utilization of domestic subsurface natural resources” supported by the Ministry of Innovation and Technology of Hungary from the National Research, Development and Innovation Fund in line with the Grant Contract issued by the National Research, Development and Innovation Office (Grant Contract reg. nr.: TKP-17-1-PALY-2020).