

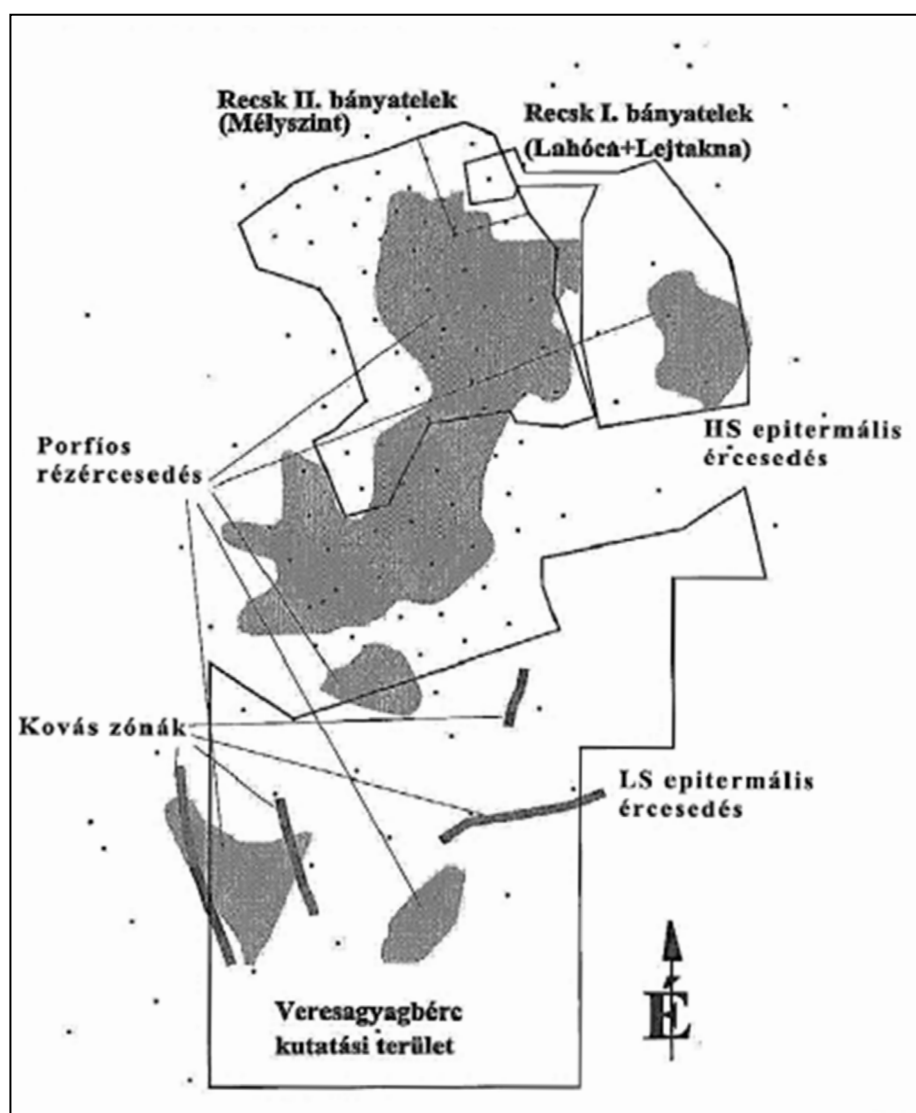
BÁNYÁSZATI és KOHÁSZATI

LAPOK

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

A recski ércelőfordulások helyzete. A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből. Réz – stratégiai és kritikus ásványi nyersanyag potenciál – globális és hazai körkép

Kasó Attila Ifj., Földessy János, Leskó Máté



FROM THE CONTENTS

118TH ASSEMBLY OF DELEGATES OF THE HUNGARIAN NATIONAL MINING AND METALLURGICAL ASSOCIATION, ÓZD ... 2

ATTILA KASÓ JR., JÁNOS FÖLDESSY, MÁTÉ LESKÓ: From the Critical Raw Materials Marathon Data Collection. Copper – strategic and critical mineral raw material potential – global and domestic overview ... 8

GERGELY KÖRÖSY, ANDRÁS ROÓSZ, TAMÁS MENDE: The Concept of the Estimation of Phase Diagrams. Part I: Binary Equilibrium Phase Diagrams ... 18

VIKTOR NYESTE, TAMÁS MIKÓ, ÁGOTA KAZUP, ÁRPÁD KOVÁCS, DÁNIEL MOLNÁR, VALÉRIA MERTINGER: Testing of high pressure die castings produced with reduced squeeze pin velocity ... 34

GERGŐ FEHÉR, ISTVÁN BALÁZS ILLÉS: The utilization of the precious and non-ferrous metal content of waste automotive connectors by mechanical pre-treatment and a subsequent pyrometallurgical method ... 44

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

MOHAMED ORABY, JÁNOS FÖLDESSY: PCA-based soil geochemical investigation of precious metals in Rudabánya, Hungary: Uncovering the hidden relationships ... 53

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

Magyar nyelvi lektorálás:

Keményváriné Nagy Alexandra

Kiadja:

Országos Magyar Bányászati és

Kohászati Egyesület (OMBKE),

1107 Budapest, Hizláló tér 1.

Telefon/Fax: 1-201-7337

www.ombke.hu

A kiadásért felel:

Dr. 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

AZ ORSZÁGOS MAGYAR BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI EGYESÜLET

118. KÜLDÖTTGYŰLÉSE, ÓZD 2

KASÓ ATTILA IFJ., FÖLDESSY JÁNOS, LESKÓ MÁTÉ:

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből. Réz –
stratégiai és kritikus ásványi nyersanyag potenciál – globális és
hazai körkép 8

KŐRÖSY GERGELY, ROÓSZ ANDRÁS, MENDE TAMÁS:

Az ESTPHAD koncepció – I. rész: Kétalkotós egyensúlyi
fázisdiagram 18

NYESTE VIKTOR, MIKÓ TAMÁS, KAZUP ÁGOTA, KOVÁCS ÁRPÁD,

MOLNÁR DÁNIEL, MERTINGER VALÉRIA:

Lassított utántömörítő csap működtetéssel gyártott nyomásos
öntvények vizsgálata 34

FEHÉR GERGŐ, ILLÉS ISTVÁN BALÁZS:

Hulladékká vált autóiipari csatlakozók nemes- és színesfém-
tartalmának hasznosítása mechanikai előkészítést követő
pirometallurgiai módszerrel 44

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

2024-es terméséből

MOHAMED ORABY, FÖLDESSY JÁNOS:

Rudabánya talajgeokémiai elemzéseinek statisztikai elemzése
az Au–Ag eloszlások és elemkapcsolatok tisztázásához. 53

(for English titles see B2 page)

Címlapon: A recski ércelőfordulások helyzete – A Kritikus Nyersanyagok
Maraton Adatgyűjteményéből (Publikáció a 8. oldalon)

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával jelenik meg.

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület 118. Küldöttgyűlése, Ózd

118th Assembly of Delegates of the Hungarian National Mining and Metallurgical Association, Ózd

Ózdon ülésezett az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület 118. Küldöttgyűlése. A tanácskozás résztvevői meghallgatták az Elnökség elmúlt év munkájáról, gazdálkodásáról, a korábban meghozott határozatok végrehajtásáról szóló beszámolóját. Döntöttek a 2025. év terveiről, legfontosabb feladatairól. Ezután kitüntetések átadására került sor.

Kulcsszavak: küldöttgyűlés, gazdálkodás, tervek, határozatok, kitüntetések

The 118th Assembly of Delegates of the Hungarian Mining and Metallurgical Society met in Ózd. The participants of the Assembly listened to the report on the work of the Presidium in the past year, the management and the implementation of the previously adopted resolutions. They decided on the plans and main tasks for 2025. Afterwards, awards were presented.

Keywords: assembly of delegates, management, plans, resolutions, awards



Az OMBKE 118. Küldöttgyűlésének résztvevői

2025. május 17-én, Ózdon, a Kaszinó Tükörterme adott otthont az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület 118. Küldöttgyűlésének.

Az esemény a Nemzeti Himnusz eléneklésével kezdődött, majd dr. Szombatfalvy Anna elnök köszöntötte a 118. Küldöttgyűlés résztvevőit, az Egyesület tagságának küldötteit, a tiszteleti és a pártoló tagokat, a jogi tagok, a társszervezetek és a hatóság képviselőit, a meghívott vendégeinket.

Külön üdvözölte Riz Gábor országgyűlési képviselőt; Janiczak Dávidot, Ózd város polgármesterét; dr. Szalontai Lajost, a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karának dékánhelyet-

tesét, a Magyar Bányászati Szövetség képviselőjében Zelei Gábor igazgatót, a Magyar Öntészeti Szövetség elnökét, Szalai Jánost; a Bányászati Dolgozók Szakszervezetének elnökét, Telekes Gábort, továbbá az OMBKE helyi szervezetének és az Ózdi Ipari Örökségvédők Baráti Körének megjelent vezetőit és tagjait.

Ezután az elnök felkérte Janiczak Dávid polgármestert, hogy köszöntse a megjelenteket. A polgármesteri üdvözlő szavak után a vendéglátók részéről dr. Taszner Zoltán, az Ózdi Helyi Szervezet elnöke mondott köszöntőt, majd Werner Norbert, az Egyesület tiszteletbeli tagja emelkedett szólásra. A Szlovák Bányász Hagyományörző Társaságok Szövetsége és

a Szlovák Kő- és Kavicsgyártó Szövetség nevében köszöntötte a tanácskozást.

Megállapították, hogy az eseményen a jelen lévő és az online formában részt vevő küldöttek száma hatvannyolc, így a 118. Küldöttgyűlés határozatképesen folytathatta munkáját. A tanácskozás tisztségviselőinek megválasztása után, a résztvevők megemlékeztek az előző küldöttgyűlés óta elhunyt tagtársakról, majd *Rátkai Norbert* egyesületi igazgató előterjesztésében az Elnökség beszámolója és a közhasznúsági jelentés ismertetése következett.

Az Elnökség beszámolója

Rátkai Norbert előterjesztésben a következők hangzottak el.



Rátkai Norbert, OMBKE igazgató beszámolóját tartja

„A tavaly májusban megrendezett 115. Küldöttgyűlés óta két küldöttgyűlést is tartottunk, amelyeken *dr. Hatala Pál* elnök, *Kőrösi Tamás* igazgató és egy elnökségi tag is lemondott, illetve a Bányász Szakosztálynál tisztújítás zajlott. A 116. Küldöttgyűlésen megválasztottuk az új elnököt *dr. Szombatfalvy Anna* személyében, és két nappal később én vettem át az igazgatói feladatokat. A 117. Küldöttgyűlésen megválasztottuk az új elnökségi tagot *Tóth Gergely László* személyében.

Feladatom volt a tagság ügyeinek kezelése, illetve a tagdíjfizetési morál kérdéskörének feltárása. Az elmúlt egy évben a változások kezelése volt az elnökség

és az igazgató legfőbb feladata. Mindez szerencsére az Egyesület életét jelentősen nem befolyásolta, a tervezett programokat meg tudtuk valósítani.

- ❑ Lezajlott a XVI. Kő- és Kavicsbányász Napok Konferencia.
- ❑ A 18. Knappentagon részt vettek tagjaink Ausztriában, Bad-Islnben.
- ❑ Sikeresen lezajlott a LXII. Bányamérő Konferencia Gyöngyösön.
- ❑ Az Egyesület nagy sikerű rendezvénye volt a Bányász–Kohász–Erdész Találkozó Miskolcon. Háromszáz fő részvételével sikerült nívós és jól szervezett rendezvényt lebonyolítani, melynek gazdasági eredménye is kimagasló lett.
- ❑ Lezajlott a 74. Központi Bányásznapi. Az eseményt a Magyar Bányászati Szövetséggel és a Bánya-, Energia- és Ipari Dolgozók Szakszervezetével közösen rendeztük meg Oroszlányban. A helyi szervezet is megünnepelte fennállásuk kerek évfordulóját.
- ❑ Az Egyesületünk nagy létszámmal képviseltette magát Selmecbányán, a Szalamanderen, ahol koszorúzáson és ökumenikus istentiszteleten is részt vettek tagjaink.
- ❑ A Borbála-napot a helyi szervezetek méltó körülmények között ünnepelték meg.
- ❑ Az Öntészeti Szövetséggel együtt rendeztük meg az I. Magyar Öntészeti Konferenciát Herceghalmon.
- ❑ Megtartottuk az V. Bányászati- és Kohászati Kiállítóhelyek Találkozóját Székesfehérváron, amelynek sikeréért külön köszönet jár *Mednyánszky Miklós* tagtársunknak.
- ❑ A három napos Országos Bányászati Konferenciát rekord létszámmal sikerült lebonyolítani. Volt olyan nap, amikor 170-en voltunk jelen. Azon túl, hogy érdekes előadásokat hallhattunk, a rendezvény gazdaságilag is eredményesen zárult.
- ❑ A BKL lapoknál sikerült bevezetni a DOI-rendszert, ami azt jelenti, hogy a világon bárki hozzáférhet az itt megjelent cikkekhez. Emellett a felület lehetőséget biztosít az elektronikus téma-kereséshez is.
- ❑ Idén februárban megtartottuk a Bányász–Kohász Szakmai Napot Fehérvárcsurgón.
- ❑ Most itt vagyunk Ózdon, a 118. Küldöttgyűlésen.
- ❑ Már szerveződik a LXIII. Bányamérő Konferencia Algyőn.

Sikerült új konferenciákat is bevonni az Egyesület életébe.

- ❑ A FAMU Nemzetközi Konferencia egy olyan nemzetközi és világszínvonalú tanácskozás,

amelynek lebonyolításában, egy floridai egyetem és a miskolci campus mellett, Egyesületünk is szerepet vállal. A konferencia témája a gazdasági fenntarthatóság köré szerveződik.

- ❑ Szeptember 4-én lesz a 75. Központi Bányász Nap Tatabányán.
- ❑ Idén a selmeci Szalmander szeptember 12-től 14-ig tart, amelyen reményeink szerint ismét sikerül nagy létszámban részt vennünk.
- ❑ Három évente kerül megrendezésre, idén immár a XXXIII. Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia, amelynek helyszíne Harkány lesz.
- ❑ Szervezés alatt a 28. Öntőnapok is, október 12-i időponttal.
- ❑ Ismét megrendezésre kerül november 12–14-én az Országos Bányászati Konferencia.
- ❑ A decemberi Borbála-napok rendezvényeinek pontos ideje még nincs meg, de az előkészületekről folyamatosan tájékoztatást adunk a Hírlevélben.

Rátérve az Egyesület anyagi helyzetére, összehasonlítva a 2023-as és 2024-es évet, jól lehet látni, hogy az Egyesület eszközei, aktívái emelkedtek. Az Egyesület vagyona 175 millió Ft-ról 178 millió Ft-ra emelkedett. Nőtt a forgótőkénk is. Ugyan a tárgyévben hétmillió Ft eredmény került kimutatásra, de hozzá kell tenni, hogy egy hosszú, évek óta húzódo kivezetést – amelynek értéke hárommillió forint volt – meg kellett oldanunk.

- ❑ Az idei év tervezéseinél már vannak változások az elmúlt esztendőkhöz képest.
- ❑ A tagdíjfizetéseknél idén kevesebbel számoltunk.
- ❑ A pártolói tagsági díjak mértéke tartható, köszönhetően a pártoló tagjainknak.
- ❑ A rendezvényeinkre szánt támogatások nem változtak, de mivel több rendezvényünk lesz, nagyobb bevétellel számoltunk.
- ❑ Áprilisban az Elnökség határozatban fogadta el, hogy az egyesületi pártolói tagdíjakat és az egyéni tagdíjak harminc százalékát a szakosztályok és helyi szervezetek elkölthetik úgy, hogy két évig gyűjthetik az el nem költött



A Küldöttgyűlés hallgatósága

összeget. Tavaly a szakosztályok és helyi szervezetek 6 millió forintot költöttek el. A fel nem használt források mintegy 15 millió forintot tesznek ki.

- ❑ A BKL-lel és a Hírlevéllel kapcsolatos költségeket megnöveltük, mert a megnövekedett feladatok ezt indokolják.
- ❑ A rendezvényekkel kapcsolatban kevesebb költséggel számoltunk, mert nagyon jó támogatottsággal rendelkező eseményekről beszélünk, és igyekszünk a költségeket lehetőleg lefaragni.
- ❑ A székház üzemeltetésével kapcsolatos költségeket egy kissé megemeltük, mert bár volt költségcsökkentő beruházás, ami után konszolidálódott a fogyasztás, de óvatosságból inkább a rosszabbik helyzettel kalkuláltunk. A központi költségvetés emelkedik, amit az inflációval kell magyaráznunk, ezzel együtt így is megpróbáljuk a tavalyi „állapotra hozni”. Az elnökségi költségek egy határozat alapján alakultak, ugyanis Selmecbányán sikeres tárgyalásokat folytattunk a helyi hagyományörző egyesülettel, akikkel kölcsönösen gyümölcsöző és segítő kapcsolatra törekszünk.
- ❑ Az amortizációt tudjuk tartani, mint ahogy az egyéb költségeket is. Így a kalkuláció szerint a bevételeink csak egymillió forinttal nőnek, a kiadásaink 6 millió forinttal emelkednek, de így is sikerül majd egy eredményes gazdasági évet zárni. Mindent megteszünk annak érdekében, hogy ezt a feszes költségvetést tartani tudjuk.
- ❑ A tagság létszáma jelenleg 2252 fő, melynek nagyjából a fele 65 év feletti. A tagság átlagéletkora nőtt, de az aktív tagokra remélhetően

tovább is lehet számítani. Szükség van a fiatalok bevonására, melyre már vannak tervek, és ezeket a közeljövőben szeretnénk megvalósítani.

- ❑ A tagdíjfizetési morállal kapcsolatban a két éve nem fizető tagokról készült táblázat alapján látni lehet a szakosztályi megosztást. Vélhetően, akik két éve, a tavalyi és a tavalyelőtti esztendőben sem fizettek tagdíjat, és a március 31-i határidőig sem rendezték a tartozást, azoktól nagy valószínűséggel nem várhatjuk el a tagdíj befizetését.
- ❑ Az Elnökség véleménye szerint nem lehet ezt a témát tovább halogatni. Az Alapszabály szerint – a nyár folyamán – ők megkapják a felszólítást a tagdíjfizetésre, kétszer is, és ennek eredményeképpen a nem fizető tagok tagsága terveink szerint szeptemberben lezárul. Erre a jövő évi tisztújító küldöttgyűlés előtt van szükség, ahol fontos tudni, hogy az egyes szakosztályoknak hány fős a tagsága. Ennek a civil törvényben való megfelelés miatt is fontos szerepe van.”

Az Egyesület Elnökségének beszámolója után a Felügyelőbizottság jelentését *dr. Debreczeni Ákos* okleveles bányamérnök, a grémium elnöke terjesztette a küldöttgyűlés elé.

A Felügyelőbizottság jelentése az OMBKE 2024. évi gazdálkodásáról és 2025. évi pénzügyi tervéről

A Felügyelőbizottság a 2024-es év gazdálkodásának ellenőrzése során az alábbi dokumentumokat tárgyalta meg:

- ❑ az Egyszerűsített éves beszámoló mérlegét,
- ❑ az Egyszerűsített éves beszámoló eredménykimutatását,
- ❑ a Kiegészítő mellékletet,

- ❑ a Közhasznúsági mellékletet a 2024 évről és
- ❑ a Független könyvvizsgálói jelentést.

A független könyvvizsgáló megállapította, hogy az „egyszerűsített éves beszámoló megbízható és valós képet ad az Egyesület 2024. december 31-én fennálló vagyoni és pénzügyi helyzetéről”.

Az egyszerűsített mérleg és az eredménykimutató szerint az eszközök és a források egyező végösszege 178 647 eFt, a tárgyévi adózott eredmény 7 471 eFt nyereség. Az eredmény teljes összege közhasznú tevékenységből származik. Az Egyesületnek vállalkozási tevékenységből nem volt bevétele. A saját tőke 2024-ben 7 471 eFt-tal nőtt.

A Felügyelőbizottság javasolja a 2024-es pénzügyi év, előzőekben felsorolt dokumentumainak elfogadását.

A Felügyelőbizottság megvizsgálta a 2025-ös pénzügyi tervet és az azt alátámasztó kalkulációkat. A testület megállapította, hogy az Egyesület vezetése az általa ismert adatok alapján igyekezett reális költségtervet készíteni. A gazdálkodás tervezett eredménye 1 754 eFt, melyet többszörösen meghalad a tervezésben rejlő bizonytalanság.

A szakosztályok rendelkezésére álló keretek összege 15 170 eFt.

Az OMBKE 2025. évi terve a rendezvények nyereségességére épül, ezért a Felügyelőbizottság felhívja a figyelmet az éves terv alakulásának folyamatos figyelemmel kísérésére, az egyes rendezvények lezárását követően, azok eredményességének vizsgálatára. Amennyiben valamely rendezvény tervezett eredménye nem realizálódik vagy a lezajlott rendezvények összesített eredménye nem éri el a betervezett értéket, időben megfelelő költségcsökkentő intézkedéseket kell hozni.

A Felügyelőbizottság javasolta a 2025. évi pénzügyi terv elfogadását.



A küldöttek a Felügyelőbizottság beszámolóját hallgatják

Tiszteleti tagok választása, kitüntetések

Ezt követően *dr. Fegyverneki György* alelnök ismertette az Elnökség javaslatát, amely a Tiszteleti Tagok és Szeniorok Tanácsának jóváhagyása mellett született meg. Ennek értelmében a 118. Küldöttgyűlés *dr. Hatala Pált, Szabó Csabát és Szikrai Miklóst* egyhangúlag, ellenszavazat és tartózkodás nélkül az Egyesület Tiszteleti Tagjává választotta.

A kitüntető cím átadása után a résztvevők meghallgatták *Gál Jenő*: „Dr Tóth Imre, selmeci bánya- és kohómunkások életének megmentője” című előadását.

Az előadást követően kitüntetések átadása következett.

Az „Egyesület kiemelkedő támogatója” díj elismerésben részesült:

- *Riz Gábor*, országgyűlési képviselő;
- *Dr. Szemán Attila*, főmuzeológus;
- *Horváth Ferenc*, az Alcufer Kft. ügyvezetője.

„Az év bányászati–kohászati kiállítóhelye” közönség díjat az *Ajkai Bányászati Múzeum, Óslény- és Közettár* kapta meg,

„Az év bányászati–kohászati kiállítóhelye” szakmai díjban az *Ózdi Muzeális Gyűjtemény és Gyártörténeti Park* részesült.

A kitüntetések átadása után határozati javaslatok ismertetésére, majd elfogadására került sor.

A Küldöttgyűlés elfogadta az OMBKE 2024. évről szóló Közhasznúsági jelentését, az OMBKE 2024. évről szóló Számviteli Beszámolóját és Mérlegét, a Felügyelőbizottság jelentését az OMBKE 2024. évi tevékenységéről és az OMBKE 2025. évi gazdálkodásáról szóló tervét.

Ezt követően megválasztották a következő tisztújító küldöttgyűlés tisztségviselőit, a jelölő-, a mandátumvizsgáló, a szavazatszámoló és a határozatszövegező bizottságok tagjait.

Dr. Szombatfalvy Annának, az OMBKE elnökének záróbeszéde

A határozatok elfogadása után *dr. Szombatfalvy Anna* elnök zárszava következett:

„Kedves Küldöttek, Kedves Tagtársak!

A 118. Küldöttgyűlésünk végéhez érkeztünk.

Engedjétek meg, hogy megköszönjem minden jelenlévő aktív részvételét, a hozzászólásokat és az együttműködést!

Köszönöm szépen a vendéglátóinknak és a szervezőknek a sikeres lebonyolítást!

Sikeres küldöttgyűlést zárunk, elfogadtuk a 2024-es mérleget, a számviteli és a közhasznúsági beszámolót, valamint a 2025-ös gazdálkodási tervet.

Fontos megemlítenem, hogy a tegnapi napon a XVI. Ózdi Ipari Örökségvédelmi Konferencia keretében a 180 éves ózdi kohászatot ünnepeltük. Külön öröm számomra, hogy összefogással sikerült a „180 éves az ózdi kohászat” c. könyvet kiadni, melyet szíves figyelmetekbe ajánlok.

És most következzen pár személyes gondolat, ahogy ezt már tőlem megszokhattátok. 2019-ben itt indult az OMBKE-s karrierem, itt választottak az Egyesület főtitkár-helyettesévé.

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület immáron 133 éve képviseli a magyar bányászat és kohászat értékeit, hagyományait és jövőjét. Büszkék lehetünk rá, hogy ez a hétvége ismét megerősítette: szakmáinkban továbbra is él az összetartás, a szakmai elhivatottság és a megújulásra való törekvés.

Szeptember 28. óta vagyok az Egyesületünk elnöke. Ez a 232 nap tartogatott nagyon sok meglepetést, problémát, feladatot, de ugyanakkor nagyon sok sikert és örömet is. A célom továbbra is az, amiben rendületlenül hiszek, hogy szeretnék egy új, 21. századi, szerethető egyesületet létrehozni, amelynek van jövője, és amely fenn fog maradni minden körülmények között. Szeretném, ha az OMBKE-t nemcsak mint hagyományörző egyesületet tartanák számon, hanem mint szakmai, tudományos és tanácsadói egyesület is. Hiszek abban, hogy mivel a szakmáinkban dolgozó, szinte összes szakembert tagjaink között tudhatjuk,



Dr. Szombatfalvy Anna, OMBKE elnök a bezárja a Küldöttgyűlést

partnerei tudunk lenni szervezeteknek, döntéshozatali szervezeteknek, hatóságoknak abban, hogy a jelen és jövő problémáira, kihívásaira – úgymint az energiagazdálkodás, fenntarthatóság, környezetvédelem – megoldást találjanak!

Szeretnék pár fontos momentumot kiemelni az elmúlt időszakból, melyek a megújulást segítik:

- ❑ Előkészítés alatt van egy együttműködési megállapodás aláírása a Miskolci Egyetem és az OMBKE között.
- ❑ Ugyanilyen megállapodást fogunk aláírni a BME-vel is (majd folyamatosan, lépésről-lépésre haladva a többi felsőoktatási intézménnyel is), kiemelve azt, hogy a Miskolci Egyetem mindig prioritást fog élvezni minden tekintetben, mint selmeci utódintézmény. De a fennmaradás miatt a nyitás elengedhetetlen.
- ❑ Új, ill. régi konferenciákat szervezünk. Ezekről a Hírlevélből, illetve a honlapon található eseménynaptárból tudtok tájékozódni.
- ❑ Együttműködési megállapodást fogunk kötni a V4-ekkel. *Szombati Erik*, a szlovák testvérszervezet elnöke kezdeményezésére idén a selmecbányai Szalamander keretében aláírásra kerül a határokon átvívelő, közép-európai bányász–kohász egyesületek szoros együttműködését és közös szakmai fellépését rögzítő memorandum.
- ❑ Részt vettünk Segesváron az EMT konferencián, ahol plenáris előadást tartottunk, majd az erdélyi társszervezetek vezetőivel megállapodtunk egy szorosabb együttműködésről, lehetséges kooperációról.
- ❑ Új pártoló jogi tagvállaltokkal írtam alá szerződéseket, illetve a korábbiakat folyamatosan megújítjuk. Ezúton is köszönöm a támogatásokat, amik nélkül a működésünk és a jövőbeni terveink megvalósítása elképzelhetetlen lenne.

Nagyon sok tervem van, és nagyon sok feladat áll előttünk. Hogy csak párat említsek: Országos Bányász–Kohász–Erdész Találkozó 2026. Sopron; Nexus Konferencia a Miskolci Egyetemen a floridai egyetemmel közös szervezésben; 33. Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia; Geomeeting 2025. konferencia; Bányászati Konferencia; 28. Nemzetközi Öntőnapok.

Felvettük a kapcsolatot az Energiaügyi Minisztériummal, a szakmáinkat érintő kérdésekben elindult egy aktív szakpolitikai egyeztetés.

A pénzügyi stabilitás fenntartása kiemelt feladatunk hiszen, ahogy hallottátok igazgató úr beszámolójából, a tagdíjak nem fogják fedezni a működési költségeinket. El kell gondolkodnunk a jelenlegi szabályozásaink módosításán, illetve bevételi forrásaink növelésén új támogatók bevonzásán keresztül! Minden olyan szakmai, szakmapolitikai együttműködésre nyitottak vagyunk, amely az Egyesület lukrativitását biztosítja! Fontos cél az aktív tagság növelése, illeszkedve a szakmáink változó struktúrájához!

Proaktívnak kell lennünk, és előre kell menekülnünk, ha túl akarunk élni mint szakma és mint Egyesület a megváltozott körülmények között.

Végül, de nem utolsósorban, szeretném hangsúlyozni: a múlt értékeiből építkezve, közösen kell megfogalmaznunk a jövőt. Legyen az OMBKE továbbra is az a szakmai és emberi közösség, amely biztonságot, tudást és összetartozást nyújt tagjai számára! Ehhez kérem a további támogatásokat. A teljes tisztújításig előttünk álló egy évben sem fogok pihenni, azt megígérem!

Köszönöm a figyelmet, jó egészséget kívánok minden kedves tagtársnak. A 118. Küldöttgyűlést ezennel bezárom. Jó szerencsét!”

A 118. Küldöttgyűlés zárásaként a résztvevők elénekelték a Bányász, az Erdész és a Kohász Himnusz.



A Küldöttgyűlés az elnök zárszavát hallgatja

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből. Réz – stratégiai és kritikus ásványi nyersanyag potenciál – globális és hazai körkép

From the Critical Raw Materials Marathon Data Collection. Copper – strategic and critical mineral raw material potential – global and domestic overview

KASÓ ATTILA IFJ.¹ geológus, bányamérnök; FÖLDESSY JÁNOS², professzor emeritus;
LESKÓ MÁTÉ², PhD, tudományos segédmunkatárs

¹Rotaqua Geológiai, Bányászati Kutató Mélyfúró Kft., Kővágószőlős

²Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Miskolc

A réz a stratégiai ásványi nyersanyagok között az egyik legjelentősebb, folyamatosan növekvő keresletű anyag. A tanulmányunkban helyzetképet adunk az ásványi nyersanyag előfordulásokról, bányászati termelésről a világban, Európában és a Kárpátok övezetében. Összefoglaljuk azokat az ismereteket is, amelyeket hazai, részben megkutatott, részben felderítetlen rézérc előfordulásainkról nyilvánosan ismertek. Végül javasoljuk a legígéretesebb hazai területeink részletes átértékelését, kutatásainak kiegészítését.

Kulcsszavak: stratégiai ásványi nyersanyag, rézérc, előfordulások, ásványvagyron potenciál

Copper is one of the most significant strategic mineral resources its market demand continuously grows. In our study, a situational picture is provided about the mineral resource occurrences and mining production in the world, Europe and the Carpathian region. We also summarize the knowledge that is publicly known about our domestic, explored and unexplored copper mineralizations. At the end detailed reassessment of our most promising areas and the completion of research is proposed.

Keywords: strategic raw material, copper ore, mineralization, mining, resource potential

Bevezetés

A réz az egyik legnagyobb tömegben keresett stratégiai fontosságú stratégiai nyersanyag Európában. Gazdasági szerepe világméretben és hazai keretek között is jelentős. Elengedhetetlen alapanyaga a Zöld Átmenet kiteljesítéséhez szükséges technológiáknak. Sem az elektronikai eszközökben, sem az energiaszállításban nem lehet gazdaságosság megtartásával helyettesíteni. A Zöld Átmenet stratégiája, illetve az elektromos járműhajtásra való áttérés, a réz fém iránti igényt exponenciálisan növeli a következő évtizedekben, miközben a rézérckitermelés növekedése ezzel szemben csak mérsékelt ütemű lehet, valamint igen jelentős tüke- és időigényű. Az 1. táblázatban a fém réz 1960 és 2020 között mutatott keresletének régiókénti változását tüntettük fel. A piac ezen idő alatt ötszörösére bővült. Jól észlelhető

a kereslet áthelyeződése az európai országoktól Ázsia országai felé.

A 2050. évre előre jelzett fémrézigény bányászati forrásokból történő kielégítéséhez 2.1 trillió USD befektetésre lenne szükség, az átlagos beruházás átfutási idő 17 év [1].

Stratégiai kritikus nyersanyag

A 21. század kezdetétől gyorsuló technológiai forradalom, informatikai rendszerek kiépülése, a dekarbonizáció, szükségképpen a felszínre hozott egy sor, korábban kevésbé keresett nyersanyag iránti igényt.

A geopolitikai játszmák fókuszába került nyersanyag- és energiaínség a legérzékenyebben a CRM – kritikus és stratégiai nyersanyagok – csoportját érinti.

tette. Ebben paradox módon az egyik legrégebben használt hagyományos fém, a réz kapta a főszerepet. Ennek oka, hogy a technológiák mindegyikében kulcsszerepe van, s bár termelése diverzifikált, az előrejelzett igények messze meghaladják a ma felmérhető rövid- és középtávú fejlesztési lehetőségeket.

A réz a körkörös gazdaságban is jelentős tényező, ez a tanulmányunk azonban csak az elsődleges – ásványi – nyersanyagok helyzetét tekinti át.

Réztermelés a világon

Az 1960-as évtizedben a globális rézkereslet évente 5 millió tonna, 2020-ban 25 millió tonna volt. A világpiaci kereslet radikális átrendeződését mutatja, hogy ennek a mennyiségnek kezdetben 57%-át jelentette az európai piac, míg az eltelt idő során a globális keresletben piaci részesedése – a volumen azonos szintjét tartva – 15%-ra csökkent, eközben az ázsiai térség részesedése egy nagyságrenddel, 74%-ra nőtt (1. táblázat).

1. táblázat. A fémréz kereslet megoszlása régióként 1960 és 2020 [1]

Fémrézigény	1960	2020
millió tonna/év	5	25
Százalékos megoszlás régióként		
Európa	57	15
Észak-Amerika	30	9
Ázsia	10	74
Óceánia	2	0,02
Latin-Amerika	1	1
Afrika	0,5	1

A világ összesített rézfémtermelése 2023-ban 22 millió tonna volt (2. táblázat). A legnagyobb termelő országok egyike sem európai, a termelés 45%-a Latin-Amerikából, 14%-a Afrikából, 14%-a Ázsiából, 7% Óceániából származik [2]. Ebből közvetlenül le-szűrhető, mekkora akadályt jelenthet ennek a nyersanyagnak a hiánya az európai technológia fejlesztési lehetőségek és követelmények szempontjából.

2. táblázat. Legnagyobb réztermelő országok [2]

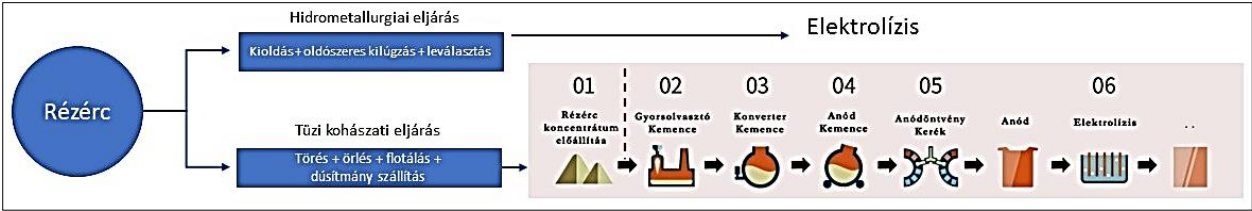
Rangsor	Ország	Ezer tonna fém réz	%
1	Chile	5000	23
2	Peru	2600	12
3	DR Kongó	2500	11
4	Kína	1700	8
5	USA	1100	5
6	Oroszország	910	4
7	Indonézia	840	4
8	Ausztrália	810	4
9	Zambia	760	3
10	Mexikó	750	3
	Más országok	3100	14
Összesen		22	100

Technológiai változatok

A feldolgozási technológiákban kétféle út jelenti a legjelentősebb, ma alkalmazott fémréz előállítási módokat:

Tűzi kohászati feldolgozás

A hagyományosabb tűzi kohászati feldolgozásra a szulfidos rézérccek (kalkopirit, kalkozin, kovellin, bornit, stb) alkalmasak. Ennek alkalmazása során a fémréz előállítása több lépcsőben történik. Elsőként a kitermelt ércből döntően flotálással dúsítmányt állítanak elő (28-40 % réz tartalommal). Ez kerül kon-verter kemencébe, és keletkezik nyersréz (köztes terméként, 96-98 % Cu), illetve a vas és kén eltávo-lítása után anódréz (99 % Cu). Ezt követi a finomítás elektrolízis útján, amelyben a réz anód szulfátos elektrolit közegben feloldódik (egyéb fémek – lehet-séges melléktermékek pl. Au, Ag – az anódiszapba süllyedve felhalmozódnak), a réz pedig a katód leme-zeken nagy tisztaságban (99,99 % Cu) leválik. A fém-piacokon a katódréz a szabványos kereskedelmi ter-mékforma [3].



1. ábra. A rézérc-feldolgozási technológiák vázlata [4]

Több olyan ásványtani összetételű rézérc van, amelyek a fenti többlépcsős út helyett közvetlen elektrolizálással feldolgozhatók. Ennek során híg kénsavval oldatba viszik, majd az oldatból szerves kelát képző szerrel szelektíven kivonják a rézet. A hordozó organikus komponenst elpárologtatva és visszanyerve a réz-tartalmú fázis a szilárd maradékban koncentrálódik. Ezt újra kénsavban oldva viszik elektrolízisre (SX-EW) [4]. Erre az eljárásra főleg az oxidált rézérc változatok, réz-karbonátok, termésréz, krizokolla stb alkalmasak.

A technológiai folyamatok különbségei szerint a tűzi kohászatra alkalmas ércek feldolgozásának első lépcsői (a dúsítmány előállításáig) a bányászati kitermelés helyszínén történnek, a kohászat és a finomítás pedig távolabbi iparközpontokban, sokszor több helyről származó dúsítmány vásárlásával és nagy távolságra történő szállításával, majd a nyersréz finomítóba szállításával történhet. A hidrometallurgiai folyamatnál ezek a bányászat helyszíne közelébe telepíthetők. A világon a legnagyobb rézérckohászati üzemek és finomítók ma Kínában működnek és a világ finomított réz fém termelésének mintegy felét állítják elő. A legnagyobb üzem, Guanxi Nanko mintegy 700 ezer tonna/év réz termelésért felel [1].

Rézércek földtana dióhéjban

A rövid leírásban Dill [5] összefoglalóját vettük alapul. A földkéreg átlagos réz tartalma 57 ppm. Az elméleti geokémia a földköpeny anyagot tartja a for-

rásnak, mivel a magmás kőzetek közül a földkéregbe épülő köpeny eredetű bázisos magmák (bazaltok) átlagos Cu koncentrációja a legmagasabb (90 ppm). Az üledékes környezetekben a pelágikus agyagközetek átlagos réz tartalma a legnagyobb (251 ppm).

Telepforma szerint három típus a leggyakoribb:

- porfíros,
- réteggövető,
- tömeges szulfidérc.

A dúsító földtani folyamat szerint a különböző morfológiájú teleptípusok további három nagy csoportba sorolhatók:

- hidrotermális,
- szerkezeti elemhez kapcsolt,
- üledékes.

A nagyszámú előfordulást hasonlóan nagyszámú telepfajtába sorolták és írták le. A besorolás sokszor átfedéseket, átmeneteket tartalmaz, s a modellek az újabb és újabb kutatási eredmények beépítésével folyamatosan módosulnak. A 3. táblázatban a leggyakoribb földtani környezetek 1-1 példájának felsorolásával próbáljuk bemutatni a rézércek genetikai sokszínűségét. Az előfordulás példákat úgy választottuk, hogy az interneten a részletes földtani leírások minden esetben elérhetőek legyenek. (A 3. táblázatban szereplő rövidítések: IOCG – iron oxide copper gold vasoxid-réz-arany, HS, IS, LS – magas, közepes és alacsony szulfidációs fokú, VMS- vulkanogén tömeges szulfidérc).

3. táblázat. A fő rézérc teleptípusok és jellemző példái [5]

Magmás és metamorf eredetűek	Elemtársulás	Előfordulás, példa	Ország
Idős pajzsok/Bázitok	Cu Ni Pt	Sudbury	Kanada
Zöldkő metamorfitek	Cu Ni	Kambalda	Ausztrália
Porfíros intrúziók	Cu Mo Au	Majdanpek	Szerbia
IOCG	Cu U Fe Au	Olympic Dam	Ausztrália
Epitermás HS IS LS	Cu Au Ag Te	Cukaru Peki	Szerbia
Szkarnos	Cu Fe Zn Au	Ertzberg	Indonézia
Üledékes eredetűek			
Mállási feldúsulás	Cu Au	Chile	Escondida
Evaporit/feketepala	Cu Ag Co	Polkowicze	Lengyelország
Homokkő	Cu	Udokan	Oroszország
Feketepala/	Cu Co	Mufulira	Zambia
VMS	Cu Zn	Kidd Creek	Kanada

Igen nagy számú rézászvány ismert, de az ércek fő értékhordozó rézászványainak száma nem sok. Az elsődleges hidrotermás és üledékes folyamatokban a kalkopirit (ritkábban kubanit, bornit, fakóérc) a domináns, az epitermás szakaszban As- és Sb-tartalmú szulfid ásványokként enargit (luzonit, famatinit), szupergén folyamatok dúsulásaiban kovellin, kalkozin, tenorit, kuprit, malachit, azurit kap szerepet.

A rézércek esetében, kiemelt gazdasági jelentősége van szupergén dúsulási folyamatoknak. Ezek a folyamatok okozzák a szulfidos ércek felszín közeli oxidációját, melyek az ércfeldolgozás szempontjából kedvező folyamatok. Ennek eredményeként a csak tűzi technológiával feldolgozható ércek hidrometallurgiára alkalmas változatokká alakulnak át. A könnyen oldódó oxidált rézércek a felszíni mállási kéregből kioldódva lefelé migrálnak, és az állandó vízszint környezetében újra kiválnak, jelentősen továbbdúsulva [6]. Ez a folyamat hozta létre a leggazdagabb előfordulásokkal bíró Chile és Peru számos porfíros rézérc zónájának magas Cu-koncentrációját a felszíni mállási zónában.

A világ legnagyobb termelő előfordulásai

Az előfordulásokat áttekintve a legjelentősebb termelők az évi több tízmillió tonna/év érctermelő kapacitást üzemeltetnek. A termelő országok sorrendjéhez hasonlóan a rézérctermelés a világon ma Latin-Amerika, Indonézia és Afrika néhány óriási méretű előfordulására összpontosul, a 2023-as adatok szerint a 4. táblázatban felsorolt bányahelyek vezették a legnagyobb réztermelő előfordulások listáját [7]. A felsorolásban nem szerepelnek a nyugati statisztikákban nem képviselt orosz, kazah, kínai óriás előfordulások.

Jelentős termelők Európában

Az európai rézérctelepek a kis ásványvagyonuk miatt a legnagyobb lelőhelyek listáján nem jelennek meg. Európa rézérctermelése (1,5 millió tonna réz, 2021) a világ össztermelésében mintegy 3,0%-os arányban szerepel.

A termelés az EU-n belüli országokban döntő részben Lengyelország (45%), Spanyolország (23%), Bulgária (13%) és Svédország (7%) között oszlik meg. Kisebb jelentőségű termelés van az EU-n belül még Finnországban, Portugáliában, Romániában. Az EU-n kívüli európai országokban ezenkívül Törökország, Szerbia, Észak-Macedónia termelése jelentős és növekvő. Nem soroltuk itt fel Oroszországot, mivel rézérctermelése döntően az ázsiai részhez kapcsolódik [8].

Az EU legnagyobb termelőüzemei a Lengyelország – Németország déli részén húzódó Rézpala – Kupferschiefer övezetben vannak (Polkowice-Sierowice, Rudna, Lubin), míg a svéd előfordulásokat Aitik és Boliden, a spanyolországiakat Rio Tinto, Matsa, Aguablanca, Las Cruces képviseli [9].

Kárpátok-beli előfordulások

Az országunkat övező Kárpátok vonulatában számos ismert, leállított és néhány működő előfordulást ismerünk. Szlovákiában 16 előfordulás ásványvagyon szerepel az országos nyilvántartásban, a korábban ismertek közül legjelentősebbek Rudnany, Spisska Nova Ves és Slovinky. Lubietova-Orsblie [30]. Románia legnagyobb lelőhelyei: Rovina, Ciresata, Bucium, Moldova Noua, Rosia Poieni, Talagiu, Valea Morii, részben az Erdélyi Érchegységben, részben a Bánati övben [9].

4. táblázat. A világ legnagyobb rézérc termelő bányái [7]

Előfordulás	Ország	ezer t/év fém réz	Tulajdonos
Escondida	Chile	882	BHP
Collahuasi	Chile	563	Glencore
Cerro Verde	Peru	444	Freeport-McMoran
Buenavista del Cobre	Mexikó	427	Grupo Mexico Sde CV
Kamoa Kakula	DR Kongó	423	Ivanhoe Mines
Grasberg	Indonézia	418	Mining Indonesia
Antamina	Peru	410	Glencore
Morenci	USA, Arizona	399	Glencore
El Teniente	Chile	399	Freeport-McMoran
Cobre Panama	Panama	331	First Quantum

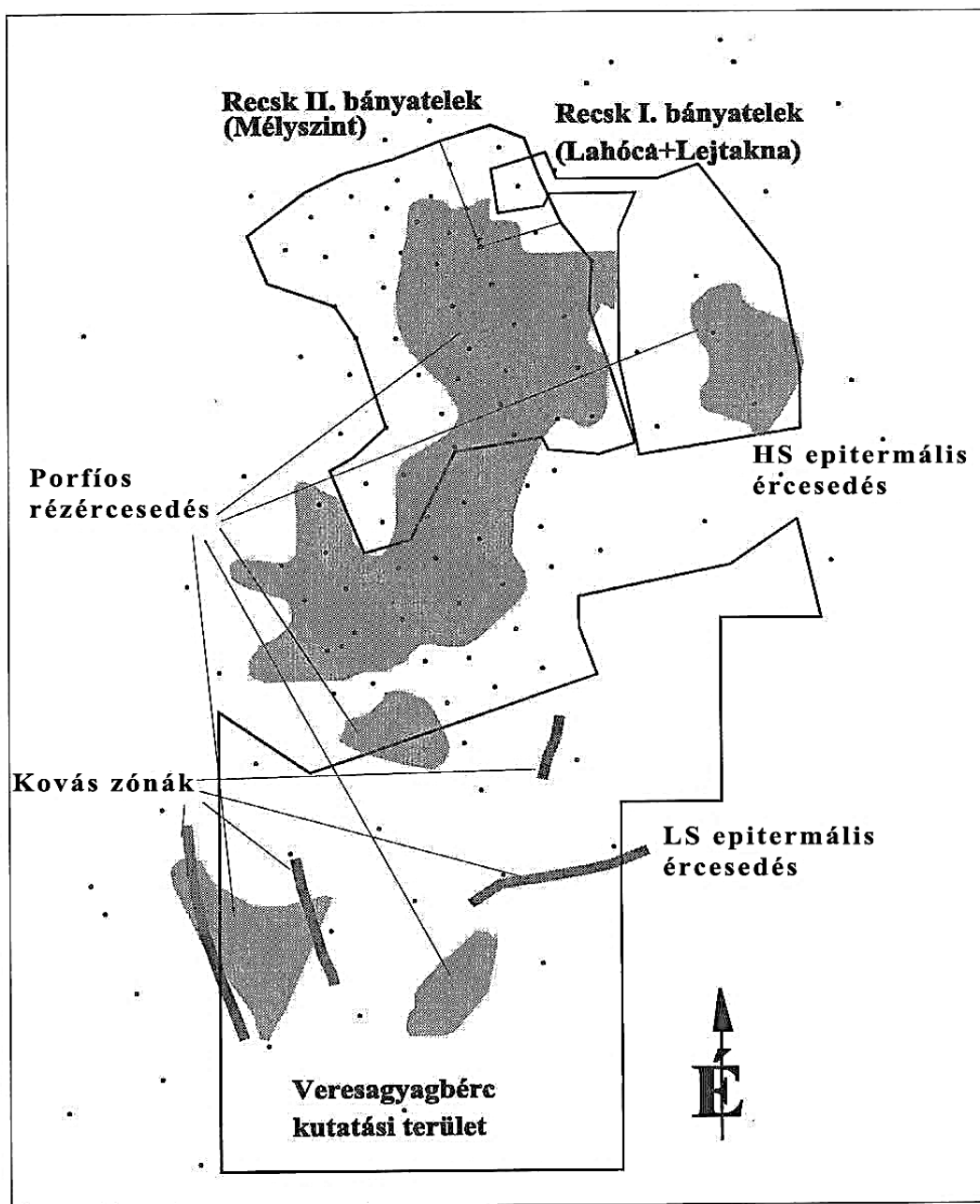
A ma működésben lévő legjelentősebb előfordulások a bánáti öv déli folytatásában, a szerbiai oldalon ismertek. Itt Majdanpek, Veliki Krivelj, Bor, Cukaru Peki igen jelentős, és jelenleg is dinamikusan fejlődő bányászattal és modern kohászattal rendelkező (kínai résztulajdonban lévő) előfordulás csoportot képez [10].

Magyarországi előfordulások

A jobb azonosíthatóság érdekében a lelőhelyeket postai irányítószámmal is megjelöltük. Nyilvántartott, az országos ásványvagyon mérlegben [11] szereplő rézércvagyon két előforduláson ismert: Recskén és Rudabányán.

A többi előfordulás esetében a fémárak alapján vontuk meg a figyelembevétel alsó határát, a pillanatnyi tőzsdei fémár alapján becslült 10 USD/érctonna értékben. Az értéket a USGS éves összefoglalójában közölt adatból származtattuk, ez 2023-ban a közölt 4 USD/lb átlagárnak megfelelő 0,11 Cu% volt [12]. Azokat a lelőhelyeket vettük lehetőségként figyelembe, ahol a réztartalom a 0,11%-ot elérte. A mai piaci réz ár 4,6 USD/lb (9447 USD/tonna).

Az előfordulásokat egyenként ismertetjük rövid, áttekintő jelleggel. Az áttekintés mellett hivatkozásokat tettünk azokra a legfontosabb forrásanyagokra, amelyekben a további részletes információk elérhetőek.



2. ábra. A recski ércelőfordulások helyzete

Nyersanyagkutatások és bányászati fejlesztések jelenleg Rudabányán vannak, az itteni adatok egyúttal ennek jelenlegi képét adják, a többi előfordulást pedig az adattári, irodalmi adatgyűjtés nyomán ismertetjük.

3245 Recsk–Lahóca

Az előfordulás Lahóca bányarésze az 1850-es évektől ismert, az 1860–1979 közötti időszakban folyamatosan termelték, helyben flotálással dúsították, a koncentrátumát kohók számára értékesítették. Részletes történeti összefoglalója olvasható Kun és Csiffáry [26, 27] munkáiban. A 1973-tól egy Lahócától É-ra fekvő kisebb üzemmel egészült ki a termelőüzem (Lejtakna), melynek ércesedését már a mélyszerinti kutatófúrásokban fedezték fel. 1993–1997 között az Enargit Kft. [13], majd 2005–2013 között a Magyar Mining Kft./Eastmine Kft./St.Stephen Gold Kft. [14] Cu–Au érc kutatási programjai zajlottak le sikeresen.

A recski ércelőfordulások helyzetét a 2. ábra mutatja be. A lahócai előforduláson érvényes bányatelek van (Recsk–I), jogosította a Magyar Nemzeti Vagyongazdálkodó Zrt.

Az előfordulás a mélyszerinttel való összekapcsolásával lehetővé teszi egy fokozatosan bővülő, felülről lefelé haladó bányászati stratégia megvalósítását is.

Földtani modellje

A napjainkra kialakult földtani modell szerint a mélyszerinti dioritporfir intrúzió keleti pereme felett, a külszínen ismert Lahóca-hegy környezetében kialakult ércesedés a HS (magas szulfidációs fokú) epitermás típust a kissé távolabbi, Fehérkő-Veresvár területen előforduló ércetek a mélyszerinti- és az LS zóna között IS epitermás típust képviselik. Az ércesedési folyamatok az oligocén korú, részben szubmarin kitörésekkel felszínre került andezithez és dácithoz kapcsolhatók.

A legutolsó átfogó ércföldtani értékelés részben Turi (Lejtakna) [15], részben Takács és társai (Lahóca) [16] munkája. Az ércesedés három szakaszát állapították meg. A legidősebb egy magas hőmérsékletű hidrotermás szakasz volt (kalkopirit, galenit, szfalerit), amelyet két HS epitermás szakasz követett, enargit, luzonit, telluridok, szubmikronos, illetve pirithez kötött terméssarany kiválásával, mindegyik szakaszban tömeges pirittel. A kőzetanyagot hidrotermás explozív breccsának, azaz felszínalatti gőzrobbanás eredményeként létrejött törmelékeny kőzetnek minősítették.

Ásványvagyon

Az 1994–1997 közötti kutatások eredményeként az Enargit Kft. vagyonbecslése az alábbi paramétereket állapította meg (5. táblázat).

5. táblázat. A Lahóca-Lejtakna terület földtani ásványvagyon [13]

millió tonna	Cu %	Au ppm	Ag ppm
34,6	0,11	1,47	7,21

A Cu–Au ércesedéshez As-, Sb-, Se-, Te-, platinafém-dúsulás is kapcsolódik. A rézdúsulások szoros korrelációt mutatnak az Ag (0,85), As (0,98), Bi (0,85), Sb (0,97) elemekkel.

A megkutatott, de ki nem termelt fémvagyon ma ismert földalatti értéke megközelíti a 2000 milliárd forintot. Az előfordulás egyúttal az As és Sb kritikus nyersanyagok legnagyobb ismert ásványi nyersanyag forrása.

3245 Recsk–Mélyszerint

1962-től az akkor már kimerülőfélben lévő lahócai terület pótlására nagy mélységű fúrások kutatás indult. Ez sikeresnek bizonyult, és a 20. század legjelentősebb hazai érc kutatási programja bontakozott ki, a külszínről 136 db 1000–1300 m közötti mélységet elérő, összesen 155 ezer folyóméter mélyfúrással. A mélyszerint első jelentős sokoldalú földtani összefoglalása a *Földtani Közlöny* 1975. évi különszámában található [17]. Utolsó átfogó földtani értékelése a Recskkel foglalkozó monográfia cikkeiben érhető el [18]. A földtani-környezeti-termesztvédelmi információk együttesen a Török K. szerkesztésében készült tanulmányban [19] található.

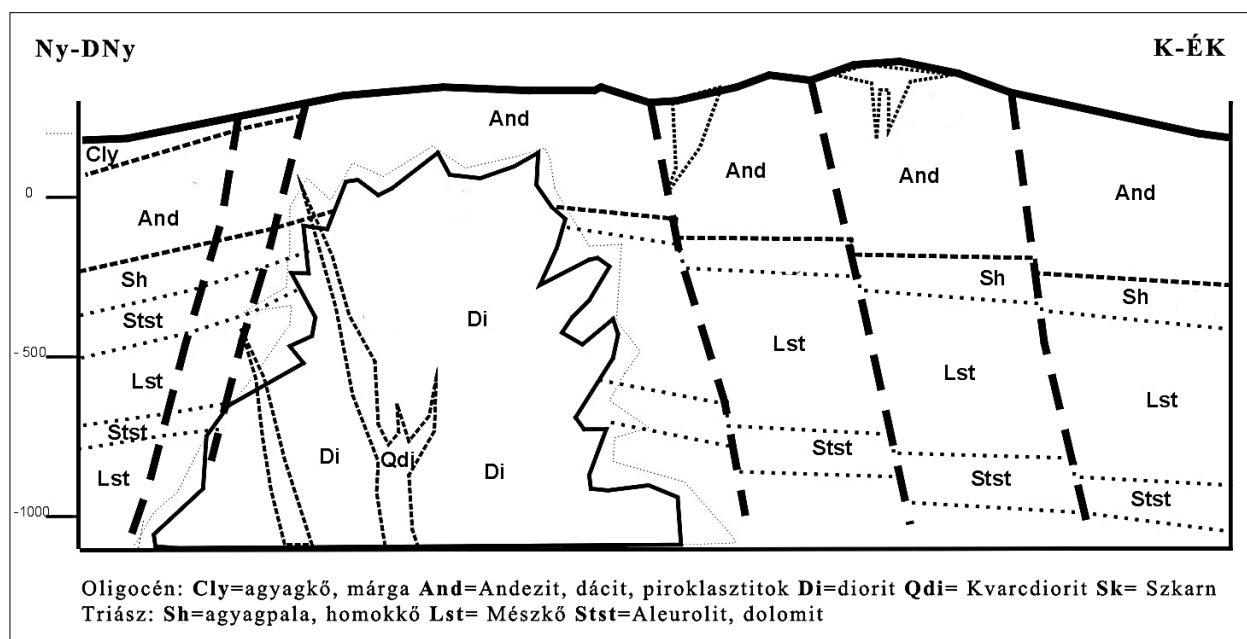
Az ércesedésre 1971–1980 között jelentős beruházással nagy kapacitású bányainfrastruktúrát alakítottak ki, 2 db 1250 m mélységű, 8 m átmérőjű függőaknával, s az ezeket összekötő, a felszíntől 800 m és 1100 m mélységben futó kb. 2-2 km hosszúságú fővágattal, ebből kiágazó kisebb kutatóvágatokkal. A kutatóvágatokból további 87 ezer m föld alatti magfúrással. A kutatások nyomán világossá vált, hogy az előfordulás összetett, részben porfir és szkarinos rézércetek, részben szkarinos cinkércetek, részben Pb–Zn metasomatikus ércesedéseket is összefog. Ezekhez a fő típusokhoz még több kisebb jelentőségű ércfajta kapcsolódik.

A mélyszerint kutatása az 1980-as évek elején politikai döntéssel állt le, s a létesítményt mintegy 20 éves állagmegóvás és több sikertelen tőkebevonási kísérlet után zárták be 1999-ben leállítva a szivattyúzást.

Jelenleg érvényes bányatelekkel rendelkezik (Recsk–II), melynek jogosította a Nitrokémia Zrt.

Földtani modellje

Az ércesedés oligocén időszakban benyomult dioritporfirban alakult ki, a réz fő hordozóásványa



3. ábra. A mélyszinti előfordulás jellemző földtani szelvénye [18]

6. táblázat. A Recsk mélyszinti ércesedések földtani ásványvagyon [19]

	Ismeretesség	millió tonna	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	Mo%	Au g/t	Ag g/t
Rézérc	B+C1+C2	781,8	0,66	0,01	0,07	6,81	0,008	0,13	1,87
PbZn-érc	B+C1+C2	129,8	0,24	0,89	2,39	7,02	0,002	0,07	12,43

kalkopirit, mely hintetten (porfíros rézérc) vagy tömeges formában (szkarnos rézérc) dúsult, jelentősebb pirittel kísérvé. A legdúsabb rézérces zónák az intrúzió szegélyein és kupola zónájában (porfíros érc), illetve a mészkő/dioritporfír kontaktuson jöttek létre (3. ábra). A lelőhely az ország legjelentősebb, még fel nem tárt, de megkutatott ércvagyont képviseli.

A fő rézhordozó ásvány a kalkopirit jelentős (5–10%) piritkísérettel. A rézércesedést jelentős aranydúsulás kíséri, amely szkarnos változatban az 1 g/t meghaladja. A korábbi elemzési eljárásokkal alulbecsült Au-tartalom jelentős gazdasági szerepe miatt részletes újraértékelést igényel.

A 781 millió tonna 0,66% Cu + 0,13 ppm Au fémtartalom a jelenlegi árakon mintegy 66 milliárd USD fémtérteket képvisel. Ehhez a Lahóca Cu-Au érce, illetve az Pb-Zn ércek kapcsolódnak, a recski érces komplexum teljes fémtérteket meghaladja a 80 milliárd USD szintet (28 000 milliárd forint). Ez Magyarország nyilvántartott, egyéb nemzeti vagyonának értékéhez mérhető, erőteljesen rámutatva arra a (még ki nem használt) gazdasági lehetőségre, amit az előfordulás termelésbe állítása jelentene.

A réz mellett gazdasági értéként is igen jelentős Au-, Ag-, Mo-, Re-, Pb-, Zn-, Pt-dúsulás is jelentke-

zik több csatlakozó ércfajtában. További, nem ismert eloszlású kritikus elemként a W, Bi, In jelenik meg.

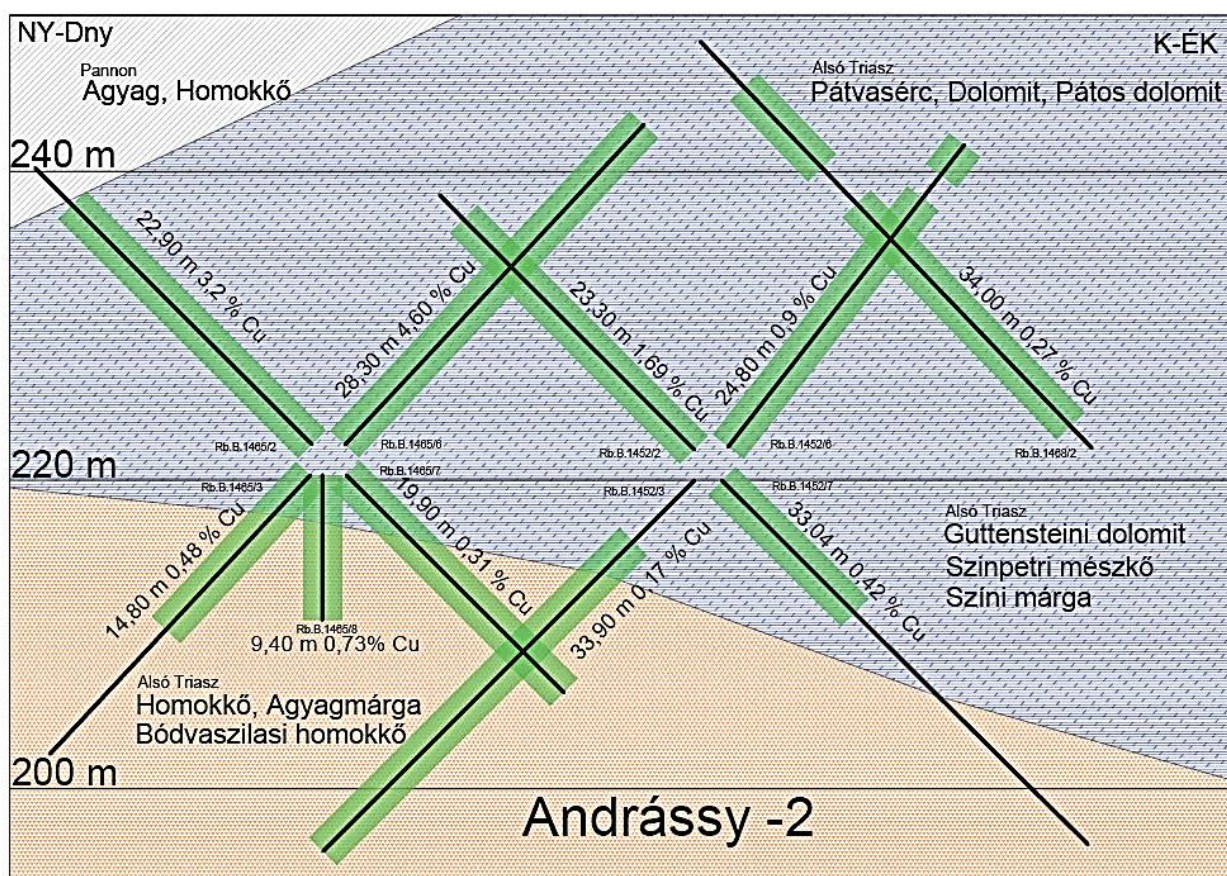
3733 Rudabánya

Az előfordulás egykor Magyarország legjelentősebb vasércbányája volt. Az 1970-es évektől erőfeszítések folytak az ugyanebben a földtani környezetben ismert színesércek kutatására és egy rövid ideig a termelésére is. Az 1970-es években termelt 124,8 ezer tonna rézérc feldolgozásából az ércelő 0,79% Cu átlagminőséget igazolt vissza.

Az 1988-as bányabezárás után nyilvántartott ásványvagyonok között vasércként jegyzett, mintegy 43 millió tonnás sziderit ércvagyon mellett rézérc 1,5 millió tonna tömeggel, 0,56% Cu átlagminőséggel szerepel [28].

A rézérc ismert kiterjedése Rudabányán jelentősen meghaladja a becsült vagyon területét, de rendszeres, részletező kutatása, illetve összefoglaló értékelése nem történt meg. Az előfordulás bizonyos részei rendkívül jó minőségű rézércnek tekinthetők, például az Andrassy-2 bányarészben mélyült bányabeli mélyfúrások adatai alapján (4. ábra).

A rézérc mellett a modern kutatások is megerősítették a barit és ólom-ezüstérc ipari kitermelésre alkalmas testekben való megjelenését is, 0,2 millió tonna



4. ábra. Rudabánya rézércesedés dús szakaszmetesztete, az Andrassy-2 bányarész 1970-ben mélyült bányabeli fúrások adatai alapján

(barit) és 0,56 millió tonna (ólom és ezüstérc) tömegű ásványvagyonnal [31].

A 2006 óta zajló, a Rotaqua Kft. által folytatott modern kutatások eredményeként az előfordulás földtani modelljét igen jelentősen átalakították. Ez a fenti vagyonok jelentős felértékeléséhez vezetett, és egyúttal további kutatások irányának meghatározását segítette a barit és a színesfémérc kutatásában.

A rézérc legismertebb változata a Darnó nyírási öv hosszanti és haránttöréseihez kötött, fakóérc, illetve ezt felváltó kalkopirit és bornit elsődleges szulfid-ásványok megjelenésével kísért (valószínűleg oligocén korú) hidrotermális ércesedés. A késői neogénben felszínre emelkedett lepusztuló központi blokkban jelentősebb oxidációs öv alakult ki, malachit, azurit, termésréz kiválásával [20].

Az ásványvagyonot alkotó ismert rézérc fém-tartalmának mai piaci értéke kb. 46 milliárd forint, a későbbi kutatásokkal körvonalazható rudabányai rézércesedésben foglalt kinyerhető rézércesedés mai piaci értéke 1300 millió USD, 544 milliárd HUF körüli. Ehhez további értéknövelő melléktermékek (barit, ólom-ezüst érc stb.) csatolhatók. Rudabánya területén jelenleg három kritikus, illetve stratégiai nyersanyag (barit, réz, és stroncium) ipari méretű előfordulásának rövid megvalósítási időt igénylő ku-

tatása és barmezős fejlesztésként termelő üzemmé alakítása lehetséges, ami a CRMA rendelet hazai megvalósításának lehetséges célterületei között az első helyre érdemesíti.

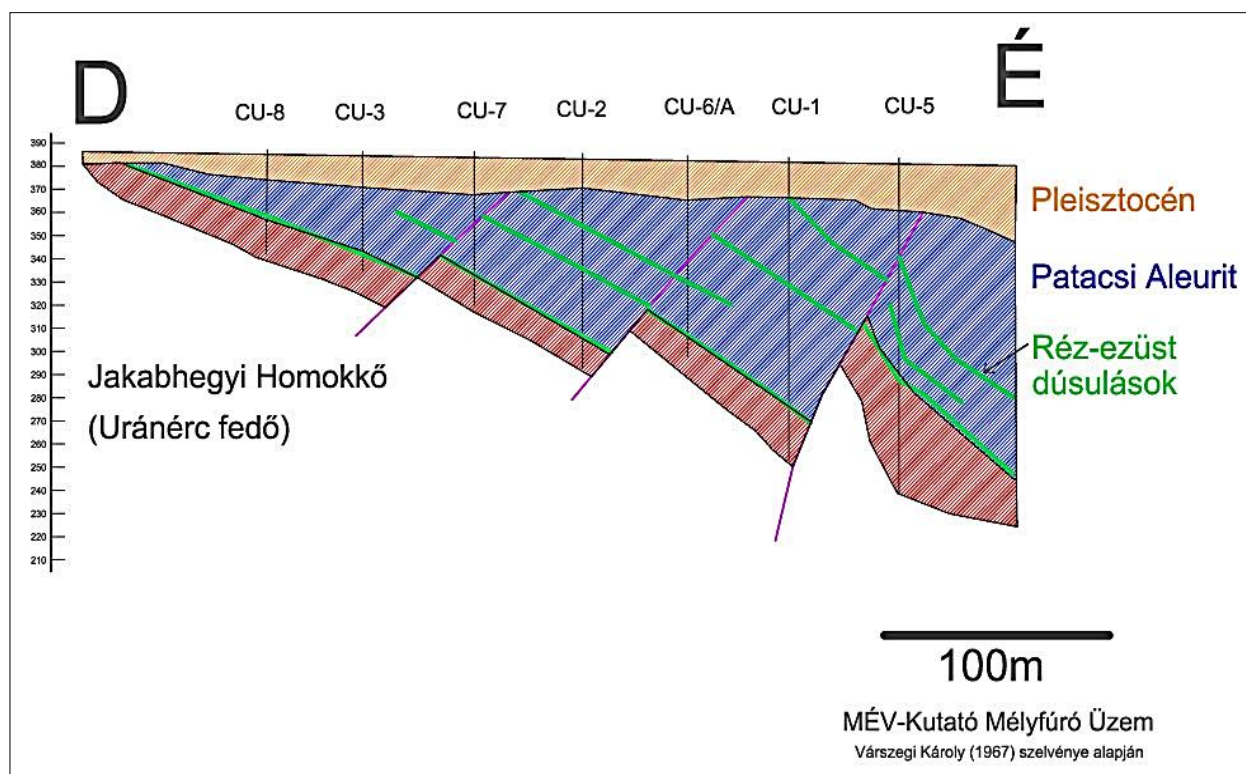
Felderítetlen dúsulások

2634 Nagyborzsöny

A Börzsöny MÁFI-ELGI által végzett földtani kutatása során több területen derítettek fel az adott időpontban a Recskhez hasonlítva kisebb dúsultságú, de mai újraértékelésben figyelemre méltó rézércesedést [21]. Érdemleges kutatások a hegység központi területén, a Nagyborzsönyt magában foglaló kalderaszerkezetre korlátozódtak.

Az ércesedések a miocén andezit-dácit vulkanizmust követő hidrotermális tevékenység eredményeként jöttek létre több centrumban. A réz esetében a legjelentősebb vastagságban, 0,2% Cu feletti átlagos koncentrációt tartalmazó sávokban megjelenő előfordulás a Kuruc-patak területe, a elsősorban a Perőcsény-26, Perőcsény-9 fúrások által harántolt térségben ismert.

Nyilvánosságra hozott és állami nyilvántartásban szereplő ásványvagyonbecslés a kutatások adataiból



5. ábra. A Petőcz légaknai rézkutatások földtani szelvénye [23]

nem készült. Az előfordulási csoport csak szórványos adatokból ismert, a kutatások során nem értékelt, de földtani jellegek alapján jelentős Au-, Ag-, Bi-, W-dúsulásokat is tartalmaz.

7634 Pécs–Égervölgy

A Nyugat-Mecsek területén az alsótriász Jakabhegyi Homokkő Formációban (az alsó triász korú Jakabhegyi és Patacsi Formációk határán, az Égervölgyi Tagozatban) réteghez kötött Cu-Ag anomáliák ismertek. Itt kb. 10 m vastagságban feltárt üledékes képződménysorban 0,15–1,2% Cu-tartalmú üledékes feketepala-rétegeket tár fel egy sétaút bevágása [22]. A réztartalmú rétegeket a Petőcz légakna is harántolta, s ebből egy kisebb kutatást is indítottak, amely igazolta a réteghez kötött jelleget [23].

A rézben dúsult szint kiterjedtebb megismerése a Nyugat-Mecsekben az 1960-as évek során végzett uránkutatáshoz kapcsolódik. Több külszíni feltárása ismert. A mélységi uránkutatás során számos furás harántolta. Rézre irányuló furásos kutatását a MÉV a IV. sz. bányaiüzem légaknája mellett egy rövid szelvényben is megvalósította (1966–1967) (5. ábra). A Cu-Ag anomális szint a germán kifejlődési területeken ismert és bányászati művelt permii, alsó-Zechstein korú rézpalára (Kupferschiefer) hasonlít.

A lengyel Rudna és a mecseki előfordulások anyagának összehasonlítása alapján [24] nemcsak a két előfordulás rétegtani helyzete, hanem az ásványtani „ujjlenyomata” nagy hasonlóságot mutat.

9794 Felsőcsatár

Több mélyfúrásos, rendszeres elemzésekkel kiegészített szakszerű kutatás folyt az 1950-es években az itteni lelőhelyen. Rézre vonatkozó elemzési adatok nincsenek, de kalkopirit, malachit, devillin és egyéb Cu-ásványok jelenlétét mutatták ki a meddőben és a talk bánya melletti zöldpala kőfejtőben. A környezetben ismert és megkutatott Cr-, Ni-, talkelőfordulás mellett jelentkező rézdúsulás a korábban becsült érc-tömeg esetében (110 millió tonna Cr-Ni-Cr érc) akár jelentős lehet [25].

Javaslat a kutatások folytatására

A recski lelőhely kutatásának szükségessége nyilvánvaló, indoklása meghaladja ennek az írásnak a lehetőségeit.

A rudabányai réz kutatása azért időszerű, mert a ezzel térben kapcsolódó barit nyersanyagra bányatelek fektetése folyamatban van, így jelentős kiegészítő lehet egy csatolt nyersanyag termeléséhez.

A nagybörzsönyi előfordulás átértékelésre vár, a rézinformációk kiegészítendő.

A Nyugat-Mecsek Cu-Ag ércesedése akár a legjelentősebb új találat lehet a feltételezett teleptípus alapján, az ismert előfordulások közötti térrészek előzetes, majd részletes megkutatásával.

Hivatkozások

- [1] ECI (2023): Copper – the pathway to net zero. Regional focus Europe. European Copper Institute. <https://internationalcopper.org/resource/copper-pathway-to-net-zero/>
- [2] CAN (2024): <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/copper-facts>
- [3] Gill C. B. (1980): Non-ferrous Extractive Metallurgy. John Wiley & Sons, New York, pp. 29–35.
- [4] MINING (2017): <https://www.mining.com/web/copper-sx-ew-what-are-the-options/>
- [5] Dill H. D. (2010): The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews* 100, 1–420. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>
- [6] Chavez W. X. Jr. (2021): Weathering of copper deposits and copper mobility: mineralogy, geochemical stratigraphy, and exploration implications. *SEG Discovery* 126, 16–27. <https://doi.org/10.5382/SEG-news.2021-126.fea-01>
- [7] MININGTECH (2024): <https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-coppers-mines/?cf-view>
- [8] GLOBAL (2025): <https://www.globaldata.com/data-insights/mining/europe--five-largest-copper-mines-in-2090652/>
- [9] SCRREEN (2024): https://screen.eu/wp-content/uploads/2024/01/SCRREEN2_factsheets_COPPER-update.pdf
- [10] ZIJIN (2025): <https://www.zijinmining.com/global/program-detail-71737.htm>
- [11] OÁNY (2023): https://sztfh.hu/downloads/banya-szat/nyilvantartasok/asvanyvagyon-nyilvantartas/magyarorszag_asvanyvagyona_2023.pdf
- [12] USGS (2024) Mineral commodity summaries <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>
- [13] Földessy J. (szerk., 1997): Lahóca Veresagyagbérc terület. Földtani kutatás zárójelentése. Enargit Kft. Kézirat.
- [14] Fekete Zs., Smyth M. (2012): Földtani zárójelentés a „Parád Észak/Dél” kutatási területen 2005–2011 között végzett földtani kutatási tevékenységről. East-mine Kft. Kézirat.
- [15] Turi J. (2012): A recski lejtakna hidrotermás ásvány-paragenezisének újrvizsgálata. Szakdolgozat. ELTE, Budapest.
- [16] Takács Á., Molnár F., Turi J., Mogessie A., Menzies J. C. (2017): Ore mineralogy and fluid inclusion constraints on the temporal and spatial evolution of a high-sulfidation epithermal Cu-Au-Ag deposit in the Recsk ore complex, Hungary. *Econ. Geol.*, 112/6, 1461–1481. <https://doi.org/10.5382/econ-geo.2017.4517>
- [17] Gagy-Pálffy A. (1975): A recski mélyszinti ércesedés megismerése, általános jellemzése és népgazdasági jelentősége. *Földtani Közöny*, 105, 571–581. https://epa.oszk.hu/01600/01635/00213/pdf/EPA01635_foldtani_kozlony_1975_105_s_571-581.pdf
- [18] Földessy J., Szebényi G. (2008): The mineralization of the Recsk Deeps and Lahóca – short geological overview. *Publications of the University of Miskolc, Geosciences Series A. Mining*. Vol. 73, 85–98. https://matarka.hu/koz/ISSN_1219-008X/73k_2008_eng/ISSN_1219-008X_vol_73_2008_eng_085-098.pdf
- [19] Török K. (szerk., 2016): Recsk II. rézérc koncesszióra javasolt terület komplex érzékenységi és terhelhetőségi vizsgálati jelentése. MBFH. Budapest, Kézirat.
- [20] Németh N., Földessy J., Turi J. (2016): Ore geology of the copper sulfide mineralization in the Rudabánya ore bearing complex. *Central European Geology*, 60, 53–72. <https://doi.org/10.1556/24.59.2016.005>
- [21] Csillagné Teplánszky E., Csongrádi J., Korpás L., Pentelényi L., Vetőné Árkos É. (1983): A Börzsöny-hegység központi területének felépítése és ércesedése. MÁFI Éves Jelentése 1981. évről, pp. 77–127.
- [22] Várszegi K. (1965): Karbonátos rézászvány-előfordulás a mecseki Éger-völgy alsótriász rétegeiben. *Földtani Közöny* 95, 437–438. https://real-j.mtak.hu/8907/4/Foldtani_Kozlony_1965_95_4.pdf
- [23] Várszegi K., Virág K. (1967): Jelentés a Petőcz légakna körüli rézérc kutatásokról. MÉV. Kézirat.
- [24] Katona G. (2014): A Rudna (Lengyelország) perm és Mecsek perm-alsó triászPatacsi Formáció réteggöve-tő ércesedéseinek összehasonlító földtani és geokémi-ai vizsgálata. Diplomamunka, Miskolci Egyetem.
- [25] Böjtösné Varrók K. (1965): A felsőcsatári talk- és szerpentin előfordulás földtani ismertetése és Cr-Ni-Co tartalmának vizsgálata. MÁFI, Budapest.
- [26] Kun B. (1989): 25 éves az Országos Érc és Ásvány-bányák. OÉÁ, Budapest.
- [27] Csiffáry G (2009): A lahócai ércbányászat története (1860–1979). 144 p. Ércbányászati Múzeum Alapítvány Rudabánya. <https://mek.oszk.hu/07600/07686/07686.pdf>
- [28] Balla K. (1988): Rudabánya bányabezárási dokumentáció. NME Miskolc. Kézirat.
- [29] ORIGO (2024): <https://www.origo.hu/gazdasag/2024/04/kiderult-mekkora-az-allami-vagyon-erteke>
- [30] Bačo P., Bačova Z., Nemeth Z., Repčiak M. (2015): 5. Potential occurrence of selected, mainly critical raw materials at the territory of the Slovak Republic in respect to EU countries needs. *Slovak Geol. Mag.*, 15/2, 87–120. https://www.researchgate.net/publication/294886595_5_Potential_Occurrence_of_Selected_Mainly_Critical_Raw_Materials_at_the_Territory_of_the_Slovak_Republic_in_Respect_to_EU_Countries_Needs
- [31] Kasó A. ifj. (szerk.): Földtani kutatási zárójelentés a rudabányai barit kutatásról. Rotaqua KFT. Kézirat.

Az ESTPHAD koncepció*

I. rész: Kétalkotós egyensúlyi fázisdiagram

KÖRÖSY GERGELY, ROÓSZ ANDRÁS[@], MENDE TAMÁS[@]
Miskolci Egyetem, Anyag- és Vegyészmérnöki Kar, Fémteni, Képlékenyalakítási
és Nanotechnológia Intézet, 3515 Miskolc
[@]E-mail: andras.roosz@uni-miskolc.hu

Másodközlés – Eredeti közlemény:

The Concept of the Estimation of Phase Diagrams (An Optimised Set of Simplified Equations to Estimate Equilibrium Liquidus and Solidus Temperatures, Partition Ratios, and Liquidus Slopes for Quick Access to Equilibrium Data in Solidification Software) Part I: Binary Equilibrium Phase Diagrams

Gergely Körösy, András Roósz*, Tamás Mende

Metals 2024, 14(11), 1266.
<https://doi.org/10.3390/met14111266>

A cikk termodinamikai egyenletekből származó egyenleteket mutat be a likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet, a likvidusz meredekségének és a kristályosodás szimulációjához szükséges megoszlási hányados kiszámításához. Az egyenletek állandói könnyen meghatározhatók az ismert diagramok digitalizálásával nyert vagy CALPHAD alapú szoftverrel számított adatokból. Az ESTPHAD hierarchikus felépítéssel rendelkezik, a kétalkotós (binér) rendszerek függvényeit a háromalkotós (ternér) rendszerek függvényeinek kiszámítására, a háromalkotós rendszerek függvényeit a négyalkotós (kvaternér) rendszerek függvényének számításánál használjuk fel, és így tovább. A módszert a Si-Ge izomorf, az Al-Mg és az Al-Si eutektikus típusú egyensúlyi fázisdiagramok likviduszának és szoliduszának feldolgozásával mutatjuk be. A háromkomponensű rendszerek függvényeinek kiszámítására szolgáló módszer alkalmazását a II. részben fogjuk ismertetni. Ennek a módszernek az az előnye, hogy a függvények egyszerűek, az állandók nagyon gyorsan meghatározhatók, és nagyon könnyen beépíthetők a szimulációs szoftverbe. A legjelentősebb előnye, hogy a számítási idő minimum három nagyságrenddel rövidebb, mint a CALPHAD típusú számításé.

Kulcsszavak: termodinamikai alapú függvények, likvidusz, szolidusz, megoszlási arány, CALPHAD

* ESTPHAD (ESTimation of the PHase Diagram): Egyszerű függvények optimalizált rendszere a likvidusz és a szolidusz egyensúlyi hőmérséklet, megoszlási hányados a likvidusz meredekségének számítására a kristályosodási szoftverben lévő egyensúlyi adatokhoz való gyors hozzáféréshez.

Jelölések

G : az ötvözet szabad energiája

$G_A, G_B, \dots, G_N$: A, B szabad entalpiája, N elem

$G_A^l, G_B^l, \dots, G_N^l$: $A, B, \dots, N$ elem szabad energiája az olvadék fázisban

$G_A^s, G_B^s, \dots, G_N^s$: $A, B, \dots, N$ elem szabad energiája a szilárd fázisban

$X_A, X_B, \dots, X_N$: $A, B : A, B, \dots, N$ elem koncentrációja az ötvözetben

$X_A^l, X_B^l, \dots, X_N^l$: $A, B, \dots, N$ elem koncentrációja az olvadék fázisban

$X_A^s, X_B^s, \dots, X_N^s$: $A, B, \dots, N$ elem koncentrációja a szilárd fázisban

$\mu_A^l, \mu_B^l, \dots, \mu_N^l$: $A, B, \dots, N$ elem parciális moláris szabadenergiája a folyékony fázisban

$\mu_A^s, \mu_B^s, \dots, \mu_N^s$: $A, B, \dots, N$ elem parciális moláris szabadenergiája a szilárd fázisban

$\Delta G_A^{(l \rightarrow s)}, \Delta G_B^{(l \rightarrow s)}$: az A és B elemek szabad energiájának változása kristályosodáskor

T : abszolút hőmérséklet

$\Delta H_A^{(l \rightarrow s)}, \Delta H_B^{(l \rightarrow s)}$: A és B elemek entalpiaváltozása kristályosodáskor

T_A, T_B : A és B elemek olvadási hőmérséklete

T_L, T_S : az ötvözet likvidusz- és szolidusz-hőmérséklete

R : egyetemes gázállandó

k_{AB}^B : a B elem megoszlási hányadosa az AB ötvözetben

M : a likvidusz lejtése

$a_{AB}^l(i)$ és $a_{AB}^s(i) : f_{AB}^l(X_B^l)$ és $f_{AB}^s(X_B^s)$ polinomok állandói
 $A_{AB}^l(i)$ és $A_{AB}^s(i) : F_{AB}^l(X_B^l)$ és $F_{AB}^s(X_B^s)$ polinomok állandói

$B_{AB}^l(i)$ és $B_{AB}^s(i) : \ln k_{AB}^B(X_B^l)$ és $\ln k_{AB}^B(X_B^s)$ polinomok állandói

Indexek

m, i : $a_{AB}^l, a_{AB}^s, A_{AB}^l, A_{AB}^s, B_{AB}^l, B_{AB}^s$ állandók száma

AB : AB ötvözet

Felső indexek

l, s : olvadék, szilárd

1. Bevezetés

A kristályosodási szimulációkban általában az olvadék/szilárd határfelületen a koncentrációk egyensúlyát tételezik fel. Ezért a szimuláció során ismerni kell az egyensúlyi átalakulási (azaz likvidusz és szolidusz) hőmérsékletet a koncentráció függvényében, a fázisok egyensúlyi koncentrációját egy adott hőmérsékleten, és a megoszlási hányadost [1–4]. Ez a probléma többféleképpen megoldható.

A legpontosabb, de legbonyolultabb lehetőség a CALPHAD típusú szoftverek (például THERMOCALC, TC) használata a szimulációs szoftver szubrutinjaként. A CALPHAD típusú szoftver azonban tar-

talmaz egy iterációs eljárást, amely a helyi egyensúly viszonylag hosszú számítási idejét eredményezi. Így a CALPHAD típusú szoftver szubrutin számítási időigénye jelentősen meghaladhatja a folyamat szimulációját végző szoftverét. Ezért a szimuláció hatékonyabbá, gyorsabbá tételének érdekében egyszerűbb módszerre van szükség.

A legegyszerűbb módszer a likvidusz és a szolidusz egyenessel való közelítése. Sok szerző használta ezt a módszert a kristályosodási folyamatok különböző típusainak leírására (lásd a kristályosodásról szóló könyveket [5–7]). Valamivel bonyolultabb módszer, ha a likviduszt és a szoliduszt polinommal [8–10] vagy spline-módszerrel [11] közelítjük. Egyes szimulációk számos hőmérsékletre tartozó koncentrációból álló adat táblát használnak. A táblák adatai származhatnak a grafikus fázisdiagramokból azok digitalizálásával, vagy egy CALPHAD típusú számítás eredményeiből. Ezeknek a tábláknak az adataiból polinomot hozhatnak létre a likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletek, valamint a megoszlási hányados leírására regressziós analízissel [12–15].

A cikkben egy új típusú megoldását mutatjuk be ennek a problémának, az úgynevezett ESTPHAD módszert, amely a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

1. az ötvözet adott koncentrációja esetében közvetlen algoritmust biztosít (iterációs eljárás nélkül) a likvidusz és a szolidusz egyensúlyi hőmérsékletek, a megoszlási hányados és a likviduszlejtés számítására,
2. az ötvözet adott koncentráció tartományára vonatkozóan a kísérletileg meghatározott vagy a CALPHAD típusú szoftverrel kiszámított/optimalizált adatokkal összehasonlítható pontosságú becslést eredményeket szolgáltat,
3. az ESTPHAD algoritmus hierarchikus módon épül fel, a kétalkotós diagramok függvényeit felhasználja a három, négy vagy N alkotós diagramok számításánál.

Egy korábbi cikkben [16] egy egyszerű formalizmust és módszert javasoltunk a megoszlási hányados meghatározására az olvadék fázis koncentrációjának függvényében a kétalkotós és háromalkotós ötvözetrendszerek esetében a kristályosodási folyamatok szimulációjának eszközeként. Jelen cikk célja, hogy javaslatot tegyen az ESTPHAD általános formalizmusára, azaz a likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet, valamint a megoszlási hányados egyszerűsített, de termodinamikailag alátámasztott függvényeinek optimalizált változatára a koncentráció függvényében egy általános A-B rendszerben. A függvények alkalmazhatóságát izomorf (korlátlan oldha-

tóságú), valamint eutektikus kétalkotós ötvözetek esetében mutatjuk be.

A fázisok egyensúlyi koncentrációja egy adott hőmérsékleten elvileg kiszámítható, ha a fázisok szabad energia függvényei ismertek. Mivel ezek a szabad energia függvények túl bonyolultak a reguláris oldatok esetében, az ESTPHAD termodinamikai alapjait az ideális kétalkotós ötvözet esetében mutatjuk be. A likvidusz, szolidusz, a megoszlási hányados és a likviduszlejtés kiszámítására szolgáló egyenletek formalizmusának meghatározásánál figyelmen kívül hagytuk a keveredésből származó szabad energiát és entrópiát. A kidolgozott formalizmus reguláris oldatoknál is használható, de a függvények állandóit az egyensúlyi fázisdiagram mért adataiból, vagy valamely CALPHAD típusú számítás eredményeiből lehet meghatározni.

2. Az ESTPHAD formalizmus termodinamikai alapjai

Ideális kétalkotós ötvözetrendszer esetén a folyékony vagy szilárd oldatok szabad energiája a koncentráció függvényében a következőképpen közelíthető meg:

$$G = G_A X_A + G_B X_B + RT(X_A \ln X_A + X_B \ln X_B). \quad (1)$$

Az A és B elem parciális moláris szabad energiája a következő:

$$\mu_A = G_A + RT \ln X_A \quad \text{és} \quad \mu_B = G_B + RT \ln X_B. \quad (2)$$

Feltételezve, hogy az ötvözetrendszer folyékony (l) és szilárd (s) fázisokat tartalmaz, amelyek egyensúlyban vannak, Gibbs szerint az egyensúlyi feltétel a következőképpen írható fel:

$$\mu_A^l = \mu_A^s \quad \text{és} \quad \mu_B^l = \mu_B^s. \quad (3)$$

A (2) és (3) egyenletből a likvidusz és a szolidusz hőmérséklete, a megoszlási együttható és a likvidusz meredeksége kiszámítható egy adott koncentrációnál, ha a (2) és (3) egyenlet állandói ismertek.

3. A likvidusz- (T_L) és a szolidusz- (T_s) hőmérséklet kiszámítása

3.1. Likvidusz-hőmérséklet

A (3) egyenlet alapján írható:

$$G_A^l + RT_L \ln X_A^l = G_A^s + RT_L \ln X_A^s \quad (4)$$

$$G_A^l - G_A^s = \Delta G_A^{l \rightarrow s} = RT_L \ln(X_A^s / X_A^l). \quad (5)$$

és

$$\Delta G_A^{l \rightarrow s} = \Delta H_A^{l \rightarrow s} (T_A - T_L) / T_A. \quad (6)$$

Az (5) és (6) egyenlet használatával a következő írható:

$$\frac{\Delta H_A^{l \rightarrow s} (T_A - T_L)}{T_A} = RT_L \ln \left(\frac{X_A^s}{X_A^l} \right) = RT_L \ln k_A, \quad (7)$$

$$T_L = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \ln(X_A^s / X_A^l) + 1 \right]^{-1}. \quad (8)$$

Figyelembe véve, hogy

$$X_A^l = 1 - X_B^l, \quad X_A^s = 1 - X_B^s, \quad X_B^s = k_B X_B^l,$$

$$T_L(X_B^l) = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \{ \ln(1 - X_B^s) - \ln(1 - X_B^l) \} + 1 \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$T_L(X_B^l) = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \{ \ln(1 - k_B X_B^l) - \ln(1 - X_B^l) \} + 1 \right]^{-1}. \quad (10)$$

A Taylor-sorbafejtés felhasználásával a (10) egyenlet $\ln$ része polinommal alakítható:

$$\ln(1 - X) = - \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} X^i, \quad (11)$$

$$T_L(X_B^l) = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \left\{ - \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (k_B X_B^l)^i + \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (X_B^l)^i \right\} + 1 \right]^{-1}, \quad (12)$$

$$T_L(X_B^l) = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (X_B^l)^i (1 - k_B^i) \right\} + 1 \right]^{-1} \quad (13)$$

$$= T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} f_{AB}^l(X_B^l) + 1 \right]^{-1},$$

ahol

$$f_{AB}^l(X_B^l) = \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (X_B^l)^i (1 - k_B^i) \right\}$$

$$= (X_B^l)^1 (1 - k_B^1) / 1 + (X_B^l)^2 (1 - k_B^2) / 2$$

$$+ (X_B^l)^3 (1 - k_B^3) / 3 + \dots \quad (14)$$

$$= \sum_{i=1}^m a_{AB}^l(i) (X_B^l)^i = a_{AB}^l(1) (X_B^l)^1 + a_{AB}^l(2) (X_B^l)^2$$

$$+ a_{AB}^l(3) (X_B^l)^3 + \dots$$

és

$$F_{AB}^l(X_B^l) = \frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} f_{AB}^l(X_B^l). \quad (15)$$

Végül

$$T_L(X_B^l) = T_A \left[F_{AB}^l(X_B^l) + 1 \right]^{-1}, \quad (16)$$

ahol

$$F_{AB}^l(X_B^l) = \sum_{i=1}^m A_{AB}^l(i)(X_B^l)^i \\ = A_{AB}^l(1)(X_B^l)^1 + A_{AB}^l(2)(X_B^l)^2 \\ + A_{AB}^l(3)(X_B^l)^3 + \dots, \quad (17)$$

ha $X_B^l = 0$ (tisztan A elem esetén), $T_L = T_A$.

Van egy lényeges különbség a (16) egyenlet és a szakirodalomban használt egyszerű polinomiális egyenlet között [8–10], ahol

$$T_L(X_B^l) = \\ = T_A - A^l(X_B^l)^1 + A^l(2)(X_B^l)^2 \\ + A^l(3)(X_B^l)^3 \dots + \quad (18) \\ = T_A - \sum_{i=1}^m A^l(i)(X_B^l)^i.$$

Csak az első közelítést ($i = 1$) használva a (18) egyenlet az [5–7] szakirodalomban általában használatos képest egyszerűbb alakú lesz, ami azt jelenti, hogy a likvidusz egyenes:

$$T_L(X_B^l) = T_A - A^l(1)(X_B^l)^1, \quad (19)$$

ahol $A^l(1)$ az egyenes likvidusz meredeksége (M).

3.2. Szolidusz hőmérséklet

A likvidusz-hőmérséklethez hasonlóan a szolidusz-hőmérséklet is kiszámítható az (5) és (6) egyenlet alapján. Ebben az esetben $X_B^s = X_B^l/k_B$, és

$$T_s(X_B^s) = \\ = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} \left\{ \ln(1 - X_B^s/k_B) - \ln(1 - X_B^s) \right\} + 1 \right]^{-1} \quad (20)$$

A Taylor-sorbafejtést használva a (20) egyenlet $\ln$ része polinommal alakítható hasonlóan a (14) egyenlethez:

$$f_{AB}^s(X_B^s) = \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (X_B^s)^i \left[1 - (1/k_B)^i \right] \right\} \\ = (X_B^s)^1 \left[1 - (1/k_B)^1 \right] / 1 + (X_B^s)^2 \left[1 - (1/k_B)^2 \right] / 2 \\ + (X_B^s)^3 \left[1 - (1/k_B)^3 \right] / 3 + \dots, \quad (21)$$

és ismét:

$$T_s(X_B^s) = T_A \left[\frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} f_{AB}^s(X_B^s) + 1 \right]^{-1}, \quad (22)$$

ahol

$$f_{AB}^s(X_B^s) = \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{1}{i} (X_B^s)^i (1 - (1/k_B)^i) \right\} \\ = (X_B^s)^1 (1 - (1/k_B)^1) / 1 + (X_B^s)^2 (1 - (1/k_B)^2) / 2 \\ + (X_B^s)^3 (1 - (1/k_B)^3) / 3 + \dots \quad (23)$$

$$= \sum_{i=1}^m a_{AB}^s(i)(X_B^s)^i = a_{AB}^s(1)(X_B^s)^1 + a_{AB}^s(2)(X_B^s)^2 \\ + a_{AB}^s(3)(X_B^s)^3 + \dots,$$

$$F_{AB}^s(X_B^s) = \frac{T_A R}{\Delta H_A^{l \rightarrow s}} f_{AB}^s(X_B^s). \quad (24)$$

Végül

$$T_s(X_B^s) = T_A \left[F_{AB}^s(X_B^s) + 1 \right]^{-1}, \quad (25)$$

ahol

$$F_{AB}^s(X_B^s) = \sum_{i=1}^m A_{AB}^s(X_B^s)^i = A_{AB}^s(1)(X_B^s)^1 \\ + A_{AB}^s(2)(X_B^s)^2 + A_{AB}^s(3)(X_B^s)^3 + \dots \quad (26)$$

4. Megoszlási hányados (k)

4.1. A megoszlási hányados az olvadáskor koncentráció függvényében

A (2) és (3) egyenletek alapján

$$G_B^s - G_B^l = \Delta G_B^{l \rightarrow s} = RT_L \ln(X_B^l/X_B^s) \\ = RT_L \ln(1/k_B) = -RT_L \ln(k_B), \quad (27)$$

$$\Delta G_B^{l \rightarrow s} = \Delta H_B^{l \rightarrow s} (T_B - T_L(X_B^l))/T_B \\ = RT_L(X_B^l) \ln k_B, \quad (28)$$

$$\ln k_B = \Delta H_B^{l \rightarrow s} (T_B - T_L(X_B^l)) / RT_B T_L(X_B^l). \quad (29)$$

Felhasználva a (16) egyenletet

$$\ln k_B (X_B^l) = (\Delta H_B^{l \rightarrow s} / R) \\ \times \left\{ 1/T_B - \left[1 + F_{AB}^l(X_B^l) \right] / T_A \right\}. \quad (30)$$

Ha $X_B^l = X_B^s = 0$, akkor $F_{AB}^l = 0$,

$$\ln k_{B,0} = (\Delta H_B^{l \rightarrow s} / R) (1/T_B - 1/T_A) = Q, \quad (31) \\ \text{ahol } k_{B,0} = \exp(Q).$$

Ha $X_B^l = X_B^s = 1$, akkor

$$T_A / (1 + F_{AB}^l) = T_A / (1 + F_{AB}^s) = T_B,$$

$$\ln k_B = (\Delta H_B^{l \rightarrow s} / R) (1/T_B - 1/T_B) = 0, \quad (32) \\ \text{és } k_B(X_B = 1) = \exp(0) = 1.$$

Ha $0 < X_B^l < 1$

i) ideális oldat estében, amikor T_B ismert (izomorf módszer)

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^l) &= (\Delta H_B^{l \rightarrow s}/R) \\ &\times \left[(1/T_A - 1/T_B) + F_{AB}^l(X_B^l)/T_A \right] \\ &= \ln k_{B,0} + F_{AB}^l(X_B^l). \end{aligned} \quad (33)$$

Így

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^l) &= \ln k_{B,0} + A_{AB}^l(1)(X_B^l)^1 + A_{AB}^l(2)(X_B^l)^2 \\ &\quad + A_{AB}^l(3)(X_B^l)^3 + \dots \\ &= \ln k_{B,0} + \sum_{i=1}^m A_{AB}^l(i)(X_B^l)^i. \end{aligned} \quad (34)$$

ii) reális (reguláris) oldatok esetében (izomorf, eutektikus, peritektikus rendszerek), amikor a szilárd oldatra vonatkozó nem egyensúlyi T_B nem ismert:

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^l) &= B_{AB}^l(0) + B_{AB}^l(1)(X_B^l) \\ &\quad + B_{AB}^l(2)(X_B^l)^2 + B_{AB}^l(3)(X_B^l)^3 + \dots \\ &\quad + \sum_{i=1}^m B_{AB}^l(i)(X_B^l)^i \end{aligned} \quad (35)$$

ahol $B_{AB}^l(i) \neq A_{AB}^l(i)$, mert a (27) egyenlet nem használható a reguláris oldatok esetében.

4.2 A megoszlási hányados a szilárd fázis koncentrációjának a függvényében

A (22) egyenlet alapján

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^s) &= (\Delta H_B^{l \rightarrow s}/R)[1/T_B - (1 + F_{AB}^s)/T_A] \\ &= \ln k_{B,0} + F_{AB}^s(X_B^s) \end{aligned} \quad (36)$$

i) ideális oldat esetében, amikor T_B ismert (izomorf rendszer):

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^s) &= \ln k_{AB}^{B,0} + A_{AB}^s(1)(X_B^s)^1 + A_{AB}^s(2)(X_B^s)^2 \\ &\quad + A_{AB}^s(3)(X_B^s)^3 + \dots \\ &= \ln k_{B,0} + \sum_{i=1}^m A_{AB}^s(i)(X_B^s)^i. \end{aligned} \quad (37)$$

ii) reális (reguláris) oldatok (izomorf, eutektikus, peritektikus rendszerek), amikor a szilárd oldatra vonatkozó nem egyensúlyi T_B nem ismert:

$$\begin{aligned} \ln k_B(X_B^s) &= B_{AB}^s(0) + B_{AB}^s(1)(X_B^s)^1 \\ &\quad + B_{AB}^s(2)(X_B^s)^2 + B_{AB}^s(3)(X_B^s)^3 + \dots \\ &= \sum_{i=0}^m B_{AB}^s(i)(X_B^s)^i, \end{aligned} \quad (38)$$

és ismét $B_{AB}^s(i) \neq A_{AB}^s(i)$.

Ha $T_B < T_A$, akkor $k_{AB}^B < 1$, és ha $T_B > T_A$, akkor $k_{AB}^B > 1$.

Megemlítjük, hogy ha a $k_A(T)$ és $k_B(T)$ függvények ismertek, akkor az olvadék és a szilárd fázis koncentrációja a hőmérséklet függvényében kiszámítható:

$$\begin{aligned} X_A^l(T) &= (k_B(T) - 1)/(k_B(T)k_A(T)) \\ \text{és } X_A^s(T) &= k_A(T)X_A^l. \end{aligned} \quad (39)$$

5. A likvidusz meredekségének kiszámítása

A legtöbb kristályosodási modell tartalmazza a likvidusz lejtését. A lejtés (M_B) a $T_L(X_B^l)$ függvény deriváltjaként számítható:

$$M_B(X_B^l) = \frac{\partial T_L}{\partial X_B^l} = \frac{-T_A \frac{\partial(1 + F_{AB}^l(X_B^l))}{\partial X_B^l}}{(1 + F_{AB}^l(X_B^l))^2}, \quad (40)$$

ahol

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1 + F_{AB}^l(X_B^l))}{\partial X_B^l} &= \sum_{i=1}^m i A_{AB}^l(i)(X_B^l)^{i-1} \\ &= 1 A_{AB}^l(1)(X_B^l)^0 + 2 A_{AB}^l(2)(X_B^l)^1 \\ &\quad + 3 A_{AB}^l(3)(X_B^l)^2 + \dots \end{aligned} \quad (41)$$

6. Az állandók kiszámításának módszerei

A reguláris oldatok esetén a likvidusz és szolidusz, valamint a megoszlási hányados függvények állandói a likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletek mért adataiból, vagy a grafikus fázisdiagram digitalizált adataiból, valamint bármely CALPHAD típusú számítással (pl. ThermoCalc) számított adathalmaz felhasználásával kiszámíthatók.

6.1. A likvidusz és a szolidusz állandói kiszámításának lépései

i) A $(T_L(X_B^l), T_L(X_B^s))$ likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet meghatározása sok koncentrációhoz tartozó mért adatból, a digitalizált grafikus fázisdiagramból vagy CALPHAD számításból.

ii) Az $F_{AB}^l(X_B^l)$ és $F_{AB}^s(X_B^s)$ adatok kiszámítása adott koncentrációknál az (16) és (25) egyenletekkel:

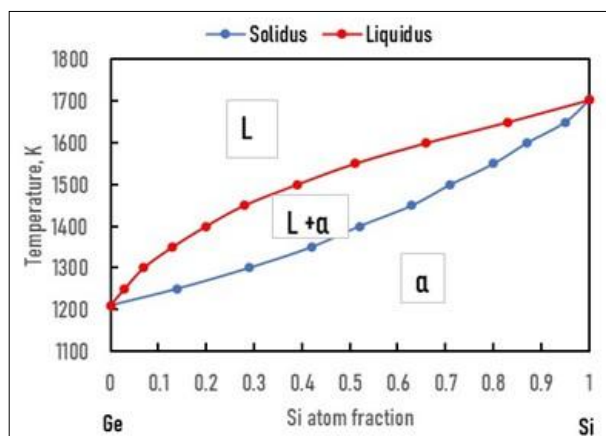
$$\begin{aligned} F_A B^l(X_B^l) &= T_A/T_L(X_B^l) - 1 \\ \text{és } F_A B^s(X_B^s) &= T_A/T_S(X_B^s) - 1. \end{aligned} \quad (42)$$

iii) Az $A_{AB}^l(i)$ és $A_{AB}^s(i)$ állandók kiszámítása regresszióval az $F_{AB}^l(X_B^l)$ és $F_{AB}^s(X_B^s)$ egyenletek által számított adatok felhasználásával.

6.2. A megoszlási hányados állandóinak kiszámítása

Három különböző módszer létezik:

- 1) Feltételezve, hogy az olvadék és a szilárd oldat ideális, és a rendszer izomorf az adatok kiszámíthatók a (34) egyenlettel.
- 2) Reális (reguláris) oldatok esetén. Ha az olvadék és a szilárd fázisok egyensúlyi koncentrációja sok adott hőmérsékleten ismert grafikus egyensúlyi fázisdiagramból vagy a CALPHAD típusú adatokból van meghatározva, akkor ez egyszerű:
 - i) $\ln k_B(X_B^l) = \ln(X_B^s/X_B^l)$ és $\ln k_B(X_B^s) = \ln(X_B^s/X_B^l)$.
 - ii) Ezen adatok felhasználásával a $B_{AB}^l(i)$ és $B_{AB}^s(i)$ állandók regresszióval számíthatók ki.
- 3) A mért adatok esetében, amikor csak az adott koncentrációhoz tartozó likvidusz- és a szolidusz-hőmérsékletek ismertek kísérletekből, az eljárás egy kicsit bonyolultabb, mert az egymással egyensúlyt tartó olvadék és szilárd fázisok koncentrációi egy adott hőmérsékleten nem ismertek. Ez esetben az eljárás a következő:



1. ábra. A mért (digitalizált) Ge–Si egyensúlyi fázisdiagram [17]. A digitalizált hőmérsékletek a piros (likvidusz) és a kék (szolidusz) pontok

1. táblázat. A 11 megadott hőmérsékleten a digitalizálással meghatározott likvidusz- és a szolidusz-koncentrációk, a számított megoszlási (k) hányados és a $T_A/T_L - 1$ függvények adatai (a koncentráció (X) atomfrakció)

$T_L, ^\circ\text{C}$	T_L, K	X_{Si}^l	X_{Si}^s	k_{SiGe}^s	$\ln k_{\text{SiGe}}^s$	X_{Ge}^l	X_{Ge}^s	k_{GeSi}^l	$\ln k_{\text{GeSi}}^l$	$T_{\text{Ge}}/T_L - 1$	$T_{\text{Si}}/T_L - 1$
938	1211	0	0	–	–	1	1	1	0	0	0,40
977	1250	0,03	0,14	4,66	1,54	0,97	0,86	0,88	–0,12	–0,03	0,36
1027	1300	0,07	0,29	4,14	1,42	0,93	0,71	0,76	–0,26	–0,06	0,31
1077	1350	0,13	0,42	3,23	1,17	0,87	0,58	0,66	–0,40	–0,10	0,26
1127	1400	0,20	0,52	2,60	0,95	0,8	0,48	0,60	–0,51	–0,13	0,21
1177	1450	0,28	0,63	2,25	0,81	0,72	0,37	0,51	–0,66	–0,16	0,17
1227	1500	0,39	0,71	1,82	0,59	0,61	0,29	0,47	–0,74	–0,19	0,13
1277	1550	0,51	0,8	1,56	0,45	0,49	0,20	0,40	–0,89	–0,21	0,09
1327	1600	0,66	0,87	1,31	0,27	0,34	0,13	0,38	–0,96	–0,24	0,06
1377	1650	0,83	0,95	1,14	0,13	0,17	0,05	0,29	–1,22	–0,26	0,03
1414	1687	1	1	1	0	0	0	–	–	–0,28	0

- i) A $T_L(X_B^l)$ és $T_s(X_B^s)$ függvények meghatározása a mért adatokból.
- ii) Számos koncentrációnál a $T_L(X_B^l)$ függvény segítségével a likvidusz-hőmérséklet kiszámítása,
- iii) Az X_B^s értékeknek a $T_s(X_B^s)$ függvény iterációjával történő meghatározása (feltétel: $T_L = T_s$).
- iv) Az összetartozó X_B^l és X_B^s értékekből az $\ln k_B(X_B^l) = \ln(X_B^s/X_B^l)$ és $\ln k_B(X_B^s) = \ln(X_B^s/X_B^l)$ adatok kiszámítása.
- v) Ezen adatok felhasználásával az $\ln k_B(X_B^l)$ és $\ln k_B(X_B^s)$ függvények állandóinak regresszióval való kiszámítása.

7. 1. példa: Binér izomorf rendszer, korlátlan oldhatóság az olvadék és a szilárd fázisban

7.1. A Ge–Si egyensúlyi fázisdiagram

Számos binér rendszer tartozik ebbe az ötvözet-csoportba, mint például a Cu–Ni, Au–Cu, Pd–Pt, Fe–Mn és még sok más. Stöhr és Klemm [17] és Thurmond [18] a Ge–Si rendszert termikus analízis módszerrel tanulmányozták. A mért likviduszt és szoliduszt az 1. ábra mutatja, melyet az ESTPAD módszer alkalmazásának bemutatására használunk. A grafikus Ge–Si fázisdiagramot digitalizáltuk, 11 hőmérsékleten meghatározva a likvidusz és a szolidusz koncentrációját (1. táblázat).

7.2. Az F_{AB}^l és F_{AB}^s függvények számítása

A számítást a tiszta Ge-től ($T_A = T_{\text{Ge}}$) vagy a tiszta Si-től ($T_A = T_{\text{Si}}$) lehet kezdeni. Első lépésként az

$$F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l) = \frac{T_{\text{Ge}}}{T_L} - 1, \quad F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s) = \frac{T_{\text{Ge}}}{T_s} - 1,$$

$$F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l) = \frac{T_{\text{Si}}}{T_L} - 1, \quad F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s) = \frac{T_{\text{Si}}}{T_s} - 1$$

értékeket számítottuk ki 11 hőmérsékleten (lásd az 1. táblázatot). Mivel a hőmérséklet a likvidusz és a szolidusz esetében azonos,

$$F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l) = F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s) \text{ és } F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l) = F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s),$$

de természetesen a likvidusz és a szolidusz koncentrációja eltérő. Természetesen az F_l és F_s függvények $A(i)$, $A_s(i)$ paraméterei is különböznek. A 2a. és 3a. ábrán az

$$F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l), F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s) \text{ és az } F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l), F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$$

függvények láthatók a likvidusz (piros körök) és a szolidusz (kék körök) a Ge és Si koncentrációjának

(atomfrakció) függvényében. Ezekből az adatokból az

$$F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l), F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s), F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l), F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$$

függvényeket multilineáris regresszióval számítottuk ki a likvidusz és a szolidusz esetében. A számított állandók a 2. táblázatban találhatók. Ezen állandók felhasználásával összehasonlítjuk a számított likvidusz- (piros körök) és szolidusz- (kék körök) hőmérsékleteket a mért likvidusz- (piros szaggatott vonal) és szolidusz- (kék szaggatott vonal) hőmérsékletekkel (2b. és 3b. ábra). A mért és a számított hőmérséklet közötti különbség kisebb, mint $\pm 4\text{K}$.

7.3. A likvidusz meredekségének számítása

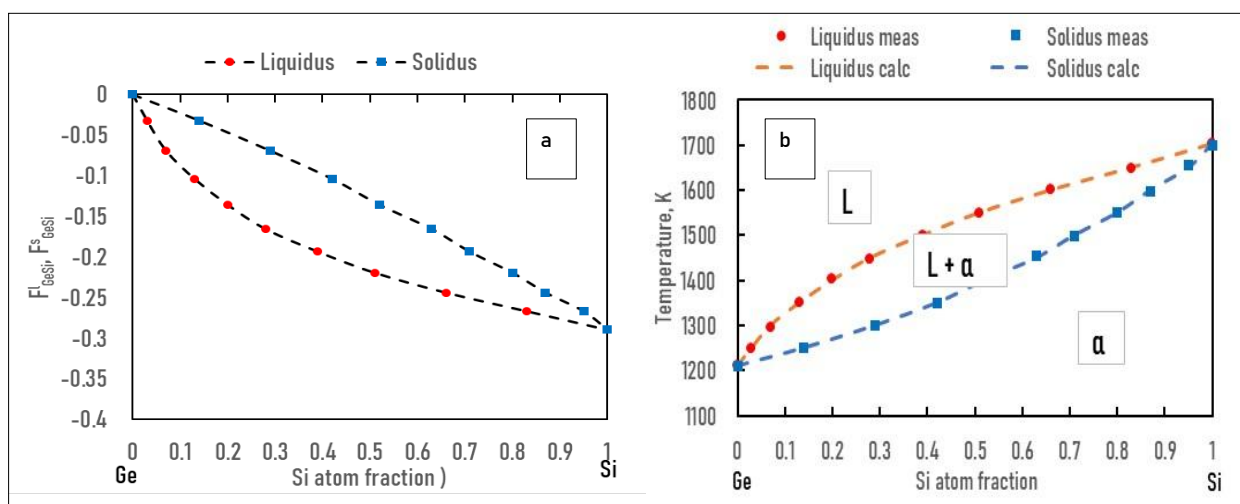
A likvidusz meredeksége (M_B) a (40) egyenlettel számítható ki. A (41) egyenlettel számított állandói a

2. táblázat. Az $F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l)$, $F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s)$, $F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l)$ és $F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$ függvények állandói

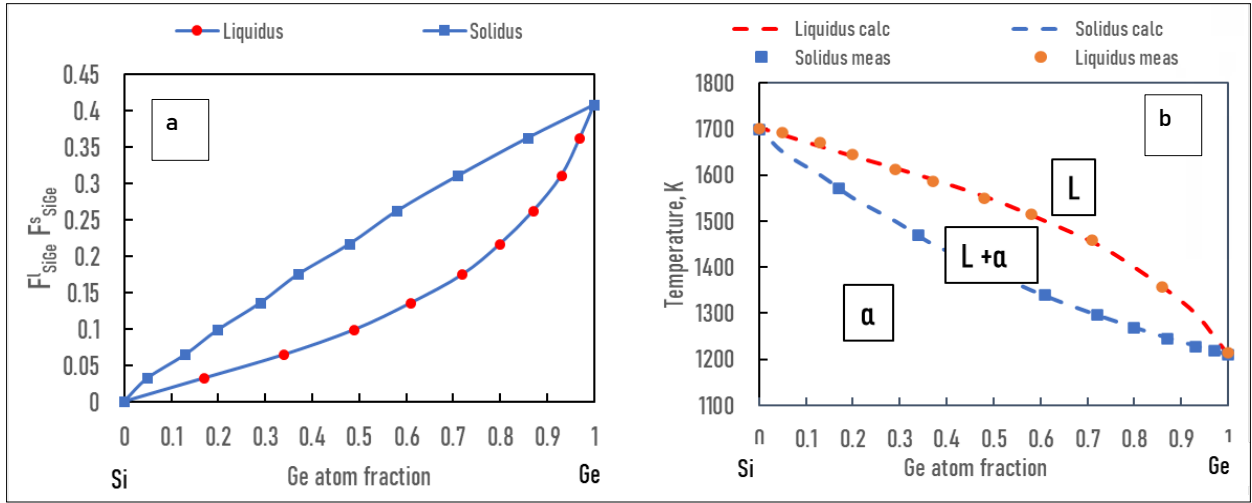
Ge-Si ötvözet	$(X_{\text{Si}})^1$	$(X_{\text{Si}})^2$	$(X_{\text{Si}})^3$	$(X_{\text{Si}})^4$	R^2
$F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l)$	-1,0302	2,088	-2,2043	0,8576	0,9997
$F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s)$	-0,2009	-0,1724	0,1572	-0,0715	0,9991
Si-Ge ötvözet	$(X_{\text{Ge}})^1$	$(X_{\text{Ge}})^2$	$(X_{\text{Ge}})^3$	$(X_{\text{Ge}})^4$	R^2
$F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l)$	0,0851	0,6936	-1,4126	1,0362	0,9992
$F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$	0,54	-0,3016	0,3421	-0,1738	0,9997

3. táblázat. A $\partial(1 + F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l))/\partial X_{\text{Si}}^l$ és $\partial(1 + F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l))/\partial X_{\text{Ge}}^l$ függvények állandói

Ge-Si ötvözet	$(X_{\text{Si}})^0$	$(X_{\text{Si}})^1$	$(X_{\text{Si}})^2$	$(X_{\text{Si}})^3$
$\partial(1 + F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l))/\partial X_{\text{Si}}^l$	-1,0302	$2 \times 2,088$	$-3 \times 2,2043$	$4 \times 0,8576$
Si-Ge ötvözet	$(X_{\text{Ge}})^0$	$(X_{\text{Ge}})^1$	$(X_{\text{Ge}})^2$	$(X_{\text{Ge}})^3$
$\partial(1 + F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l))/\partial X_{\text{Ge}}^l$	0,0851	$2 \times 0,6936$	$-3 \times 1,4126$	$4 \times 1,0362$

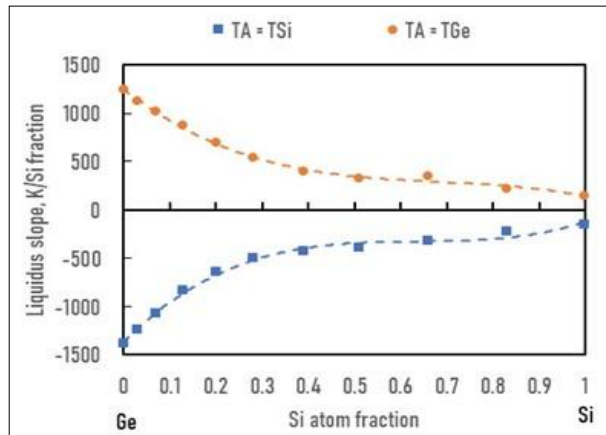


2. ábra. (a) Az F_{SiGe}^l (piros körök) és F_{SiGe}^s (kék négyzet) adatok a digitalizált adatokból számítva 11 hőmérsékleten, és a számított $F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l)$ (piros szaggatott vonal) és $F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$ (kék pontozott vonal) függvények a Si-koncentráció függvényében. (b) A mért (digitalizált) likvidusz (piros körök) és szolidusz (kék körök) összehasonlítása a számított likvidusz- (piros szaggatott vonal) és szolidusz- (kék szaggatott vonal) hőmérsékletekkel

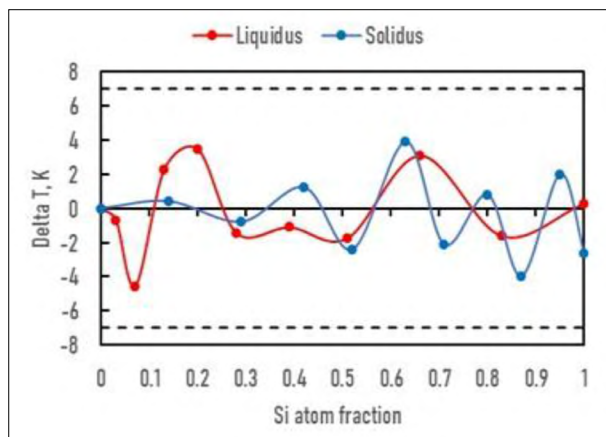


3. ábra. (a) Az F_{SiGe}^l (piros körök) és F_{SiGe}^s (kék négyzet) adatok a digitalizált adatokból számítva 11 hőmérsékleten, valamint számított $F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l)$ (piros szaggatott vonal) és $F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$ (kék szaggatott vonal) függvények a Ge-koncentráció függvényében. (b) A mért (digitalizált) likvidusz (piros körök) és a szolidusz (kék négyzet) hőmérsékletének összehasonlítása a számított likvidusz- (piros szaggatott vonal) és szolidusz- (kék szaggatott vonal) hőmérsékletekkel

$\partial(1 + F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l))/\partial X_{\text{Si}}^l$ és $\partial(1 + F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l))/\partial X_{\text{Ge}}^l$ függvényeknek a 3. táblázatban találhatók. A $T_A = T_{\text{Ge}}$ -től indulva a B elem a Si, és a meredekség pozitív; a $T_A = T_{\text{Si}}$ -től kezdve a meredekség negatív, de ezek az



4. ábra. A likvidusz meredeksége két irányból számítva, Ge-től Si-ig és Si-től Ge-ig



5. ábra. A mért és a számított T_L és T_S közötti különbség

abszolút értékek gyakorlatilag azonosak (4. ábra). A Ge–Si grafikus fázisdiagram digitalizálásánál a hiba körülbelül $\pm 0,01$ atom frakció volt. Mivel az átlagos meredekség ± 700 K/atomfrakció, a 0,01 atomfrakció hiba körülbelül $(700 \times 0,01) \pm 7$ K különbséget okoz. Az 5. ábra a digitalizált és a számított hőmérséklet közötti különbséget mutatja a Si-atom frakció függvényében. Látható, hogy a hőmérséklet-különbség kisebb, mint ± 7 K.

7.4. Az ideális $\ln k_{\text{Ge}}$ és $\ln k_{\text{Si}}$ függvények állandóinak kiszámítása Ge és Si kristályosodásának látens hőjéből

Amint korábban bemutattuk, az $\ln k$ a Ge vagy Si látens hőjéből a (32) és (36) egyenlettel számítható ki feltételezve, hogy az olvadék és szilárd fázis ideális oldat. Ebben az esetben a különböző ideális $\ln k$:

$$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l) = \ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge},0} + F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l), \quad (43)$$

$$k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l) = \exp\{\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)\},$$

$$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s) = \ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge},0} + F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s), \quad (44)$$

$$k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s) = \exp\{\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)\},$$

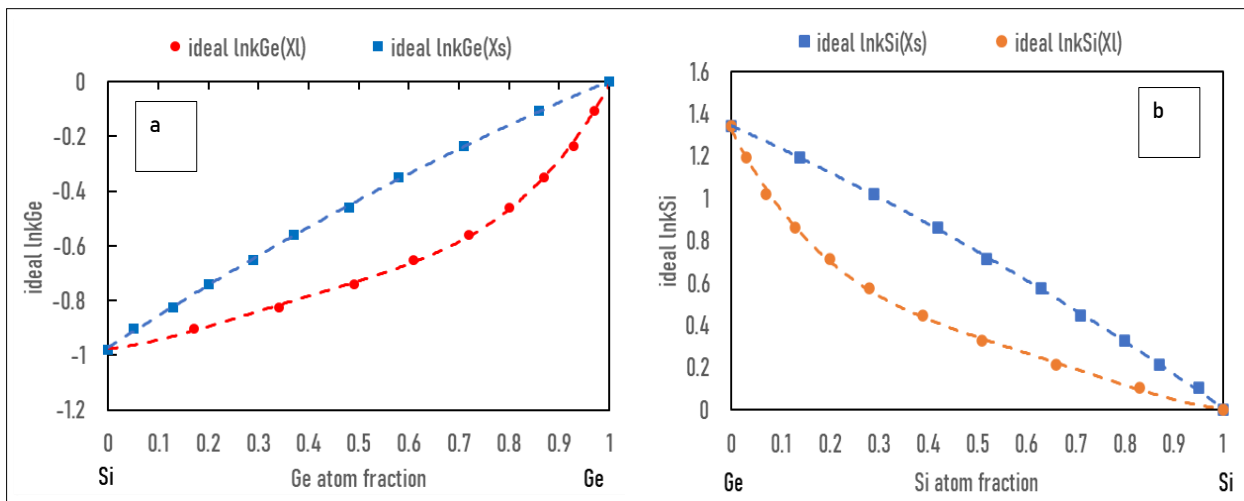
$$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l) = \ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si},0} + F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l), \quad (45)$$

$$k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l) = \exp\{\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)\},$$

$$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s) = \ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si},0} + F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s), \quad (46)$$

$$k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s) = \exp\{\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)\}.$$

Az ideális $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$ és $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$ a Ge-, az ideális $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$ és $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$ a Si-atom frakciója függvényében 6a. és 6b. ábrán látható.



6. ábra. (a) az ideális $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$ és $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$ a Ge-atom frakció függvényében, (b) az ideális $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$ és $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$ a Si-atom frakció függvényében

Az olvadáspont (T_A), megszilárdulási hő ($\Delta H_B^{l \rightarrow s}$) és a $\ln k_{AB}^{B,0}$ számított értékei a 4. táblázatban találhatók.

4. táblázat. A tiszta Ge és Si fizikai állandói, valamint a számított $\ln k_{AB}^{B,0}$

B elem	$\Delta H_B^{l \rightarrow s}$, kJ/mol	T_L , K	$\ln k_{AB}^{B,0}$
Ge [19]	36,94	1211	-0,9763
Si [20]	50,21	1687	1,3244

Az 5. táblázat ezeknek a függvényeknek az állandóit és az $X_{\text{Si}} = 0$ ($X_{\text{Ge}} = 1$) és $X_{\text{Si}} = 1$ ($X_{\text{Ge}} = 0$) függvények értékeit mutatja.

A $k_{\text{Ge}}(T)$ és $k_{\text{Si}}(T)$ függvények számíthatók az $F_{\text{SiGe}}^l(X_{\text{Ge}}^l)$, $F_{\text{SiGe}}^s(X_{\text{Ge}}^s)$ és $F_{\text{GeSi}}^l(X_{\text{Si}}^l)$, $F_{\text{GeSi}}^s(X_{\text{Si}}^s)$ függvények ismeretében

A $k_{\text{Ge}}(T)$ és $k_{\text{Si}}(T)$ függvényekkel számított $X_{\text{Ge}}^l(T)$ és $X_{\text{Ge}}^s(T)$:

$$\begin{aligned} X_{\text{Ge}}^l(T) &= (k_{\text{Ge}}(T) - 1) / (k_{\text{Ge}}(T) - k_{\text{Si}}(T)), \\ X_{\text{Ge}}^s(T) &= k_{\text{Ge}}(T) X_{\text{A}}^l(T). \end{aligned} \quad (47)$$

Felhasználva a $k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$ és $k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$ függvényeket az ideális szoliduszkoncentrációt, a mért likviduszkoncentrációkból, valamint használva a $k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$ és $k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$ függvényeket, az ideális lik-

viduszkoncentrációk a mért szoliduszkoncentrációkból számítottuk (7a-b. ábra) [18].

$$\begin{aligned} X_{\text{Ge}}^s(\text{ideal}) &= X_{\text{Ge}}^l(\text{meas.}) \cdot k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l), \\ X_{\text{Ge}}^l(\text{ideal}) &= X_{\text{Ge}}^s(\text{meas.}) / k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s), \\ X_{\text{Si}}^s(\text{ideal}) &= X_{\text{Si}}^l(\text{meas.}) \cdot k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l), \\ X_{\text{Si}}^l(\text{ideal}) &= X_{\text{Si}}^s(\text{meas.}) / k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s). \end{aligned} \quad (48)$$

A mért és a számított (ideális) fázisdiagramokat összehasonlítva látható, hogy a mért és a számított likvidusz és szolidusz nem azonos. Tehát a Ge-Si rendszer nem ideális. Ezt a különbséget megmagyarázhatja, hogy az $\ln k$ függvények levezetésénél egy egyszerű szabadenergia-függvényt használtunk, amely csak ideális oldatok esetén érvényes.

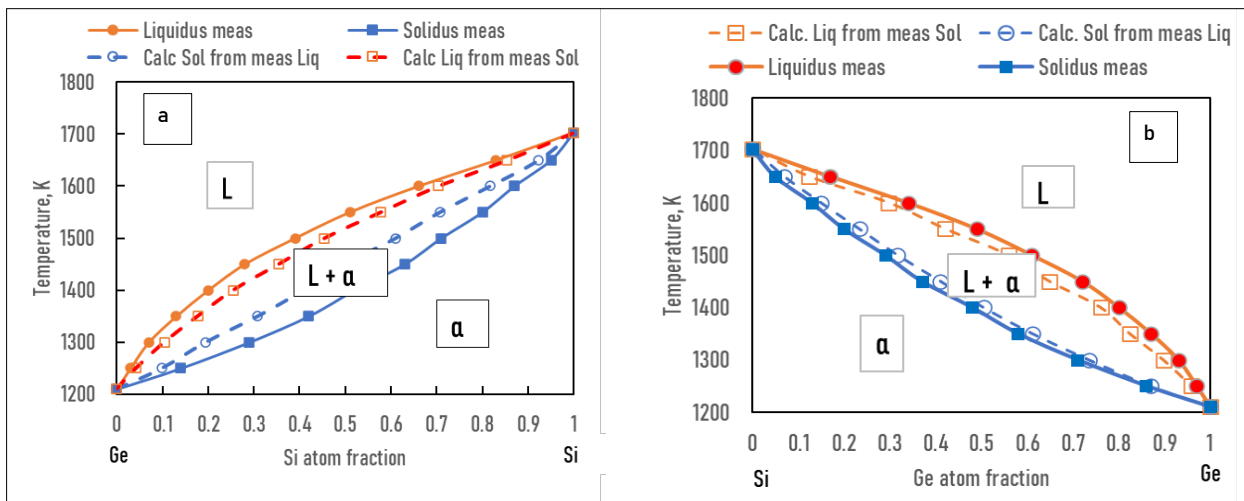
7.5. Az $\ln k_{\text{Ge}}$ és $\ln k_{\text{Si}}$ függvények állandóinak kiszámítása a mért adatokból

Ebben az esetben, a likvidusz és a szolidusz koncentrációit a grafikus egyensúlyi fázisdiagramból határoztuk meg 11 hőmérsékleten, a k_{Ge} és a k_{Si} könnyen kiszámítható:

$$\begin{aligned} \ln k_{\text{Ge}} &= X_{\text{Ge}}^s(T) / X_{\text{Ge}}^l(T), \\ \ln k_{\text{Si}} &= X_{\text{Si}}^s(T) / X_{\text{Si}}^l(T). \end{aligned} \quad (49)$$

5. táblázat. Az ideális $\ln k$ függvények állandói

Si-Ge ötvözet	X^0	X^1	X^2	X^3	X^4	R^2
$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$	1,3244	-4,5446	8,8304	-9,0623	3,4554	0,9992
$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$	1,3244	-1,0446	-0,2883	-	-	0,9997
Ge-Si ötvözet	X^0	X^1	X^2	X^3	X^4	R^2
$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$	-0,9763	0,1817	1,7338	-3,473	2,5215	0,9992
$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$	-0,9763	1,1845	-0,2104	-	-	0,9997



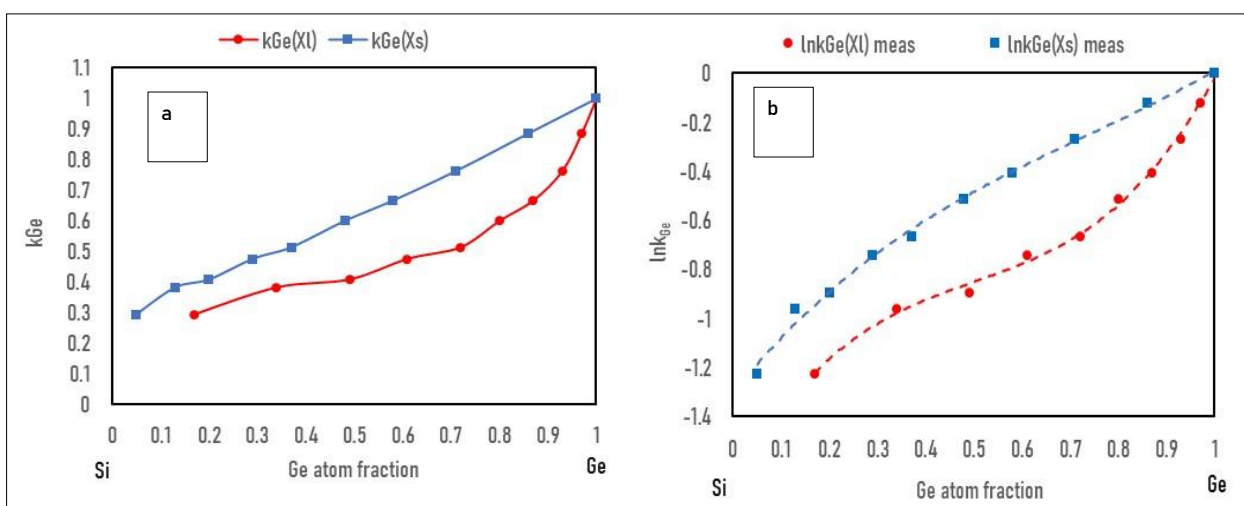
7. ábra. A mért (digitalizált) és a számított ideális fázisdiagram összehasonlítása. (a) Ge–Si, (b) Si–Ge fázisdiagram

A mért k_{Ge} , k_{Si} és az $\ln k_{\text{Ge}}$, $\ln k_{\text{Si}}$ adatok az 1. táblázatban láthatók. Ezen adatok alapján multilineáris regresszióval számítottuk ki az $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$,

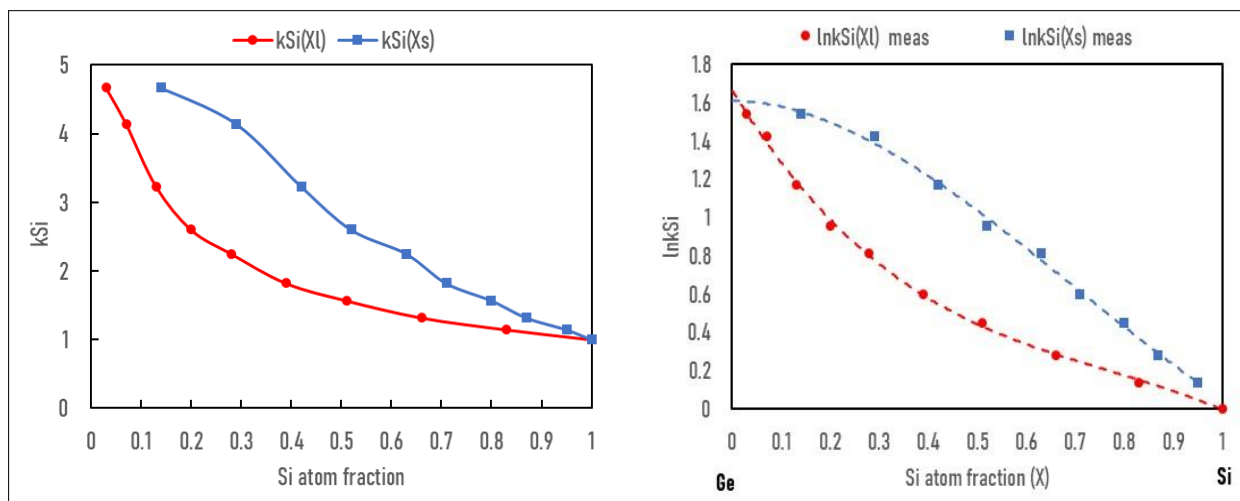
$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$ és a $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$, $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$ függvényeket (8. és 9. ábra). Ezeknek a függvényeknek a számított állandói a 4. táblázatban találhatók.

6. táblázat. A $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$, $\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$, $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$ és $\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$, valamint a $k_{\text{Ge}}(T)$, $k_{\text{Si}}(T)$ függvények állandói

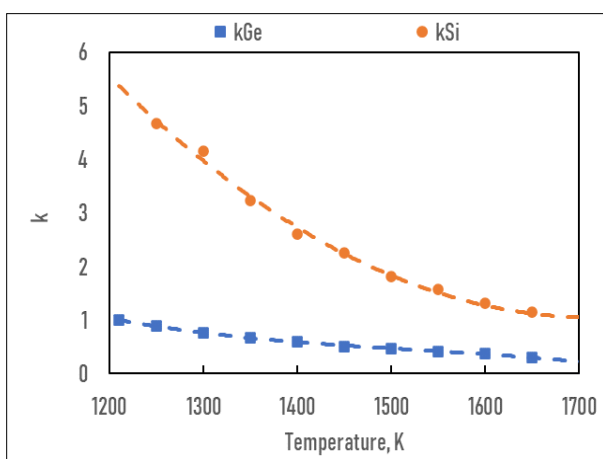
Si–Ge ötvözet	X^0	X^1	X^2	X^3	R^2
$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^l)$	–1,5389	2,1953	–3,0041	2,3145	0,9940
$\ln k_{\text{SiGe}}^{\text{Ge}}(X_{\text{Ge}}^s)$	–1,3026	2,4257	–2,0343	0,9219	0,9969
Ge–Si ötvözet	X^0	X^1	X^2	X^3	R^2
$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$	1,6650	–4,1961	4,4708	–1,9468	0,9988
$\ln k_{\text{GeSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$	1,6411	–0,3214	–2,2471	0,9439	0,9977
	T^0	T^1	T^2	T^3	R^2
$k_{\text{Ge}}(T)$	27,4598	–0,0509	$3,3 \times 10^{-5}$	–	0,9983
$k_{\text{Si}}(T)$	51,0357	–0,0583	$1,7 \times 10^{-5}$	–	0,9959



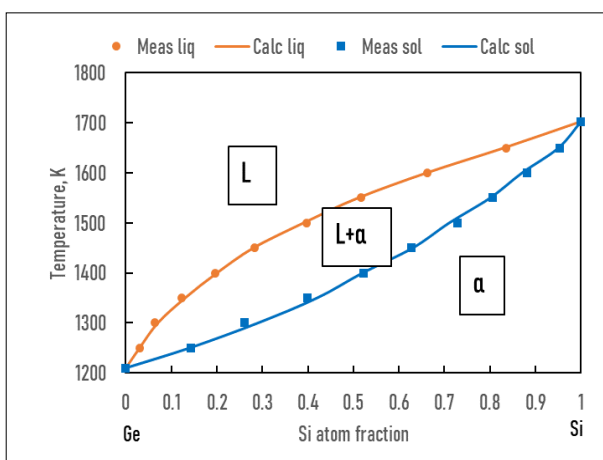
8. ábra. (a) Mért k_{Ge} (piros körök és vonal) X_{Ge}^l és $k_{\text{Ge}}(X_s)$ (kék négyzetek és vonal) X_{Ge}^s függvényében, (b) a $\ln k_{\text{Ge}}$ (piros körök és szaggatott vonal) X_{Ge}^l és (kék négyzetek és szaggatott vonal) X_{Ge}^s függvényében



9. ábra. (a) mért k_{Si} (piros körök és vonal) X_{Si}^l és $k_{Si}(X^s)$ (kék négyzetek és vonal) X_{Si}^s függvényében, (b) a $\ln k_{Si}$ (piros körök és szaggatott vonal) X_{Si}^l és (kék négyzetek és szaggatott vonal) X_{Si}^s függvényében



10 ábra. k_{Ge} és k_{Si} függvények a hőmérséklet függvényében



11. ábra. A mért likvidusz (piros körök) összehasonlítása a mért szoliduskoncentrációból (piros vonal) számított likvidusszal, és a mért szolidusz (kék négyzetek) összehasonlítása a mért likviduszkoncentrációból számított szolidusszal (kék vonal)

Az ötvözet kristályosodásának szimulációja során néha szükség van a megoszlási együtthatók ismeretére a hőmérséklet függvényében (4. táblázat és 10. ábra).

Az ideális esethez hasonlóan a $k_{SiGe}^{Ge}(X_{Si}^l)$ és $k_{GeSi}^{Si}(X_{Si}^l)$ függvényekkel a szoliduszkoncentrációt a mért likviduszkoncentrációból, a $k_{SiGe}^{Ge}(X_{Si}^s)$ és $k_{GeSi}^{Si}(X_{Si}^s)$ függvényekkel a likviduszkoncentrációkat a mért szoliduszkoncentrációból számítottuk ki (11. ábra).

A mért fázisdiagramhoz és a számított likvidusz- és szolidusértékhez képest a különbség elhanyagolható, így a függvények helyesek.

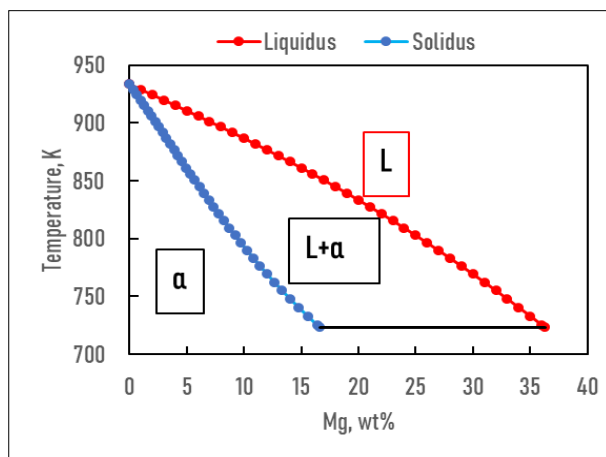
8. 2. példa: Eutektikus típusú binér ötvözetek

Az ötvözetek jelentős része eutektikus vagy peritektikus típusú (Al–Cu, Al–Mg, Mg–Al, Al–Si, Al–Mn, Al–Fe, Pb–Sn, Cu–Sn, Cu–Al, Cu–Zn, Fe–C stb.). Ezeknek az ötvözeteknek a tiszta elemtől az eutektikus vagy peritektikus koncentrációig az első megszilárdult fázis egy α szilárd oldat, korlátozott oldhatósággal. Ebben a fejezetben bemutatjuk az ESTPHAD rendszer képességeit Al–Mg és Al–Si binér ötvözetrendszerek esetében.

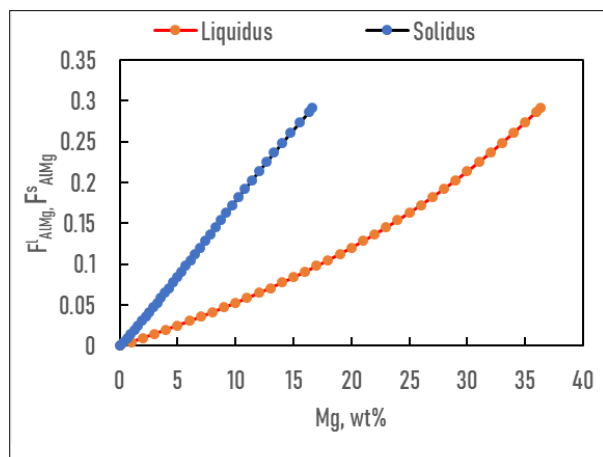
A likvidusz és szolidusz adatait ($T_L(X)$, $T_S(X)$) a THERMOCALC, (TC) segítségével számítottuk ki (Al–Mg ötvözet, 12. ábra, Al–Si ötvözet, 19. ábra).

Ezekben az esetekben a T_A hőmérséklet az Al olvadáspontja (660,32 °C, 933,47 K), a B elem pedig a Mg vagy Si. Mivel a likvidusz és a szolidusz nem éri el a tiszta B elemet, lehetetlen kiszámítani az $\ln \frac{Mg,0}{AlMg}$ és $\ln k_{AlSi}^{Si,0}$ értékeket ((31) egyenlet).

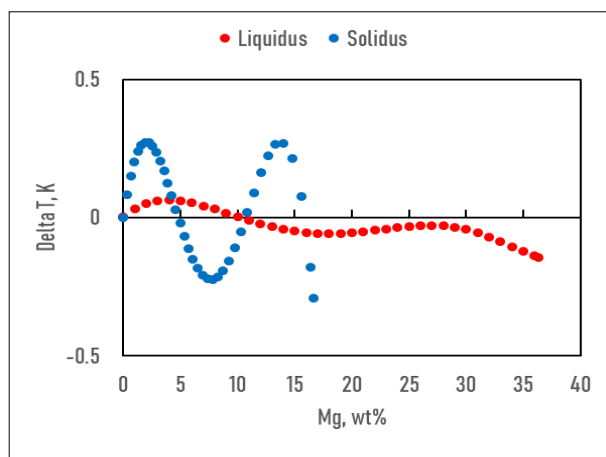
Az $F_{AlMg}^{Al}(X_{Mg}^l)$, $F_{AlMg}^{Al}(X_{Mg}^s)$ és $F_{AlSi}^{Al}(X_{Si}^l)$, $F_{AlSi}^{Al}(X_{Si}^s)$ függvények kiszámítása a 6.1. pontban leírt módszerrel történt. Ezeket a függvényeket a 13. ábra (Al–Mg ötvözet) és a 20. ábra (Al–Si ötvözet) mutatja, míg a számított állandók a 7. táblázatban találhatók. A



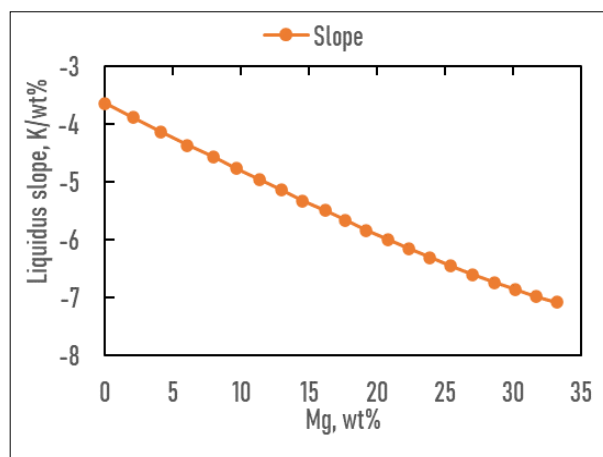
12. ábra. Az Al-Mg fázisdiagram része (0 és 36,3 tömeg% Mg között). A piros és a kék körök a TC-vel számított likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletek, a piros és kék vonalak a (16) és (22) egyenlettel számolt likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletet mutatják



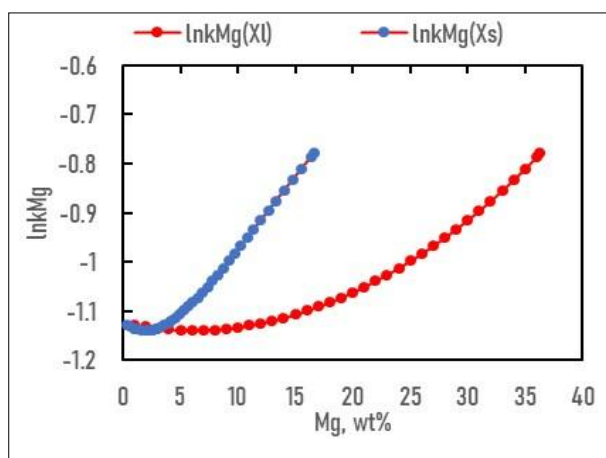
13. ábra. Az $F_{AlMg}^L(X_{Mg}^L)$ és az $F_{AlMg}^S(X_{Mg}^S)$ függvények a Mg-koncentráció függvényében. A piros és kék körök a TC-adatokból a (42) egyenlettel számított értékeket mutatják, a piros és kék vonalak pedig a (15) és (24) egyenlettel számított értékeket



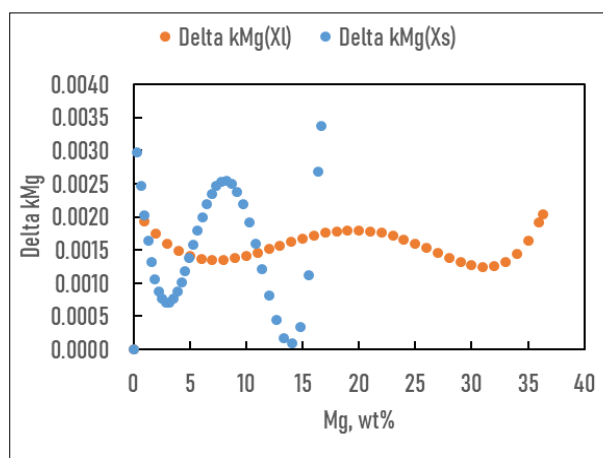
14. ábra. A hőmérséklet-számítás pontossága a Mg-koncentráció függvényében



15. ábra. A likvidusz meredeksége a Mg-koncentráció függvényében a (40) egyenlettel számolva



16. ábra. Az $\ln k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^L)$ és $\ln k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^S)$ a Mg-koncentráció függvényében. A piros és kék köröket a TC adataiból, a piros és kék vonalak pedig a (35) és (38) egyenlettel számítottuk ki



17. ábra. A k_{AlMg}^{Mg} számítás pontossága a Mg-koncentráció függvényében

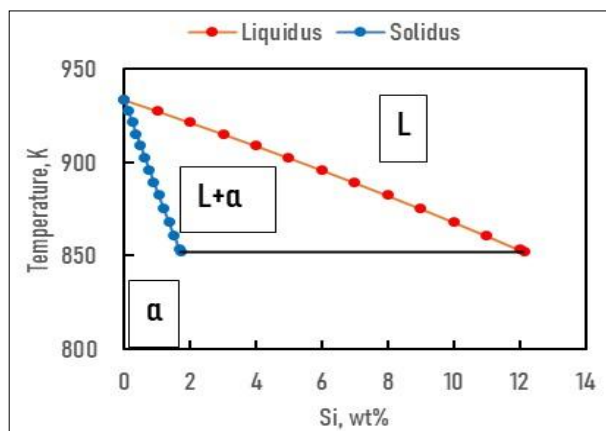
(16) és (22) egyenlettel számított likvidusz- és szolidusz-hőmérséklet és a TC-adatok közötti különbség (ΔT) kisebb, mint $\pm 0,5$ K (Al–Mg ötvözet, 14. ábra) és $\pm 0,01$ K (Al–Si ötvözet, 21. ábra). Ezek a különbségek kisebbek, mint a Ge–Si ötvözet esetében, mert a TC által kiszámított adatok pontosabbak, mint a digitalizálással kapottak. Ez a különbség megfelelő, mert az abszolút hőmérséklet meghatározásának pontossága a termikus analízis során nem jobb, mint ± 1 K.

A 15. ábra (Al–Mg ötvözet) és a 22. ábra (Al–Si ötvözet) a (40) egyenlettel kiszámított likviduszmerekséget (M_{Mg} , M_{Si}) mutatja, amelyet gyakran használnak a megszilárdulás szimulációjában. Ezeknek a függvényeknek az állandói a 8. táblázatban találhatók.

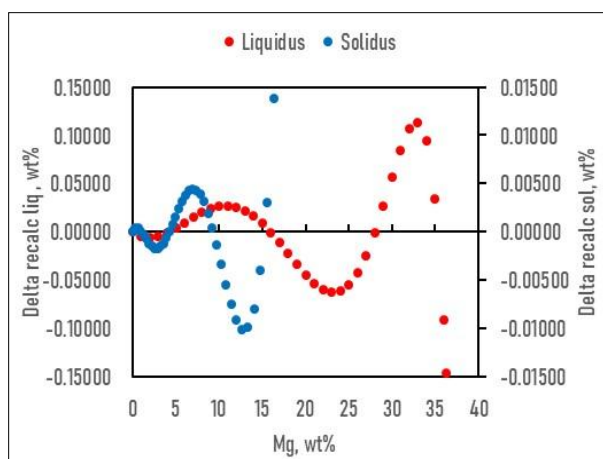
A koncentráció függvényében a megoszlási hányadost a 6.2. fejezetben leírt módszerrel számítottuk ki. A 16. ábra (Al–Mg ötvözet) és a 23. ábra (Al–Si ötvözet) a likvidusz- és a szoliduszkoncentráció függvényében mutatja az $\ln k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^l)$, $\ln k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^s)$ és $\ln k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^l)$, $\ln k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^s)$ függvényeket. Ezeknek a függvényeknek az állandói a 9. táblázatban találhatók. A 17. ábrán (Al–Mg ötvözet) és a 24. ábrán (Al–Si ötvözet) a függvények által számított megoszlási hányados (k) és a TC-adatok közötti különbséget mutatjuk. A különbség a ezek között kisebb, mint 0,002 ($k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^l)$), 0,0035 ($k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^s)$) és $-0,0025$ ($k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^l)$), $+0,0015$ ($k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^s)$).

A $k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^l)$, $k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^s)$ és $k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^l)$, $k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^s)$ függvények használatával a szolidusz- és a likvidusz-koncentrációkat újraszámítottuk a TC likvidusz és szolidusz adataiból:

$$\begin{aligned} X_{Mg}^s &= X_{Mg}^l(TC) \cdot k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^l), \\ X_{Mg}^l &= X_{Mg}^s(TC) / k_{AlMg}^{Mg}(X_{Mg}^s), \end{aligned} \quad (50a)$$



19. ábra. Az Al–Si fázisdiagram része (0 és 12,6 tömeg% Si között). A piros és a kék körök a TC-vel számított likvidusz- és szolidusz-hőmérsékleteket, a piros és kék vonalak a (16) és (22) egyenlettel számolt likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletet mutatják



18. ábra. Különbség az újraszámolt és TC likvidusz és a szolidusz adatai között

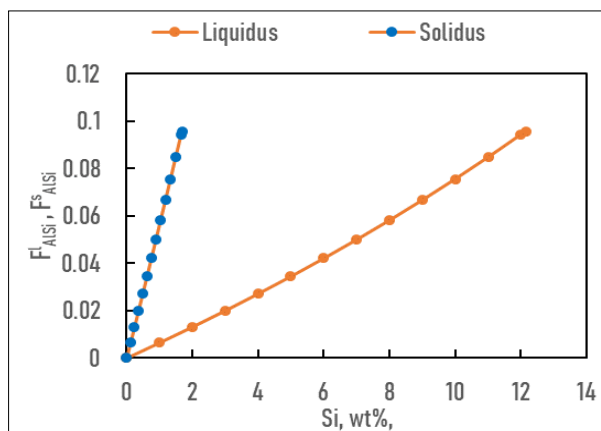
$$\begin{aligned} X_{Si}^s &= X_{Si}^l(TC) \cdot k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^l), \\ X_{Si}^l &= X_{Si}^s(TC) / k_{AlSi}^{Si}(X_{Si}^s). \end{aligned} \quad (50b)$$

A TC-adatok és az újraszámított likvidusz- és szoliduszadatok közötti különbség kisebb, mint $\pm 0,15$ tömeg% Mg és 0,015 tömeg% Si (18. és 25. ábra). Mivel az EDS-sel végzett koncentrációmérés legjobb pontossága körülbelül $\pm 0,1$ tömeg%, a számítás pontossága is megfelelő.

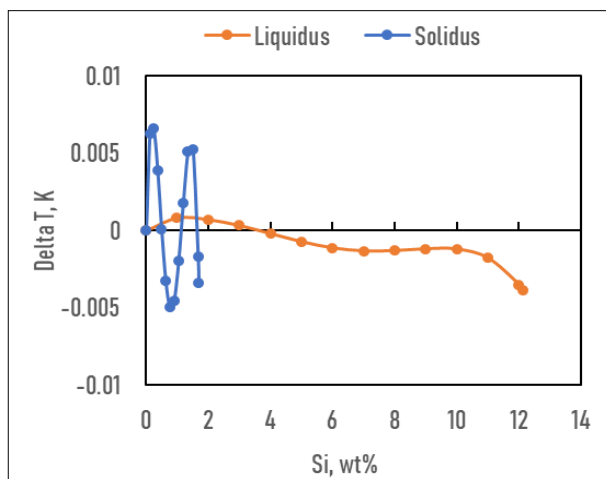
9. Összefoglalás és következtetés

A termodinamikai összefüggések alapján függvényeket vezettünk le a likvidusz és a szolidusz hőmérsékletének, a likvidusz lejtésének és a megoszlási hányadosnak a binér egyensúlyi fázisdiagramok koncentrációjának függvényében.

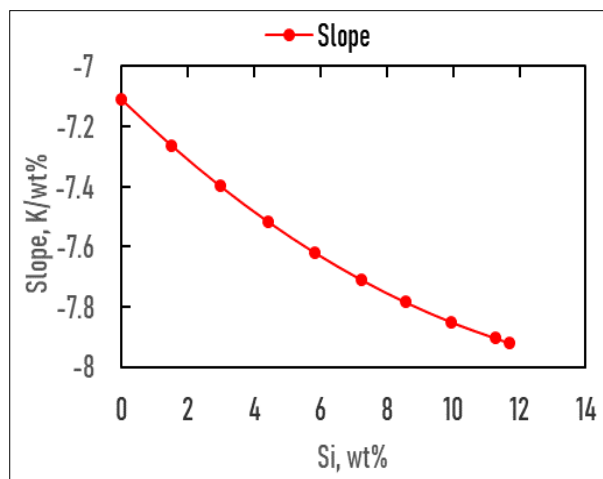
A módszer használhatóságát Si–Ge (Ge–Si) izomorf, valamint az Al–Mg és Al–Si eutektikus típusú egyensúlyi fázisdiagramok esetében mutattuk



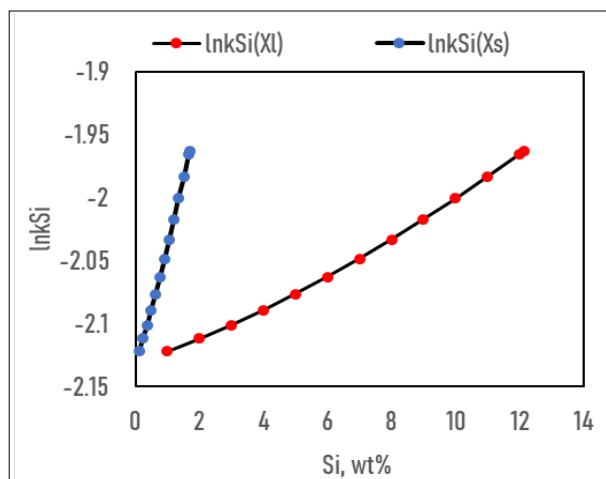
20. ábra. Az $F_{AlSi}^l(X_{Si}^l)$ és $F_{AlSi}^s(X_{Si}^s)$ függvények Mg-koncentráció függvényében. A piros és kék körök a TC-adatból a (42) egyenlettel számított értékeket, a piros és kék vonalak pedig a (15) és (24) egyenlettel számított értékeket mutatják



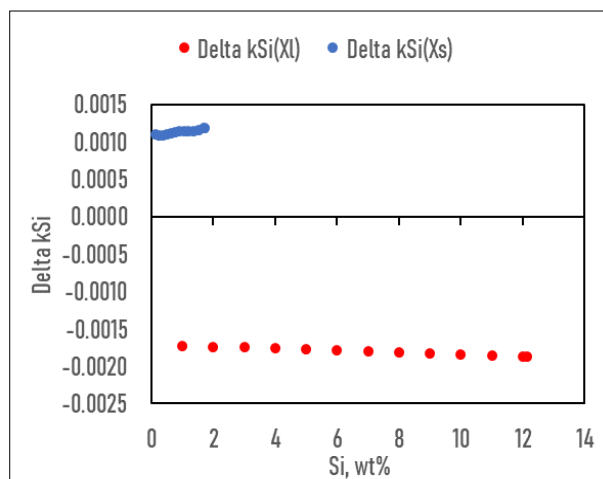
21. ábra. A hőmérséklet-számítás pontossága a Si-koncentráció függvényében



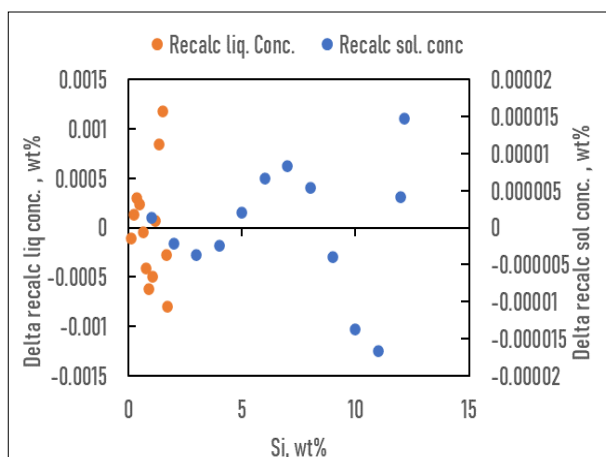
22. ábra. Az Al-Si ötvözet likviduszának meredeksége a (40) egyenlettel számítva a Si-koncentráció függvényében



23. ábra. Az $\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^{\text{l}})$ és $\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^{\text{s}})$ a Si-koncentráció függvényében. A piros és kék köröket a TC-adatokból, a piros és kék vonalakat a (35) és (38) egyenletekkel számítottuk ki



24. ábra. A $k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}$ számításának pontossága a Si-koncentráció függvényében



25. ábra. Különbség az újrászámított likvidusz és szolidusz, valamint a TC adatai között

be. A függvény állandók meghatározásához szükséges koncentráció-hőmérséklet adatpárokat a Si-Ge ötvözet esetében a grafikus egyensúlyi fázisdiagram-vonalainak digitalizálásával, Al-Si és Al-Mg ötvözetek esetében pedig THERMOCALC szoftverrel számítottuk ki. A függvények állandóit multilineáris regresszióval határoztuk meg.

A Si-Ge izomorf típusú ötvözet esetében kimutatták, hogy

1. a kifejlesztett függvényekkel a likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet, valamint a megoszlási hányados a teljes koncentrációtartományban kiszámítható,
2. a számítás tiszta Si-tól és Ge-től is indítható, az eredmény gyakorlatilag azonos,
3. egy egyszerű egyenlet segítségével kimutattuk, hogy a Si-Ge egyensúlyi fázisdiagram nem ideális,

7. táblázat. Az $F_{\text{AlMg}}^l(X_{\text{Mg}}^l)$, $F_{\text{AlMg}}^s(X_{\text{Mg}}^s)$ és $F_{\text{AlSi}}^l(X_{\text{Si}}^l)$, $F_{\text{AlSi}}^s(X_{\text{Si}}^s)$ függvények állandói

Al–Mg ötvözet	$(X_{\text{Mg}})^1$	$(X_{\text{Mg}})^2$	$(X_{\text{Mg}})^3$	R^2
$F_{\text{AlMg}}^l(X_{\text{Mg}}^l)$	0,00492766	0,00001586	0,00000190	0,9999
$F_{\text{AlMg}}^s(X_{\text{Mg}}^s)$	0,0153169	0,00040696	–0,00001676	0,9999
Al–Si ötvözet	$(X_{\text{Si}})^1$	$(X_{\text{Si}})^2$	$(X_{\text{Si}})^3$	
$F_{\text{AlSi}}^l(X_{\text{Si}}^l)$	0,00638714	0,00008422	0,00000317	0,9999
$F_{\text{AlSi}}^s(X_{\text{Si}}^s)$	0,05387725	0,00194081	–0,00037596	0,9999

8. táblázat. A $\partial(1 + F_{\text{AlMg}}^l(X_{\text{Mg}}^l))/\partial X_{\text{Mg}}^l$ és $\partial(1 + F_{\text{AlSi}}^l(X_{\text{Si}}^l))/\partial X_{\text{Si}}^l$ függvények állandói

Al–Mg ötvözet	$(X_{\text{Mg}})^0$	$(X_{\text{Mg}})^1$	$(X_{\text{Mg}})^2$
$\partial(1 + F_{\text{AlMg}}^l(X_{\text{Mg}}^l))/\partial X_{\text{Mg}}^l$	0,00492766	$2 \times 0,00001586$	$3 \times 0,00000190$
Al–Si ötvözet	$(X_{\text{Si}})^0$	$(X_{\text{Si}})^1$	$(X_{\text{Si}})^2$
$\partial(1 + F_{\text{AlSi}}^l(X_{\text{Si}}^l))/\partial X_{\text{Si}}^l$	0,00638714	$2 \times 0,00008422$	$3 \times 0,00000317$

9. táblázat. A $\ln k_{\text{AlMg}}^{\text{Mg}}(X_{\text{Mg}}^l)$, $\ln k_{\text{AlMg}}^{\text{Mg}}(X_{\text{Mg}}^s)$, $\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$ és $\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$ függvények állandói

Al–Mg ötvözet	$(X_{\text{Mg}})^0$	$(X_{\text{Mg}})^1$	$(X_{\text{Mg}})^2$	$(X_{\text{Mg}})^3$	R^2
$\ln k_{\text{AlMg}}^{\text{Mg}}(X_{\text{Mg}}^l)$	–1,12459273	–0,00466183	0,00038853	0,00000002	0,9999
$\ln k_{\text{AlMg}}^{\text{Mg}}(X_{\text{Mg}}^s)$	–1,12878634	–0,01144960	0,00377986	–0,00011094	0,9999
Al–Si ötvözet	$(X_{\text{Si}})^0$	$(X_{\text{Si}})^1$	$(X_{\text{Si}})^2$	$(X_{\text{Si}})^3$	R^2
$\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^l)$	–2,13100463	0,00833833	0,00053907	–0,00000714	0,99199
$\ln k_{\text{AlSi}}^{\text{Si}}(X_{\text{Si}}^s)$	–2,13141028	0,07366801	0,02572020	–0,00647442	0,9999

4. a likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet és megoszlási együttható hibája elsősorban a grafikus vonalak digitalizálásának hibájától függ.

Az Al–Mg és Al–Si eutektikus típusú ötvözetek esetében kimutattuk, hogy:

1. a számítást a tiszta Al-tól az első eutektikumig lehet elvégezni (Al+Si az Al–Si ötvözetnél, Al + Al₃Mg₂ az Al–Mg ötvözetnél),
2. a likvidusz- és a szolidusz-hőmérséklet és megoszlási hányados hibája lényegesen alacsonyabb, mint a Si–Ge ötvözet esetében, mivel a THERMOCALC által számított adatok sokkal pontosabbak, mint a digitalizálás során kaptak.

Végül:

1. Ennek a módszernek az az előnye, hogy bármely kutató könnyebben előállíthatja a szükséges egyenleteket a grafikus fázisdiagram digitalizálásával vagy a CALPHAD típusú számításokból származó adatok felhasználásával,

2. a likvidusz-, szolidusz-hőmérséklet és a megoszlási arány kiszámítása sokkal gyorsabb, mint a CALPHAD típusú számítás; ezeknek a függvényeknek a kristályosodási szoftverbe való beépítésével jelentősen csökkenthető a megszilárdulás szimulációjának CPU-ideje.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (ANN 130946 pályázati számú, valamint az Európai Űrügynökség támogatta a CETSOL/HUNGARY ESA PRODEX (No. 4000131880/NL/SH) projektek keretében.

Irodalom

- [1] A. Ludwig, M. Wu: Modelling the columnar-to-equiaxed transition with a three-phase Eulerian approach, Mater.Sci.Eng., A 413–414 (2005) 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.184>

- [2] P. R. Goulart, K. S. Cruz, J. E. Spinelli, I. L. Ferreira, N. Cheung, A. Garcia: Cellular growth during transient directional solidification of hypoeutectic Al–Fe alloys. *J. Alloy. Compd.*, 470 (2009) 589–599. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.03.026>
- [3] H. Zhang, M. Wu, R. M. G. Christian, A. Ludwig, A. Kharicha, A. Rónaföldi, A. Roósz, Zs. Veres, M. Svéda: Dendrite fragmentation mechanism under forced convection condition by rotating magnetic field during unidirectional solidification of AlSi7 alloy. *Acta Mater.* 241 (2022) article id.118391. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.118391>
- [4] A. Roósz, H. E. Exner: Numerical modelling of dendritic solidification in aluminium-rich Al–Cu–Mg alloys. *Acta Metall. Mater.*, (1990) 375–380. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(90\)90068-R](https://doi.org/10.1016/0956-7151(90)90068-R)
- [5] M. C. Flemings: *Solidification Processing*. McGraw-Hill Book Company, New York, 423., 1974.
- [6] W. Kurz, D. J. Fisher: *Fundamentals of Solidification*, 4th edition, Trans Tech Publications, Uetikon-Zuerich, Switzerland, 1998
- [7] J. A. Dantzig, M. Rappaz: *Solidification*, EPFL Press, Engineering Science, 2009.
- [8] K. Qiu, R. Wang, C. Peng, X. Lu, N. Wang: Polynomial regression and interpolation of the thermodynamic data in Al–Si–Mg–Fe system. *Calphad: Comput. Coupling Ph. Diagr. Thermochem.*, 48 (2015) 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2015.01.005>
- [9] I. Vušanović, D. Voronjec, M. J. M. Krane: Microsegregation phenomena in Al–Cu–Mg Alloy with considering of diffusion phenomena in primary phase. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering* 1/8 (2001) 965–980. UDC 669.018:678.023.
- [10] G. Zhao, X.Z. Li, D. Xua, J. Guo, H. Fu, Y. Du, Y. He: Numerical computations for temperature, fraction of solid phase and composition couplings in ternary alloy solidification with three different thermodynamic data-acquisition methods. *Calphad: Comput. Coupling Ph. Diagr. Thermochem.*, 36 (2012) 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2011.07.002>
- [11] I. Kuti: *Modelling of the microstructure of unidirectional solidification of binary solid solution*. PhD dissertation, Miskolc, 2000.
- [12] K. Qiu, R. Wang, C. Peng: Mathematic model of liquidus temperature in quaternary aluminium phase diagram. *Adv. Mat. Res.* 1095 (2015) 545–548. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1095.545>
- [13] X. Doré, H. Combeau, M. Rappaz: Modelling of microsegregation in ternary alloys: application to the solidification of Al–Mg–Si. *Acta Mater.*, 48 (2000) 3951–3962. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00177-4)
- [14] Q. Du, D. G. Eskin, L. Katgerman: Modelling macrosegregation during direct-chill casting of multicomponent Aluminium alloys. *Metall. Mater. Trans.*, A38 (2007) 180–189. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-9042-0>
- [15] Q. Du, D. G. Eskin, L. Katgerman: An efficient technique for describing a multi-component open system solidification path. *Calphad* 32 (2008) 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2008.06.007>
- [16] A. Roósz, J. Szőke, M. Rettenmayr: A tool for modelling of microsegregation: An approximation method for partition coefficients in experimentally determined multicomponent phase diagrams. *Z. Metallkd.*, 91/12 (2000)1013–1019. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2000-911209>
- [17] H. Stöhr, W. Klemm: Über Zweistoffsysteme mit Germanium. I. Germanium/Aluminium, Germanium/Zinn und Germanium/Silicium. *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, 241/4 (1939) 305–323. <https://doi.org/10.1002/zaac.19392410401>
- [18] C. D. Thurmond: Equilibrium thermochemistry of solid and liquid alloys of Germanium and of Silicon. I. The solubility of Ge and Si in elements of groups I, II, IV and V. *J. Phys. Chem.*, 57/8 (1953) 827–830. <https://doi.org/10.1021/j150509a019>
- [19] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [20] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szilicium>



Article

The Concept of the Estimation of Phase Diagrams (An Optimised Set of Simplified Equations to Estimate Equilibrium Liquidus and Solidus Temperatures, Partition Ratios, and Liquidus Slopes for Quick Access to Equilibrium Data in Solidification Software) Part I: Binary Equilibrium Phase Diagrams

Gergely Kőrösy ¹, András Roósz ^{1,2,*}  and Tamás Mende ¹

¹ Institute of Physical Metallurgy, Metal Forming, and Nanotechnology, Faculty of Materials and Chemical Engineering, Egyetemváros, University of Miskolc, 3515 Miskolc, Hungary; valaki121@gmail.com (G.K.); tamas.mende@uni-miskolc.hu (T.M.)

² HUN-REN TKI, Materials Science Research Group, Egyetemváros, 3515 Miskolc, Hungary

* Correspondence: andras.roosz@uni-miskolc.hu

Lassított utántömörítő csap működtetéssel gyártott nyomásos öntvények vizsgálata

Testing of high pressure die castings produced with reduced squeeze pin velocity

NYESTE VIKTOR^{1,2,@}, tervezőmérnök, doktorandusz; DR. MIKÓ TAMÁS³, tud. főmunkatárs;
KAZUP ÁGOTA³, tud. segédmunkatárs; KOVÁCS ÁRPÁD³, mérnök tanár; DR. MOLNÁR DÁNIEL⁴, egy. docens;
DR. MERTINGER VALÉRIA³, intézetigazgató, egy. tanár

¹Hanon Systems Hungary Kft., Székesfehérvár,

²Miskolci Egyetem, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Miskolc,

³Miskolci Egyetem, Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolc,

⁴Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, Miskolc

@E-mail: viktor.nyeste@student.uni-miskolc.hu

A lokális utántömörítés az iparban széles körben alkalmazott nyomásos öntészeti megoldás olyan öntvények esetén, melyeknél az eltérő falvastagságokból adódó eltérő helyi dermedési idők miatt zsugorodási porozitások alakulnának ki. Az utántömörítés, a nyomásos öntési folyamat szerves részét képező kiegészítő folyamatként van jelen a teljes öntési ciklusban. Az utántömörítő csap indítása jellemzően egy meghatározott kapcsolási ponthoz képesti késéssel történik, amit késleltetési időnek neveznek. Az egyes alkalmazott késleltetési idők eltéréseit eredményeznek a szövet-szerkezetben, amely eltérések megértése fontos a gyártás során keletkező selejtelek csökkentésének céljából.

Az egyes késleltetési időkkel gyártott öntvények összehasonlítását többféle módon lehet elvégezni, pl. sűrűségméréssel, szakítószilárdság vizsgálatával, számítógépes tomográfias (CT) elemzéssel, ugyanakkor fontos, hogy az egyes vizsgálati eredmények számszerűsíthetőek legyenek, elkerülve így a szubjektivitást.

A jelenlegi gyakorlat szerint gyártástechnikai szempontból fontos következtetésekre lehet rávilágítani a szakítópróbatestek töretfelületeinek vizsgálata alapján, viszont ezek a megállapítások általában szubjektívek. További fontos megállapítások tehetők az optikai mikroszkópos és CT-felvételek ilyen irányú elemzésével, azonban ebben az esetben az inhomogenitások kiértékelése vizuálisan lehetséges, ami alapján nem lehetséges a számszerű összehasonlítás elvégzése.

Az eddigi eredményeink alapján megállapítható, hogy a lassított utántömörítő csap mozgatásával gyártott öntvények szövetszerkezeti jellemzőinek eredményei átértékelik a szakirodalomban fellelhető eredményeket. Az utántömörítő csap kisebb sebessége a korai indítás mellett is megfelelő szakítószilárdsági értékeket tud biztosítani az öntvényben, mivel elegendő idő áll rendelkezésre ahhoz, hogy a hatékony utántömörítés megtörténjen.

Kulcsszavak: nyomásos öntés, lokális utántömörítés, benyomódási úthossz

In the high pressure die casting process (HPDC), local squeezing is commonly used in castings, where shrinkage porosities can develop due to different wall thicknesses. Local squeezing is an integrated part of the casting process, but this can be considered an additional operation which occurs after the completion of the mold filling process. Usually, the squeeze pin starts postponed to a specific switching point, which term is called the delay time. Different delay times will cause different results in the microstructure, which is essential to understand reducing the potential rejects that may occur during production.

There are several ways to compare the properties of castings produced with different delay times. Comparisons must be made on a quantitative basis, excluding subjective factors. Such tests may include measurement of density, comparison of tensile strength, and computer tomography (CT) analysis. On the other hand, the examination of the fracture surfaces of the tensile test specimens can be done subjectively in most cases. By the analysis of the micrographs and CT scans in this manner, quantitative comparisons cannot be done, but important observations can be made.

Keywords: die casting, local squeeze pin, stroke of squeeze pin

1. Bevezetés

A nyomásos öntészet széles körben elterjedt gyártástechnológiai módszer, melynek előnye a többi könnyűfém öntési technológiával (pl. a gravitációs öntéssel) összehasonlítva, hogy rövid ciklusidővel lehet komplex geometriájú, kis falvastagsággal rendelkező öntvényeket előállítani [1]. Olyan komplex öntvények esetén, melyek több funkciót integrálnak, kialakulhatnak eltérő falvastagságok, ahol eltérőek lesznek a dermedési idők is [2, 3]. Ha egy adott öntvénykeresztmetszet tömörre táplálása nehézségekbe ütközik, akkor ott lokálisan zsugorodási porozítások és fogyási üregek alakulhatnak ki [4, 5]. Ezekben az öntvényrészekben helyi utántömörítés alkalmazásával lehet kompenzálni a kialakuló inhomogenitásokat [6, 7]. Az ilyen öntvénygeometriák esetén a helyi utántömörítés fontos része a nyomásos öntészeti folyamatnak, ami külön folyamatalként is vizsgálható, mivel az utántömörítés gyakorlatilag akkor történik meg, amikor a formatöltés befejeződött és elkezdődik az olvadék dermedése a formaüregben belül [8].

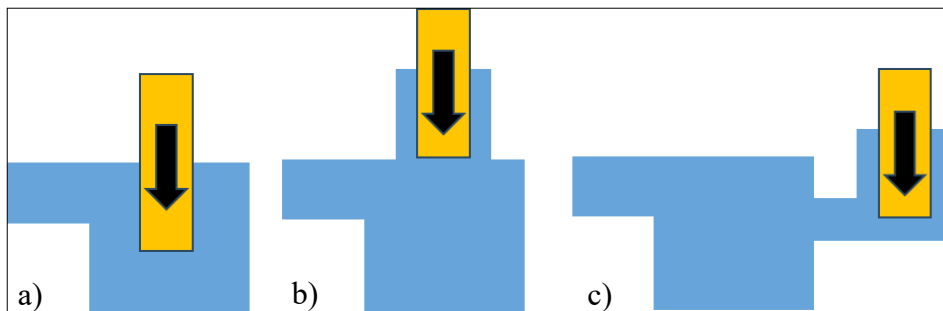
A gyakorlatban kétféle, ún. direkt és indirekt utántömörítést különböztetünk meg [9, 10]. Az 1. ábrán látható kialakításokkal lehet az utántömörítésre szolgáló csapot elhelyezni. Direkt utántömörítés során (lásd 1. ábra) a sárga színnel jelzett utántömörítő csap közvetlenül az öntvénybe kerül benyomásra, és mint furatképző vesz részt a végleges öntvénygeometria kialakításában. Ennek a megoldásnak előnye, hogy nem igényel pótlólagos megmunkálást az utántömörítésből visszamaradó anyag eltávolítása. A másik típusú direkt utántömörítés esetén (lásd 1. ábra), amikor az utántömörítő csap az anyaghalmozódási hely közelében végzi el az utántömörítést. Ebben az esetben az utántömörítő csap nem hatol mélyebbre az öntvény felületénél. A megoldás egyik előnye, hogy az esetlegesen az utántömörítő csap felületén lévő oxidos zárványok nem kerülnek be az öntvénybe.

Indirekt utántömörítés során (lásd 1. ábra) az utántömörítő csap nem közvetlenül az öntvénygeometriához kapcsolódik. A megoldás hátránya, hogy az utántömörítés hatékonysága jelentősen csökken a kritikus öntvényrésztől való távolsága és a kisebb öntvényhez

csatlakozó keresztmetszet miatt. A b) és c) megoldások esetén az utántömörítés miatt visszamaradó geometriai részt megmunkálással kell eltávolítani.

Maga az utántömörítés művelete, vezérléstechnikai szempontból két technológiai paraméterrel kapcsolódik a nyomásos öntészeti folyamathoz [12, 13]. Az egyik – és talán a legfontosabb paraméter – az utántömörítő csap indításának késleltetése, ami minden esetben egy meghatározott, ún. kapcsolási pont-hoz képest kerül megadásra, ami lehet az öntödugattyú indulásához, azaz az 1. fázis kapcsolási pontjához beállított késleltetési idő, vagy a formatöltés kezdetét meghatározó 2. fázis kapcsolási pontjához beállított késleltetési idő [6].

Az adott öntőgép technológiai beállításától függ, hogy melyik időponthoz képest történik az utántömörítés késleltetésének a megadása. Ezt az időpontot minden esetben úgy célszerű megválasztani, hogy az adott időpillanatban a formatöltés már teljes mértékben megtörténjen. Az utántömörítés hatékonysága nagyon alacsony azokban az esetekben, mikor a csap mozgatásának indulásakor nem történt meg a formatöltés, vagy abban az esetben, amikor bár már megtörtént a formaüreg megtelése, de a dermedés még nem vagy csak alig kezdődött meg. A túl korai indítás azt jelenti, hogy még nagyon alacsony az olvadék szilárdfázis aránya, így gyakorlatilag az utántömörítő csap benyomása az olvadékba fog megtörténni. Ekkor a dermedés úgy fog lezajlani, hogy az utántömörítő csap eléri a maximális helyzetét, és így a dermedés során alig tudja utántáplálni a kialakuló fogyási üregeket. Ha túl késői az utántömörítő csap indítása, akkor ennek az ellenkezője fog történni, mivel ebben az esetben magas szilárdfázis arány mellett történik a csap működtetése. Ekkor a már megdermedt öntvényben alig lehet utántömörítést végezni, és fennáll a veszélye annak, hogy akár az utántömörítő csap, akár maga az öntvény is roncsolódhat [6, 14, 15]. Ebben az esetben a kialakuló szövetszerkezet sem lesz elfogadható, és az öntvény felületén jellemzően laminációs hiba is jelentkezhet az utántömörített öntvényrész közelében. Mind a korai, mind a késői indítás esetén öntvényselejt keletkezik, vagy rosszabb esetben maga



1. ábra. Direkt a), b) és indirekt c) utántömörítés sematikus elrendezése [11]

a gyártóeszköz is meghibásodhat, ami jelentős termelés kiesést okozhat.

További fontos paraméter az utántömörítőcsap visszahúzásának az ideje. Ennek a lépésnek a dermedés során kialakult szövetszerkezetre nincsen hatása, de öntvényhibát okozhat, ha túl későn vagy túl korán kerül sor a csap kihúzására.

Az ipari gyakorlatban az öntődékben az utántömörítő csap elmozdulásának sebességét jellemzően nem módosítják, illetve az utántömörítő csap benyomódási úthosszát is csak ritkán ellenőrzik. A szakirodalom és az ipari gyakorlat alapján elmondható, hogy az utántömörítő csap mozgási sebessége jellemzően $\sim 5,0$ mm/s. A szerzők által elvégzett mérések eredményei is ezt a mozgási sebességet igazolták.

Kísérleteink célja, hogy összefüggéseket és tudományos alapú eredményeket szolgáltatassunk az alumínium-szilícium (AlSi) ötvözetek helyi utántömörítéshez kapcsolódó fémtani viszonyokról. Fontos cél, hogy az egyes tömörítési beállítások hatásának kvantitatív összehasonlítása olyan egzakt paraméterek alapján történjen, mint a mechanikai tulajdonságok vagy a porozitás mértéke. Cikkünkben különböző utántömörítési paraméterekkel gyártott öntvények szakítószilárdsági és porozitási értékeit hasonlítjuk össze, melyeket a szakító próbatestek töretfelületeinek elemzésével is kiegészítettük.

2. Vizsgált anyagminőségek, alkalmazott kísérleti és vizsgálati módszerek

A kísérleteket egy függőleges elrendezésű nyomásos öntőgépen többfészkes szerszámmal, üzemszerű szériagyártási körülmények mellett végeztük. Min-

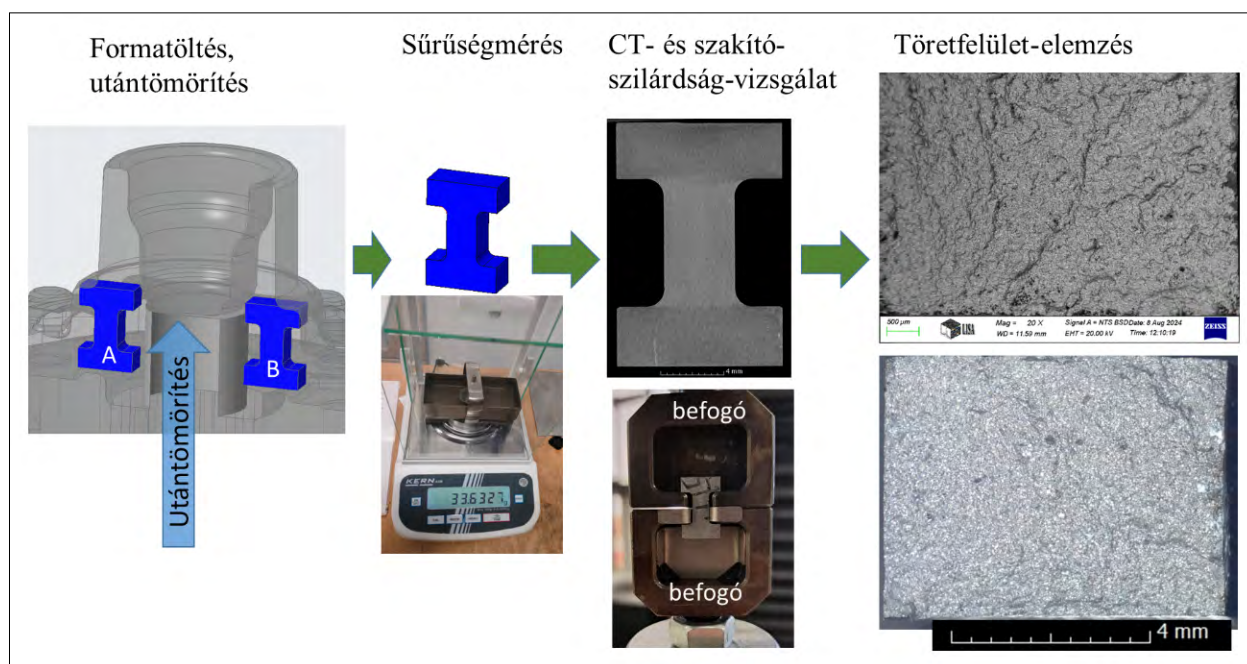
den egyes vizsgált paraméter beállítással tíz-tíz darab öntvény leöntésére került sor. A vizsgált próbatestek kimunkálása minden esetben az azonos fészkekben pozícionált öntvényből történt meg.

A vizsgált öntvények anyagminősége szabványos AlSi_9Cu_3 ötvözet. Az öntvényekkel szemben támasztott fő követelmény a nyomástömorség, mely előírás az öntvénygeometriai kialakítása miatt csak helyi utántömörítés alkalmazása esetén lehet teljesíteni.

Az elvégzett vizsgálatok a késleltetési időre és az utántömörítő csap sebességének hatására vonatkoztak. Mivel az ipari gyakorlatban nem gyakori az utántömörítő csap sebességének változtatása, és a szakirodalmi források alapján sem lehetett információt szerezni ezek hatásáról, így a kísérletsorozat az utántömörítő csap sebességének határértékei közötti különbségek vizsgálatával kezdődött.

A 2. ábra mutatja be az öntött alkatrészen a lokális utántömörítés helyét és a mintavételi pozíciókat. A próbatestek az utántömörítő csap tartományának legközelebbi régiójából kerültek kimunkálásra. A kimunkált próbatesteken sűrűségvizsgálatot és komputertomográfiai (CT) mérést végeztünk, majd azok elszakítása megtörtént. A szakadási felületeket pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk.

Az öntés során öt különböző paraméter beállítást alkalmaztunk (4, 5, 6, 7, 8 minta). Egy sorozatban minden egyes beállítással tíz párhuzamos mintadarabot öntöttünk le, amelyeket 1-től 10-ig számoztuk (lásd 4.1, ..., 4.10). Az elvégzendő vizsgálatok minden legyártott öntvényből két darab próbatest kimunkálásával (lásd 4.1A, 4.1B) zajlott. Az egyes késleltetési időket (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 s) a 2. fázis kapcsolási



2. ábra. A kísérleti-vizsgálati folyamat a mintavételi helyekkel

pontjához képest határoztuk meg. Az utántömörítő csap sebessége minden esetben 1,0 mm/s volt, ami a korábban bemutatott, iparban alkalmazott ~5,0 mm/s sebességhez képest lassított utántömörítő csap mozgási sebességnek minősül.

Az 1. táblázat a kísérleti paramétereket foglalja össze. A 4. minta esetén 0,5 s a késleltetési idő, ami azt jelenti, hogy a formaüreg kitöltésének pillanatához képest közvetlenül megtörtént az utántömörítő csap indítása. Ebben az esetben – a szakirodalom szerint – a tömörítés várható mértéke gyakorlatilag elhanyagolható. Az 5. minta esetén a beállított késleltetési idő értéke 1,0 s, ebben az esetben az utántömörítés hatása várhatóan javul. A 6. minta esetén az utántömörítő csap késleltetésének a beállítása 1,5 s, ami a szériagyártás során használt beállításhoz közeli érték. A 7. és 8. minta esetén, ahol a késleltetési idő 2,0 s, illetve 2,5 s, az utántömörítés hatékonyságának a csökkenése várható a szakirodalom alapján.

1. táblázat. Kísérleti paraméterek

Mintajelölés	Gyártási paraméterek	
	Késleltetési idő (s)	Utántömörítő csap sebessége (mm/s)
4.1A... 4.10B	0,5	1,0
5.1A... 5.10B	1,0	1,0
6.1A... 6.10B	1,5	1,0
7.1A... 7.10B	2,0	1,0
8.1A... 8.10B	2,5	1,0

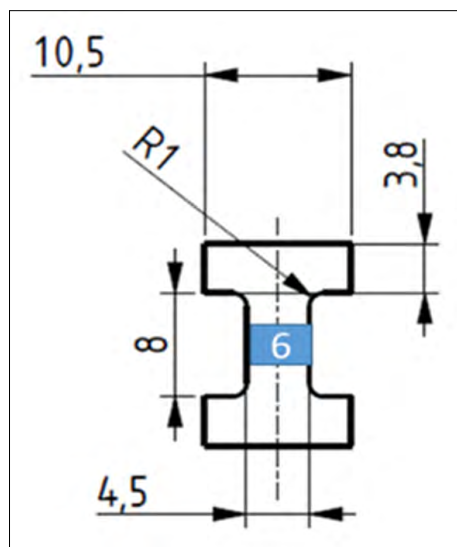
A leöntött minták tulajdonságainak számszerűsíthető összehasonlítása érdekében sűrűségmérést, szakítószilárdsági és CT-s képalkotó vizsgálatokat végeztünk. Vizsgálataink fő célkitűzése a porozitás mint a kritikus paraméter meghatározása volt. A közvetlen mérés a szakítópróbatestek CT-felvételén alapult, melyhez a Miskolci Egyetem 3D Laboratóriumában lévő YXLON FF35 μ CT berendezést használtuk (140 kV, 170 μ A, 9,1 mikronos voxelméret).

A porozitást, a próbatest CAD-modellje alapján származtatott térfogat ($v_{\text{próbatess}}$) és a megmunkált próbatestek tömege ($m_{\text{próbatess}}$) alapján számítással határoztuk meg. A próbatestek tényleges sűrűségének értékeit az (1) és (2) összefüggések segítségével határoztuk meg:

$$\rho_{\text{elméleti}} = \frac{m_{\text{próbatess}}}{v_{\text{próbatess}}}, \quad (1)$$

$$\text{porozitás} = 100 - \frac{\rho_{\text{tényleges}}}{\rho_{\text{elméleti}}}, \quad (2)$$

ahol $\rho_{\text{elméleti}} = 2,75 \text{ g/cm}^3$.



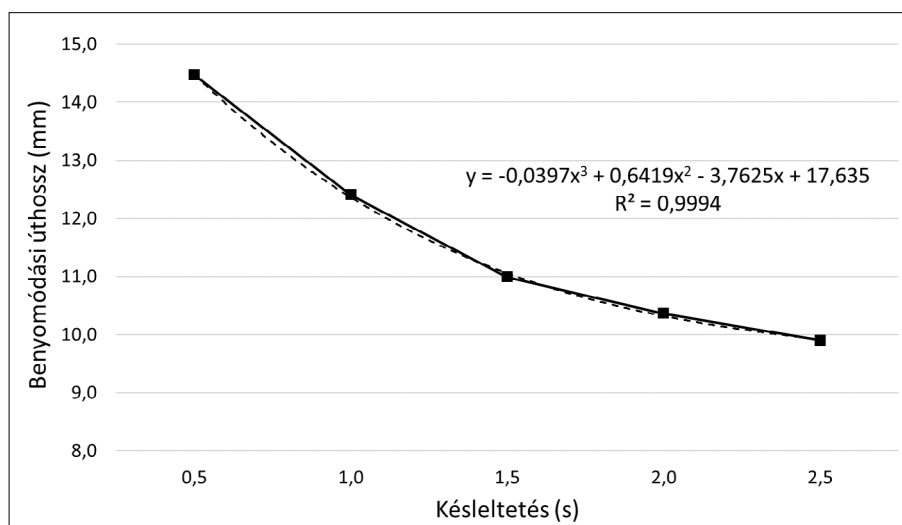
3. ábra. A szakítópróbatest geometriája

A nem szabványos szakítópróbatestek alakjának és méretének meghatározásával alkalmazkodni kellett az öntvény geometriájához. A 3. ábrán látható a ki-munkált próbatest geometriája a méretekkel.

Vizsgálataink célja az egyes beállításokból adódó tulajdonságok összevetése volt, a mért értékek szabványhoz való hasonlítása nem képezte kísérleteink célját. A mechanikai vizsgálatok elvégzéséhez Instron 5982 univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezést használtunk (100 kN erőmérőcella, 250 mm méretű AVE videoextenzométer, 3 mm/perc keresztfejmozgatás). A nem szabványos szakító próbatestek rögzítésére egyedileg készített acél befogóeszközt használtunk (2. ábra). A minták nyúlását videoextenzométerrel határoztuk meg, a törött minták felületét Nikon FZ61 típusú sztereomikroszkóppal és Zeiss AVOMA 10 pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk.

3. Eredmények

Az egyes beállításokkal öntött mintaöntvények le-gyártása után elsőként az azokon mérhető tényleges benyomási úthosszak visszamérése történt meg. A mérés tárgya annak a meghatározása volt, hogy a különböző késleltetési beállítások miként módosították az utántömörítő csap által megtett úthosszt. A 4. ábrán látható, hogy a késleltetési idő növelése következtében az utántömörítő csap elmozdulása a várakozások-nak megfelelően változott. A kísérlet során használt késleltetési érték változtatásának hatására harmadfokú polinom szerint csökkent az utántömörítő csap által megtett úthossz. A szakirodalom alapján várható volt, hogy lesz olyan késleltetési idő érték, amelynél az öntvény minőségi értékei egy optimumot fognak mutatni, ami alapján a túl korai és késői indítások esetén várható volt a mechanikai tulajdonságok értékeinek



4. ábra. Az utántömörítő csap átlagos benyomódási úthossza a késleltetési idő függvényében

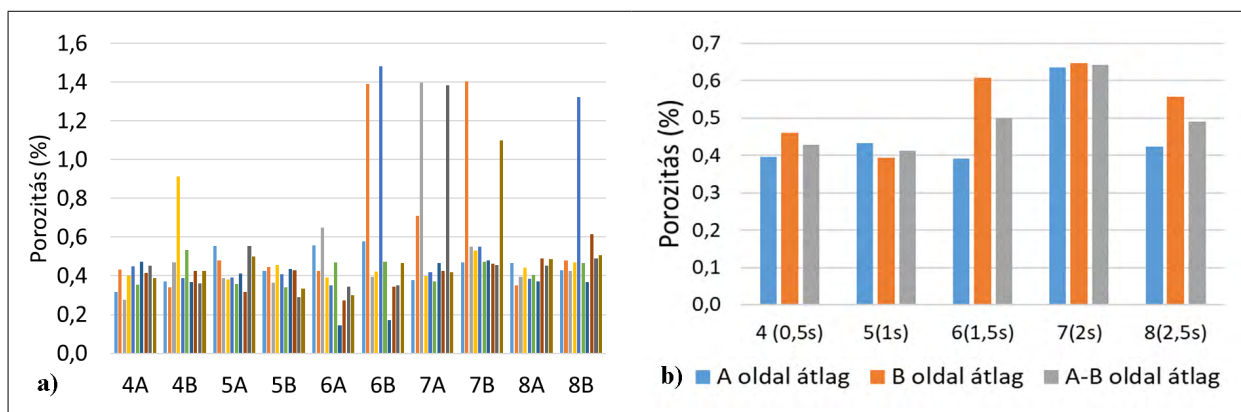
csökkenése [13]. Vizsgálataink során az utántömörítő csap lehetséges maximális elmozdulása 15,0 mm volt, ami az utántömörítést végző munkahengerben kialakított fix ütközővel került biztosításra.

Vizsgálataink még a szakítóvizsgálat elvégzése előtt a leöntött mintaöntvényekből kimunkált próbatetek sűrűségmérésével folytatódtak. Ahogy az a 2. és 3. ábrán látható, a próbatetek a rendelkezésre álló hely miatt kis méretűek, a próbatetek tömege nem érte el a 2,0 grammot. Az 5. ábrán látható az öntvényekből kimunkált próbatetek sűrűsége és az egyes mintákra számolt átlagadatok. Alapvetően a nyomásos öntvényekhez képest a porozitás alacsony értékű. Jól látható, hogy néhány mintánál kiugró adat található, aminek köszönhetően a 6. minta B oldali és a 7., 8. minták porozitásértéke nagyobb. Szintén megfigyelhető volt, hogy az öntvény A és B oldali adata között nagyobb eltérés mutatkozik. Ez alól csak a 7. minta kivétel, mely esetben mind az A, mind a B oldalon volt a legnagyobb mértékű a porozitás.

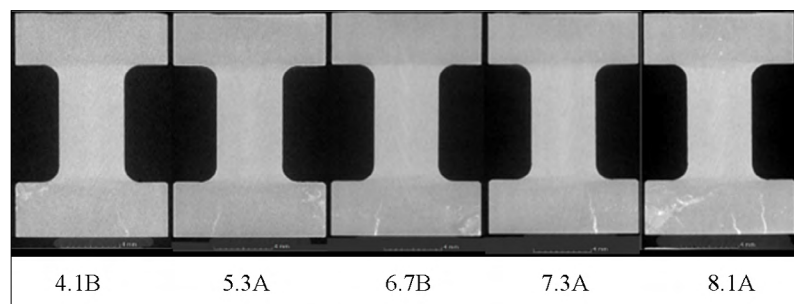
Érdekes eredmény, hogy az 1,0 mm/s csapmozgási sebesség alkalmazásánál a kis késleltetéssel lehetett a legkisebb porozitású öntvényt előállítani.

A szakítóvizsgálat előtt elvégzett CT-vizsgálat eredményei is a fentieket erősítik meg. A berendezés felbontási határától nagyobb méretű pórusok gyakorlatilag nem voltak kimutathatók. A 6. ábrán látható egy-egy példa minden utántömörítési állapotra. A CT berendezés érzékenységét mutatja, hogy az egyes felvételeken a próbatetek alsó részén megfigyelhető a világosabb színű, nagyobb sűrűségű fázisok dúsulása.

A CT-vizsgálatok után a szakítóvizsgálat elvégzése volt a következő lépés. A szakirodalom alapján itt is várható volt, hogy a korai és a késői késleltetések esetén lesznek a legalacsonyabbak a szakítószilárdság-értékek, mivel várhatóan azoknál a beállításoknál csökken az utántömörítés hatékonysága. Viszont már a porozitási eredmények függvényében megállapítható volt, hogy a kis utántömörítő csap sebességnek köszönhetően a mért értékek nem ezt az eredményt hozták. A 7. ábrán látható minden egyes próbatest szakítószilárdsága és azok átlagos értékei. A szilárdsági értékek a próbatetek A és B oldalán jellemzően eltérnek. A legkisebb eltérés a legkisebb porozitáskülönbség esetén volt tapasztalható. Az átlagadatokat megvizsgálva a porozitásértékekkel az is összhangban



5. ábra. Az egyes mintadarabok a) porozitása b) és átlagértékei

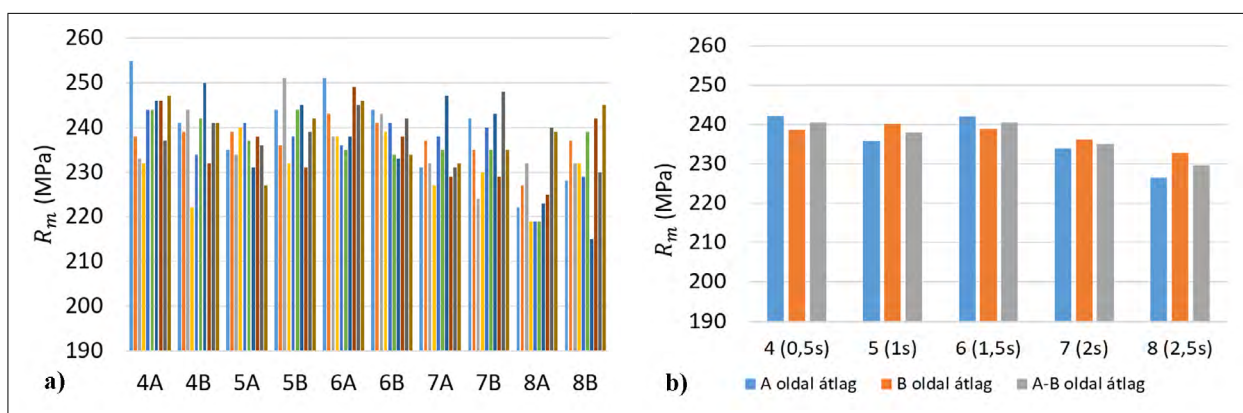


6. ábra. Szakitópróbatest-minták

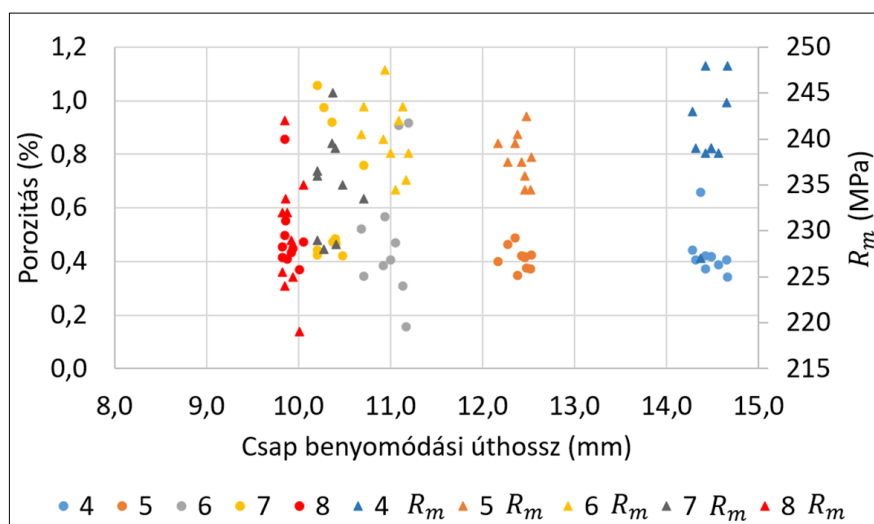
van, hogy a 6B és 7., 8. jelű minták szilárdsága a legkisebb.

A szakirodalom szerint a 4. és 8. mintáknak kellett volna a legalacsonyabb értékeket elérniük, viszont ezzel ellentétesen, a 4. minta mutatta a legnagyobb szilárdságot. Az elvégzett vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az egyes próbatestek mért szakitószilárdság-értékei ~5,0% eltérésen belül vannak, így még a legalacsonyabb 7. és 8. minta értékei is elfogadhatóak.

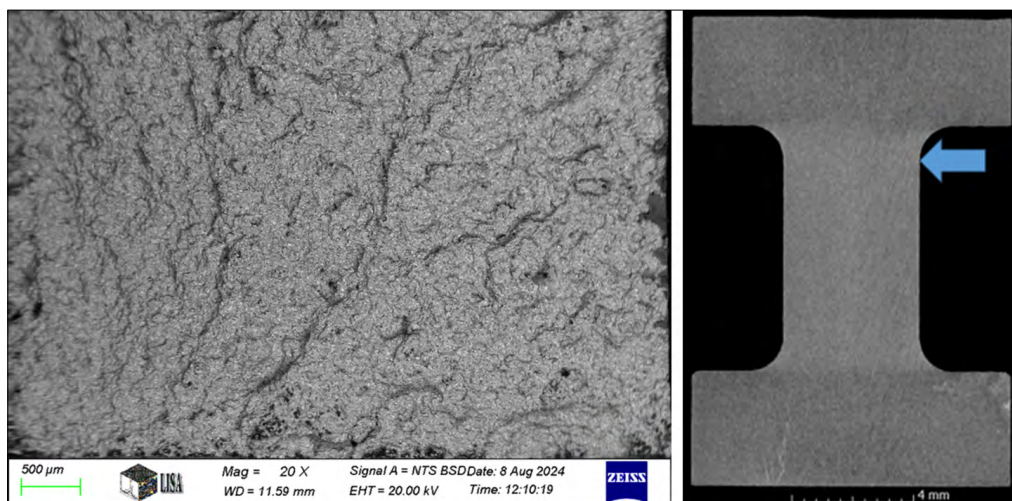
Ha az utántömörítő csap benyomódási úthosszainak függvényében ábrázoljuk a szakitószilárdság- és porozitásértékeket (8. ábra), akkor egyértelműen megállapítható, hogy a 4. minta hozza a legjobb (legnagyobb szilárdság, legkisebb porozitás) eredményeket. Ebben az esetben az utántömörítő csap elmozdulás értéke közel volt az elméleti maximális úthosszhoz, amelyet viszont az csak ún. üresjárat esetén tudna megtenni. Ez a figyelemre méltó új eredmény ellentétes a szakirodalmakban publikált eddigi ismeretekkel.



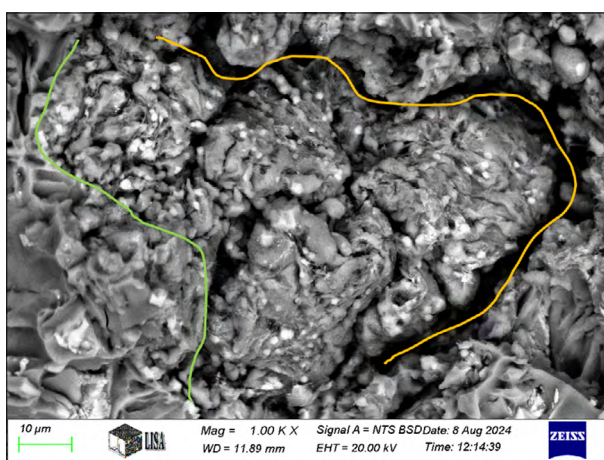
7. ábra. Az egyes mintadarabok a) szakitószilárdság- és b) átlagértékei



8. ábra. Az egyes mintadarabok A és B oldali átlagporozitása, átlagszilárdsága a benyomódási úthossz függvényében



9. ábra. A 4.4B. próbatettötret és CT-felvételei



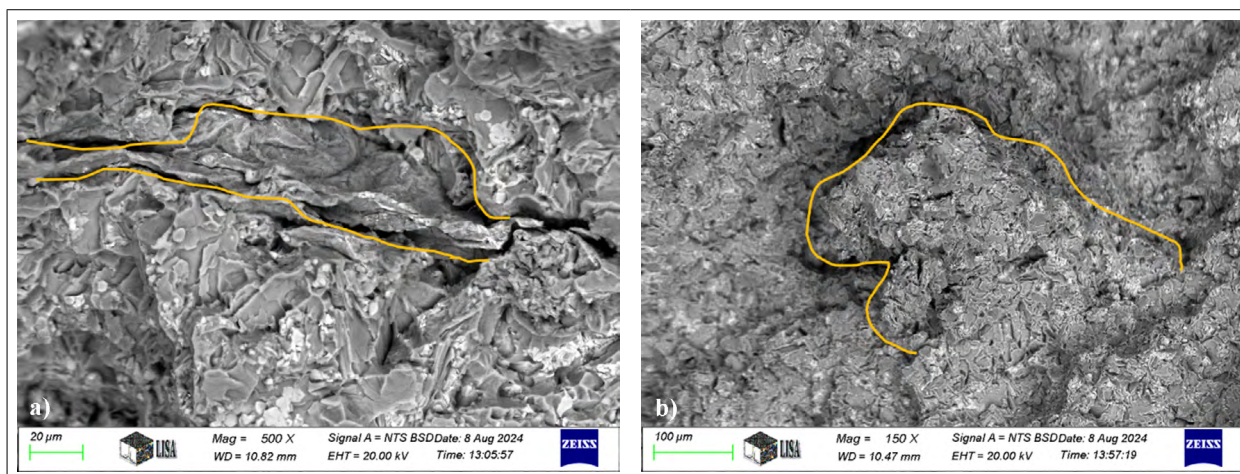
10. ábra. Utántömörített rész a kialakult zsugorodási porozitásban a 4.4B mintán

A következőkben az egyes mintadarabok töretfelvételeiről készült felvételeket és azok elemzését mutatjuk be.

A 9. ábrán a kiugróan alacsony szilárdsági értéket (220 MPa) mutató 4.4B öntvényből kimunkált pró-

batest törete és CT-felvétele látható, ahol a jobb oldali ábrarészen a kék nyíl jelöli a szakadás helyét. A próbatest esetén sem a töreten, sem a CT-felvételeken nem lehetett olyan jellegű inhomogenitást azonosítani, amely indokolná az alacsony szakítószilárdság-értéket.

A 10. ábrán látható SEM-felvételen az utántömörítés hatása figyelhető meg ugyanezen 4.4B próbatest esetén. A sárga vonallal körülhatárolt rész jelöli a kialakult zsugorodási porozitást, amibe az utántömörítés során lett beprésselve a még olvadék állapotban lévő fém. Viszont hibába történt meg az utántömörítés, a porozitás felülete és a beprésselt fém nem tudott összeolvadni. A zöld vonal azt jelöli, hogy a beprésselt fém melyik irányból érkezhett, mivel ennek határán az alap szövetszerkezethez való kapcsolódás fedezhető fel. Mivel lassú volt az utántömörítés, a megszilárdulás közben kialakuló zsugorodási pórusok folyamatosan után voltak táplálva olvadékkal. A kép méretskáláján is látható, hogy nagyságrendileg a 10 µm tartományról van szó, ami magyarázza, hogy a CT-felvételen miért nem láthatóak ezek a hibák.



11. ábra. Töretfelületről készült SEM-felvételek az 5.1A minta a) és a 6.6A minta b) esetében

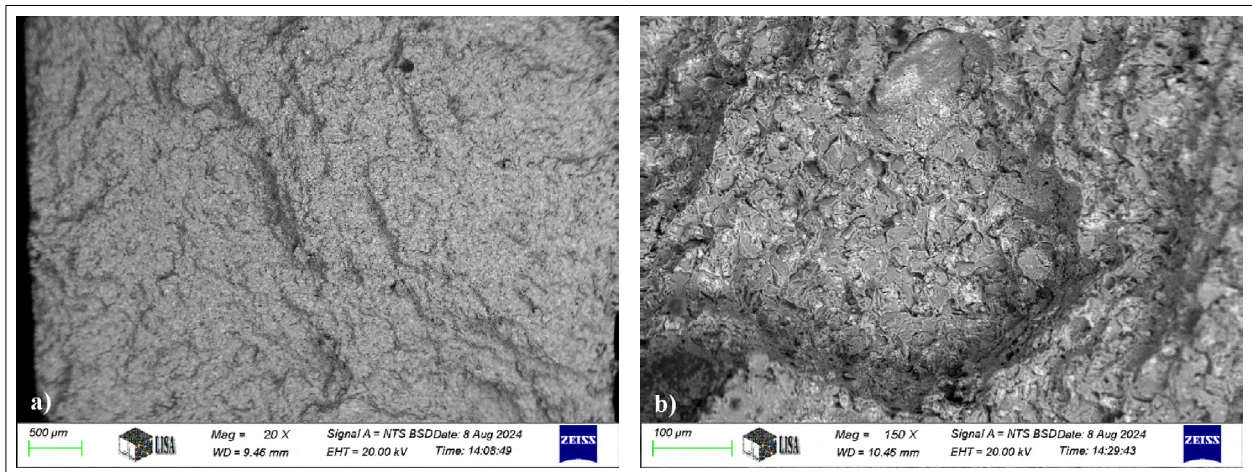
A 11. ábra a) részén az 5.1A minta, míg b) részén a 6.6A minta töretfelületéről készült felvételeken is hasonló jelenségek figyelhetők meg. Jól kivehető a kialakuló zsugorodási porozitások üregeibe benyomult fém az utántömörítés során. Megállapítható, hogy a 4.4 minta esetén mért 10 μm méret tartományából a 20–100 μm mérettartományba növekedett a hibahelyek nagysága. Ahogy nőtt a késleltetési idő, úgy növekedtek az egyes hibahelyek nagyságai. A 11. ábra a) részén, az 5.1A mintához tartozó felvételen megfigyelhető továbbá az α -szilárd oldatra jellemző tarajos töretfelület.

A 7.3A minta esetén (12. ábra) már sokkal jobban kivehetőek a kialakuló gáporozitások, amit valószínűleg a későbbi tömörítőcsap indítás (2,0 s) eredményezett. Ezek a gáporozitások méretükben még nem meghatározóak, a töretfelületen nem számottevőek, jobbára csak a SEM-felvételeken lehet ezeket a kialakult hibahelyeket megfigyelni. A gáporozitás szabályos gömb alakú. Utántömörítés során ebbe a szabá-

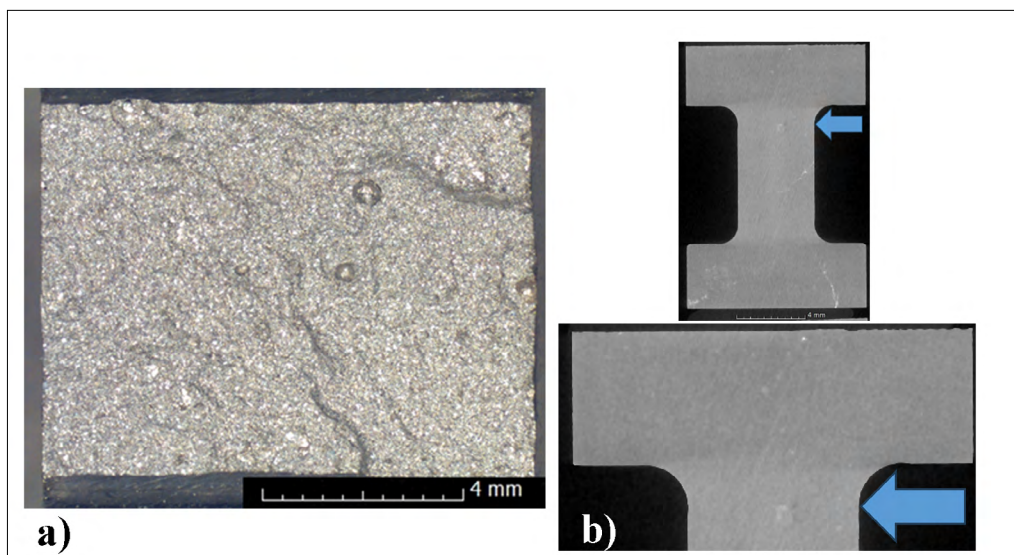
lyos üregbe nyomult be a még olvadék állapotban lévő fém, de a gáporozitás felületét borító oxidhártya miatt a két fémfront már nem tudott összehegedni.

A 8.4A mintánál a tömörítőcsap késleltetése már 2,5 s értékű volt (13. ábra), a kialakuló gáporozitások még nagyobb méretben jelentek meg. Az optikai mikroszkóppal készült felvételen is megfigyelhetők a gáporozitások, melyek megmagyarázzák az elért gyengébb szakítószilárdsági értéket (219 MPa). A CT-felvételen kék nyíl jelöli a szakadás helyét. A felvételen jól látszik a kialakult gáporozitás és az abba, az utántömörítés során bepréselt fém, mely kitöltötte a félgömb alakú üreget.

A minta SEM-felvételeinek elemzése során szintén megfigyelhető a kialakult oxidos hártya a gáporozitás felületén (14. ábra). A 14. ábrán a 8.6B mintadarabja látható. Az a) felvételen látható az utántömörítés során a gáporozításba bepréselt fém, míg a b) felvételen láthatóak az egyes kisebb és nagyobb méretű gáporozitások.



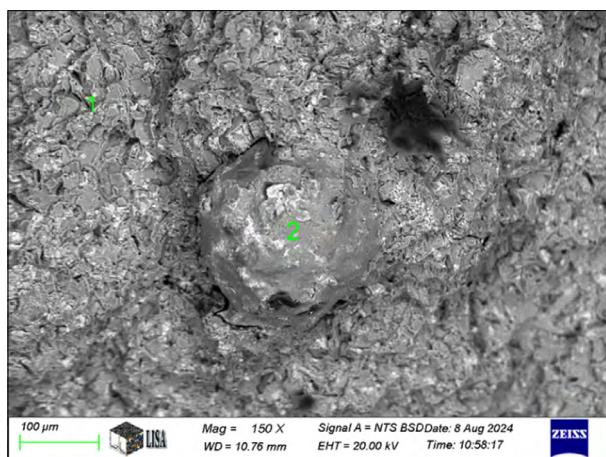
12. ábra. A 7.3A próbatest SEM-töretfelvételei



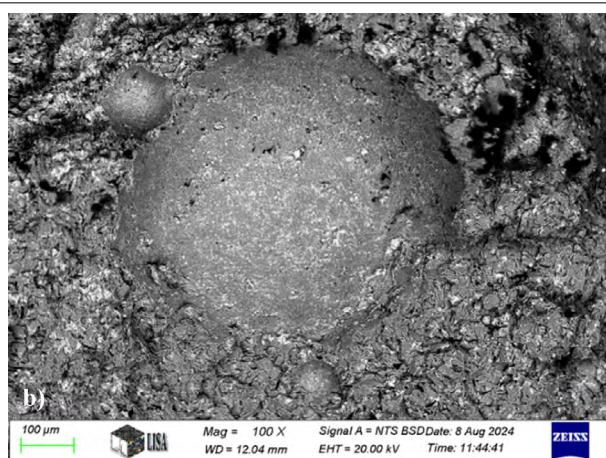
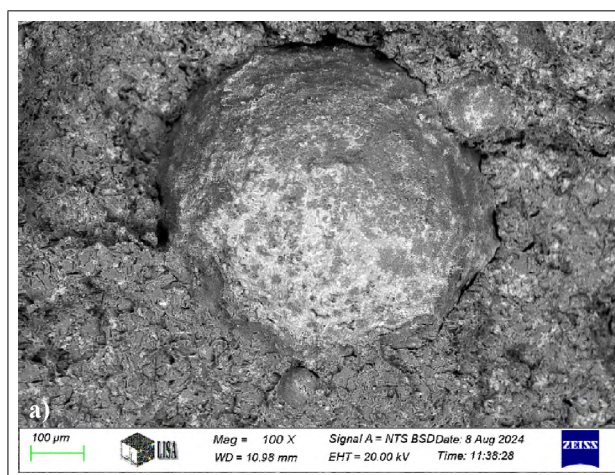
13. ábra. A 8.4A próbatest fénymikroszkópos töretképe és CT-felvételei

4. Összefoglalás

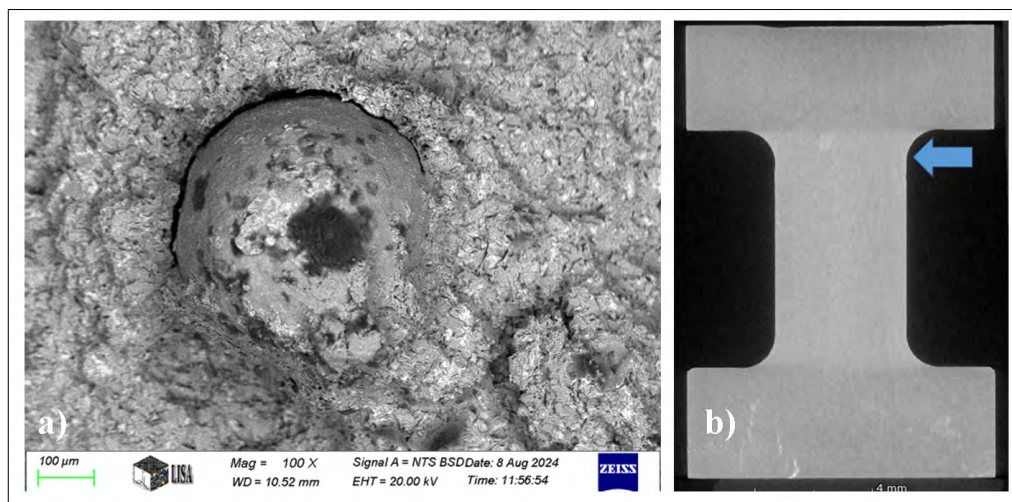
Ipari körülmények között végzett, 1,0 mm/s sebességgel mozgó utántömörítő csappal legyártott minták esetén a porozitás és szakítóvizsgálat eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy az utántömörítő csap korai indítása nem feltétlenül jelentett hátrányt a szövetszerkezet kialakulása szempontjából. A korai indítás ellenére (0,5 s és 1,0 s) az utántömörítő csap megfelelően tudott működni, mert a kis mozgatási sebesség miatt volt idő és lehetőség a megfelelő utántömörítés elvégzésére. A kialakuló gáz és szívódási porozitásokat az utántömörítés során érkező olvadék nagy részben ki tudta táplálni.



14. ábra. A 8.4.A minta töret-SEM-felvételei



15. ábra. A 8.6B minta töretfelületének SEM-felvételei



13. ábra. A 8.4A próbatest fénymikroszkópos töretképe és CT-felvételei

A 16. ábra a 8.10A minta töretét mutatja. Egy olyan gázporozításba bepréselt fémcseppet láthatunk, ahol megfigyelhető a fémes kapcsolat az alapszövettel, a tömörítéssel érkező fém iránya, illetve a gázporozítás félgömb alakú felülete. Ez a hiba a CT-felvételen is azonosítható, ahol a kék nyíl jelöli a szakadás helyét.

Az elvégzett vizsgálatok arra irányultak, hogy a kísérleti gyártás során legyártott öntvények minőségi jellemzőit milyen mérési módszerek alapján lehet számszerűleg összehasonlítani. Bár a próbatestek töretfelületeinek elemzése ebből a szempontból nem

tartozik a kitűzött célok közé, de azok vizsgálata értékes információt szolgáltat a próbatestekkel kapcsolatosan.

- ❑ A szakirodalomnak megfelelően igazolásra került, hogy az utántömörítő csap elmozdulása a várakozásoknak megfelelően változott, azaz a késleltetési idő növelésével csökkent a benyomódási úthossz. Ez annak ellenére is így történt, hogy az utántömörítő csap sebessége kisebb volt az ipari szériagyártás során alkalmazott értékektől.
- ❑ A próbatestek sűrűség és szakítószilárdság mérési eredményei más tendenciát mutattak, mint a szakirodalom alapján várt maximumos eloszlás. Várhatóan a korai (0,5 s) és késői (2,5 s) utántömörítő csap indításainak kellett volna eredményezni a legalacsonyabb értékeket, míg az 1,0 s és a 1,5 s késleltetési idő esetén kellett volna kialakulniuk a legjobb minőségi jellemzőknek. Ezzel szemben a korai indítású, azaz a 0,5 s késleltetéssel legyártott darabok esetén kaptuk a legjobb értékeket.
- ❑ Összeségében elmondható, hogy a sűrűséget illetően 2,0–3,0%-ban tértek el a minták eredményei, valamint a szakítószilárdsági eredmények eltérései sem haladták meg az ~5,0%-ot. Ez azt jelenti, hogy az utántömörítő csap lassú mozgatása sokkal több lehetőséget biztosít a megfelelő késleltetési idő megválasztására.
- ❑ A kismértékű eltérések ellenére a próbatestek töretfelületei jelentős eltérést mutattak a kialakult inhomogenitások tekintetében. A 0,5 s és 1,0 s késleltetésű minta esetén a SEM-felvételeken 10–20 µm-es tartományban fedezhetőek fel az utántömörítés jelei, de ezek nem olyan inhomogenitások, melyek negatívan befolyásolhatnák a mechanikai tulajdonságot. Az 1,5 s és 2,0 s késleltetés esetén már megfigyelhető volt a gázporozítások méreteinek növekedése, míg a 2,5 s késleltetés alkalmazásakor már markánsan voltak jelen a töretfelületen a kialakult gázporozítások. A töretfelvételek alapján a CT-felvételeken is beazonosíthatóak a hibahelyek, melyek jellemzően úgy tudtak kialakulni, hogy a gázporozítás szabályos gömb alakú oxidos felületébe préselődött be az utántömörítés során az olvadék. A kialakult oxidos felület, és a kései indítás során még olvadékállapotban lévő fémfront hőmérséklete viszont már nem volt elég magas ahhoz, hogy azok össze tudjanak hegedni, koherensé tudjanak válni. Az utántömörítés következtében a bepréselt olvadék teljes mértékben felvette a félgömb alakú gázporozítás alakját, emiatt sok esetben a hibahely nem volt azonosítható a CT-analízis során.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Hanon Systems Auto Parts Hungary Kft. rétsági telephelyén dolgozó kollegák önzetlen segítségét a gyártóeszközök átalakításában és a mérések kivitelezésében.

Irodalom

- [1] J. Jorstad, D. Apelian: Pressure assisted processes for high integrity aluminum castings. *Inter Metalcast*, 2 (2008) 19–39. <https://doi.org/10.1007/BF03355420>
- [2] W. Kurz, D. Fisher, M. Rappaz: *Fundamentals of Solidification*. Trans Tech Publications, 1984.
- [3] M. Hamasaki, H. Miyahara: Solidification microstructure and critical conditions of shrinkage porosity generation in the casting process of JIS-ADC12 (A383) alloy. *Mater. Trans.*, 54/7, (2013) 1131–1139. <https://doi.org/10.2320/matertrans.F-M2013806>
- [4] D. M. Stefanescu: *ASM Metals HandBook*, Vol.15 – Casting, ASM International, 1988.
- [5] D. Jenő: *Nyomásos Öntészeti Ismeretek*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [6] D. Künstner: Untersuchung der Wirkung von lokalem Nachverdichten im Druckgießverfahren und Entwicklung einer geeigneten Versuchsform zur Bestimmung optimaler Nachverdichtungsparameter. *Diploma Thesis*, Leoben, 2013.
- [7] F. Peti, G. Strnad: The effect of squeeze pin dimension and operational parameters on material homogeneity of aluminium high pressure die cast parts. *Acta Mariensis. Seria Technologica*, 16/2 (2019) 7–12. <https://sciendo.com/article/10.2478/amset-2019-0010>
- [8] P. Borlepwar, S. Biradar: Study on reduction in shrinkage defects in HPDC component by optimization of localized squeezing process. *Inter Metalcast*, 13/4, (2019) 915–922. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-00295-9>
- [9] H. Peter, K.-P. Tucan: Untersuchung der Einflussgrößen Kühlung, Nachverdichtung und Legierungssparameter auf die Gefügeeigenschaften von Druckgussbauteilen. *Giesserei*, 1 (2017) 26–31.
- [10] Csaba M., Richárd S., Dániel M.: Kettős működtetésű utántömörítés hatása a vastag falú nyomásos öntvény belső térfogati inhomogenitására. *BKL, Kohászati* 5–6 (2020) 5.
- [11] K.-P. Tucan, P. Hofer: Untersuchung des Einflusses lokalen Kühlens und Nachverdichtens auf die Gefügeeigenschaften von Druckgussbauteilen. *Austrian Cooperative Research*. [Online]. Elérhető: <http://www.ogi.at>
- [12] M. Tsuji, T. Nakano, T. Toyoshima: Drive Control Method for a Squeeze Pin. *US 2002/0167104A1*, szabadalom, 2002. november 14.
- [13] X. Niu, M. Anthony, P. Tuzi: High pressure leak tightness improvement by a unique local squeezing process.
- [14] M. Tsuji: Squeeze Pin Control System in Die Casting Machine. *USO05787963A*, szabadalom, 1998. augusztus 4.
- [15] E. S. Kim, K. H. Lee, Y. H. Moon: A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 105/1–2 (2000) 42–48. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00557-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00557-4)

Hulladékká vált autóiipari csatlakozók nemes- és színesfém-tartalmának hasznosítása mechanikai előkészítést követő pirometallurgiai módszerrel

The utilization of the precious and non-ferrous metal content of waste automotive connectors by mechanical pre-treatment and a subsequent pyrometallurgical method

FEHÉR GERGŐ ,

fejlesztőmérnök

ILLÉS ISTVÁN BALÁZS 

kutatás-fejlesztési vezető

Metal Shredder Hungary Zrt., Budapest

@E-mail: istvan.illes@mshungary.com

Az autóiiparban áramvezetésre használt csatlakozók hulladékai értékes másodnyersanyagok lehetnek, hiszen jelentős koncentrációban tartalmaznak aranyat és rézet. A fémvisszanyerés előtt azonban először mechanikai előkészítéssel szükséges az aranytartalmú érintkező tűk nemfém komponensektől való elválasztása, így létrehozva egy aranyban és rézben dús fémkoncentrátumot. A cikkben két módszer hatékonyságát vizsgáltuk meg. Az első esetben a csatlakozókat először kalapácsos shredderben aprítottuk, majd ezt követően mágneses szeparálással sikerült az arany 97,02%-át és a réz 76,16%-át a mágneses termékbe leválasztani. A második módszer során a termokémiai kezelésen is átesett csatlakozókat pofás törőben való előaprítás után, golyósmalomban őrltük tovább, majd szitasoron történő osztályozást követően, az 1 mm feletti anyag jelentette a fémkoncentrátumot, amely tartalmazta a csatlakozókban lévő aranytartalom 99,4%-át. A fémekben dús, 1 mm feletti frakció pirometallurgiai hasznosíthatóságát fémeket feloldó olvasztással vizsgáltuk, oldószerként rézolvadékot alkalmazva. Optimális körülmények mellett a fémkoncentrátum aranytartalmának 99,1%-a oldódott a rézolvadékba, így az ötvözet aranykoncentrációja 0,26 g/kg volt.

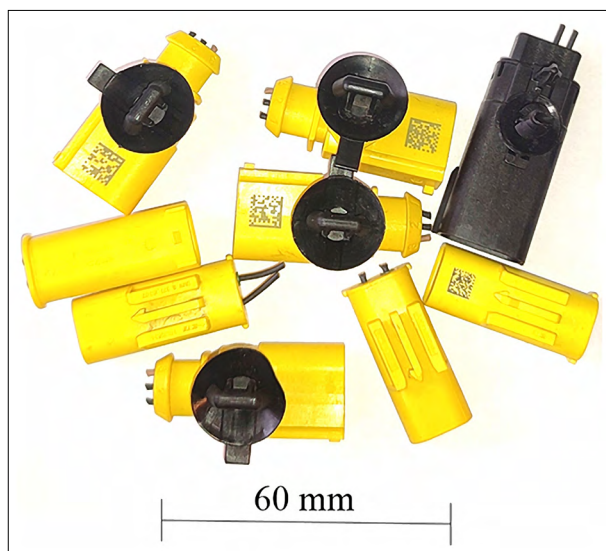
Kulcsszavak: autóiipar, használt csatlakozó, hulladék, másodnyersanyag, fémvisszanyerés

The waste of connectors used for electrical conduction in the automotive industry can be valuable secondary raw materials, as they contain significant concentrations of gold and copper. However, before metal recovery, it is first necessary to mechanically separate the gold-containing contact pins from non-metallic components, thus creating a metal concentrate rich in gold and copper. In this article, we examined the effectiveness of two methods. In the first case, the connectors were first shredded in a hammer shredder, and then magnetic separation was used to separate 97.02% of the gold and 76.16% of the copper into the magnetic product. In the second method, the connectors, which had undergone thermochemical treatment, were pre-shredded in a jaw crusher, ground further in a ball mill, and then classified by sieving. The material above 1 mm constituted the metal concentrate, which contained 99.4% of the gold content in the connectors. The pyrometallurgical utilization of the metal-rich fraction above 1 mm was investigated by metal-dissolving melting using molten copper as the solvent. Under optimal conditions, 99.1% of the gold content of the metal concentrate dissolved into the molten copper, resulting in a gold concentration of 0.26 g/kg in the alloy.

Keywords: automotive industry, used connector, waste, secondary raw material, metal recycling

1. Bevezetés

Az arany, a réz, a nikkel és egyéb ritka fémek felhasználása széles körben elterjedt az elektronikai eszközök gyártásánál, ez az autóiparra fokozottan igaz [1–3]. Az autóipari szektor rohamosan növekszik, ami magával vonja a mobilitást szolgáló eszközök gyártása során keletkező hulladékok mennyiségének növekedését is. Megfelelő kezelés hiányában az elektronikai hulladékok szignifikáns környezeti terhet jelenthetnek. Azonban, a bennük található jelentős nemes- és színesfém mennyiség fontos gazdaságossági alapot teremthet az újrahasznosításuknak, ami a körforgásos gazdaság szempontjából is kiemelten fontos. További fontos szempont, hogy ezek az anyagok gyakran lényegesen nagyobb koncentrációban tartalmaznak értékes fémes elemeket, mint a primer nyersanyagok. A jó minőségű aranyércek aranykoncentrációja mindössze 1–10 g/t-ás értékekkel jellemezhető [4, 5]. A művealó rézércek rézkoncentrációja 5–60 g/t, ami ugyan meghaladja az aranyércek koncentráció értékeit, de a másodnyersanyagokhoz viszonyítva kis érték [6, 7]. Szemben a primer forrásokkal az elektronikai hulladékokban 10–100-szor nagyobb arany- és rézkoncentrációk mérhetők, tehát jogosan tekinthetők értékes másodnyersanyagoknak [8–10]. Noha a lakossági felhasználásból származó elektronikai hulladékok a legelterjedtebbek, kevésbé ismertek az áramvezetésre használt csatlakozók autóipari típusai. Ezek a hulladékok nem csupán az amortizációból, hanem a gyártás során is jelentős mennyiségben keletkeznek, mint selejtes termékek. Az autók gyártása során jelentős mennyiségben van szükség az egyes elektronikai eszközök kommunikációját segítő csatlakozó egységekre. Ezeket a gyártásközi selejtes csatlakozókat illesztjük az 1. ábra.



1. ábra. Nemesfém tartalmú autóipari csatlakozók

Mivel ezek a csatlakozók az autók megfelelő működése szempontjából kiemelt fontosságúak, szigorú minőségbiztosítási szabályok vonatkoznak a megfelelőségre. Ennek következménye, hogy nagy mennyiségű gyártásközi selejt keletkezik. Noha az autók gyártása során sok egyéb más típusú hulladék is keletkezik, a csatlakozók perspektivikus másodnyersanyagnak tekinthetők, hiszen jelentős koncentrációban tartalmaznak olyan értékes nemes- és színesfémeket, mint az arany, a réz és a nikkel. Ezek az elemek „kritikus nyersanyag” státusszal rendelkeznek az Európai Unióban, azaz nélkülözhetetlenek a már meglévő és a jövőben fejlesztett technológiákhoz és az elektronikai, valamint elektronikus berendezések működéséhez [11]. Fontos tény, hogy a jelentős műanyagtartalom miatt a közvetlen fémvisszanyerés nem megvalósítható. Noha evidens lehet, hogy aprítást követően fizikai módszerekkel a műanyag elválasztható a fémes frakciótól, de előfordulhat, hogy a mechanikai előkészítés – azaz az aprítás és a szeparálás – során valamilyen mértékű aranyvesztés lép fel. Ennek oka lehet a fizikai behatás okozta aranyréteg-lepattogás, amelynek hatására az arany a műanyag porral – és egyéb szennyezőkkel együtt – a hulladék-porfrakcióba kerül, amelyből nem nyerhető vissza gazdaságosan. A cikkben alapvetően két módszer hatékonyságát hasonlítjuk össze. Az első módszer során az anyagot aprítjuk, majd elválasztjuk a fémes és a műanyag termékeket. A második módszer alkalmazása során a mechanikai eljárások alkalmazása előtt a másodnyersanyag egy termokémiai kezelésen esik át, amely hatására a műanyagtartalom hőenergiává és elszenesedett vázzá alakul, az arany pedig bediffundál a fémes hordozó fém mátrixába. Ez utóbbi fontos hatás, hiszen az ezt követő fizikai előkészítés során így az aranyvesztés minimalizálható. A két mechanikai előkészítési módszer közül a jobb aranykihozattal rendelkezőnek a koncentrátumával történnek pirometallurgiai hasznosíthatóságot vizsgáló kísérletek.

2. Kísérleti eljárás

A cikkben szereplő csatlakozók vizsgálata eredeti és termokémiai kezelésen átesett állapotban is megtörtént, mindkét anyagáramból 30–30 kg reprezentatív minta lett elkülönítve. A kalapácsos shredderben történő aprítás során a szitabetét 20 mm-es volt. A termokémiai kezelésen átesett csatlakozók előaprítása egy FRITSCH Pulverisette 1 típusú pofás törő segítségével történt 15 mm-es részmérettel. Az ezt követő őrlés során a golyósmalomban az őrlőtestek 20 mm átmérőjű kerámia golyók voltak, összesen 2328 g golyót használva. A kerámia golyósmalom belső átmérője 180 mm, a golyósmalom 1,1 fordulat/másodperces fordulattal volt üzemeltetve, ami 0,514 m/s kerületi

1. táblázat. A csatlakozókban található érték fémek formájában [12, 13]

Elem	Fémek mennyisége 1 tonna autóiipari csatlakozóban [kg]	Fémek ára [Ft/kg]	Érték 1 tonna anyagban [Ft]	Érték megoszlása [%]
Au	0,1809	35 617 400	6 443 188	95,33
Cu	75,1411	3 580	269 005	3,97
Fe	22,8999	139	3 182	0,04
Zn	12,8646	1 069	13 752	0,20
Ni	2,5633	5 910	15 149	0,22
Sn	1,3403	12 312	16 502	0,24
Σ	–	–	6 760 778	100

sebességet jelent. A malomban az anyag minden kísérletnél 30 percet töltött el.

A csatlakozókból és a termokémiaiilag kezelt csatlakozókból anyagvizsgálatai célra vett mintákat királyvízben 1 órán keresztül 90 °C-on melegítettük, hogy a fémes fázis teljes mértékben feloldódjon. Az így kapott savas oldatokat láng-atomabszorpciós spektrometriával elemeztük egy Varian SpectrAA 300 típusú berendezéssel. Emellett az anyagvizsgálat során energiadisperzív röntgenfluoreszcens módszerrel is végeztünk méréseket egy Rigaku NecQX asztali spektrométert használva.

A pirometallurgiai olvasztási kísérleteket agyag-grafit téglában 1250 °C-on végeztük egy Indutherm MC 100 típusú vákuumindukciós kemencében. Az olvadékat vastag grafitkokillába csapoltuk, majd megszilárdulás után az öntecs azonnal kiszedtük, és vízsugárban történt a lehűtése, így a gyors hőelvonás hatására az öntecsek összetétele viszonylag homogén lett. A fémöntecsekből forgácsolással vett mintát először EDXRF készülékkel, majd savas oldást követően atomabszorpciós módszerrel is analizáltuk.

3. Mechanikai előkészítés

A cikkben először a műanyagtartalmú csatlakozók mechanikai előkészítését és elválasztását mutatjuk be, majd ezt követi a termokémiai kezelésen átesett anyag feldolgoása.

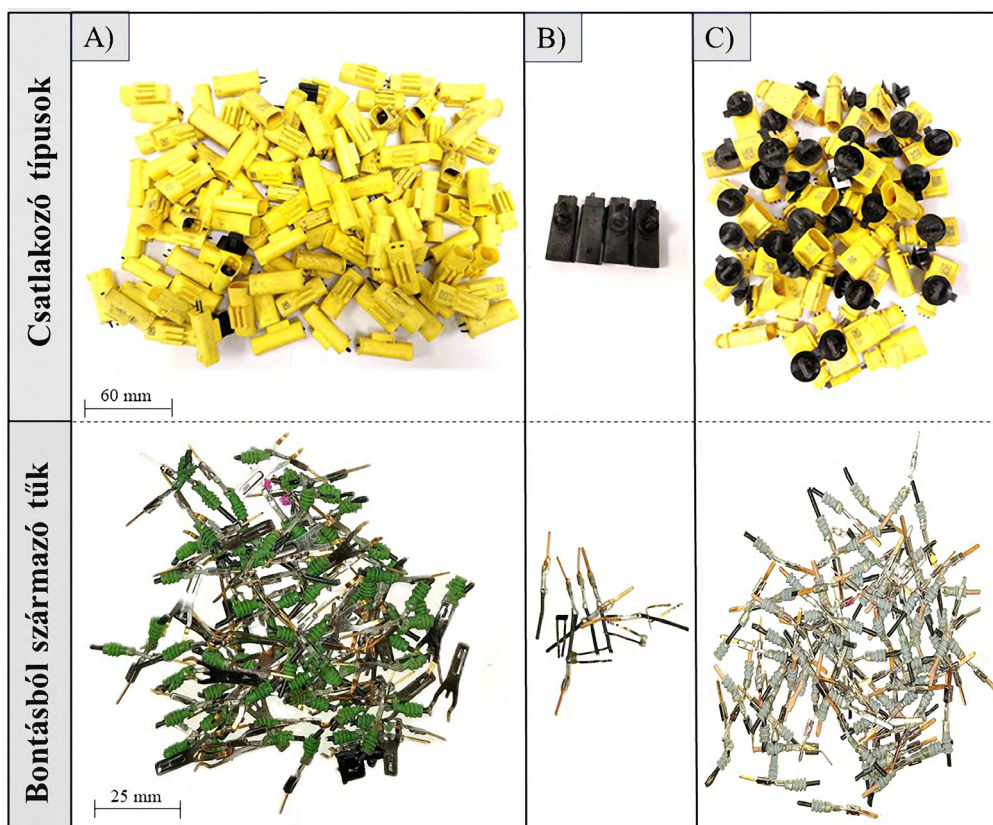
3.1. Előkezeletlen csatlakozók mechanikai előkészítése

A 1. táblázatban az autóiipari csatlakozókban lévő fémek mennyiségét, értékeiket és azok megoszlását láthatjuk – 1 tonna autóiipari csatlakozóban közel 7 millió forint a fémes elemek értéke. Látható továbbá, hogy az érték több mint 95%-át az arany adja, további ~4% ot pedig a réz. Az egyéb fémek lényegesen kisebb mennyiségben vannak jelen. Noha a cink, a nikkal és az ón széles körű felhasználási területtel rendelkező értékes fémek, a csatlakozókban találha-

tó kis mennyiségük miatt jelentős gazdasági hasznot nem jelent a kinyerésük. A táblázatban szereplő fém-koncentráció-értékek savas feltárást követő atomabszorpciós spektrometriával lettek meghatározva. A táblázatban a fémek ára a 2025. 02. 26. napi árfolyam-értékei [12, 13].

A mechanikai előkészítést megelőzően fontos megvizsgálni az anyag fizikai tulajdonságait és kémiai összetételét, hiszen az anyagjellemzők alapján választható ki a megfelelő mechanikai eljárás. A csatlakozók először egyesével, kalapáccsal lettek szét törve, hogy a bennük lévő nemesfém tartalmú tűk megvizsgálhatóak legyenek. A kézi bontás során azt tapasztaltuk, hogy a csatlakozók műanyag házát üvegszál-erősítésű szívos műanyagból gyártották. Ebből következik, hogy a csatlakozók mechanikai feltáráshoz nem elégséges csak az ütő igénybevétel, hanem nyíró igénybevételre is szükség lesz. Ezek alapján a kalapáccsos shredder alkalmas lehet a csatlakozók aprítására és a benne rejlő érintkező tűk feltárára. A műanyag házból való eltávolítás után a tűket EDXRF készülékkel vizsgáltuk meg, hogy információt nyerjünk a tűket felépítő anyagokról. Az anyagot háromfajta csatlakozó alkotja, amelyek a 2. ábrán láthatóak. Ezek a csatlakozók kétféle aranytartalmú érintkező tűt tartalmaznak, az egyik típusú tű saválló acélból, a másik típusú tű pedig sárgarézből készült, mindkettő felületén aranybevonat található. A sárgarézből készülő tűn található egy saválló acéldarabka is, amely a szilárdságát biztosítja. Továbbá mindkét típusú tűn található egy ónozott vörösréz kábel a végükre forrasztva.

Mivel minden érintkező tű tartalmaz valamilyen formában mágnesezhető, saválló acélt is, az aprítást követő szétválasztás kivitelezhető mágneses szeparátorral. Ennek alapfeltétele, hogy érintkező tűkön az aprítás után is rajta maradjon a szeparálást lehetővé tevő saválló acéldarabka. Tehát a kalapáccsos shredder szitabetétjének kiválasztása kulcsfontosságú a hatékony elválasztás szempontjából. Figyelembe véve a csatlakozókban lévő érintkező tűk méretét, a 20 mm-es lyukbőségű szitabetét alkalmazása tűnt a legelő-

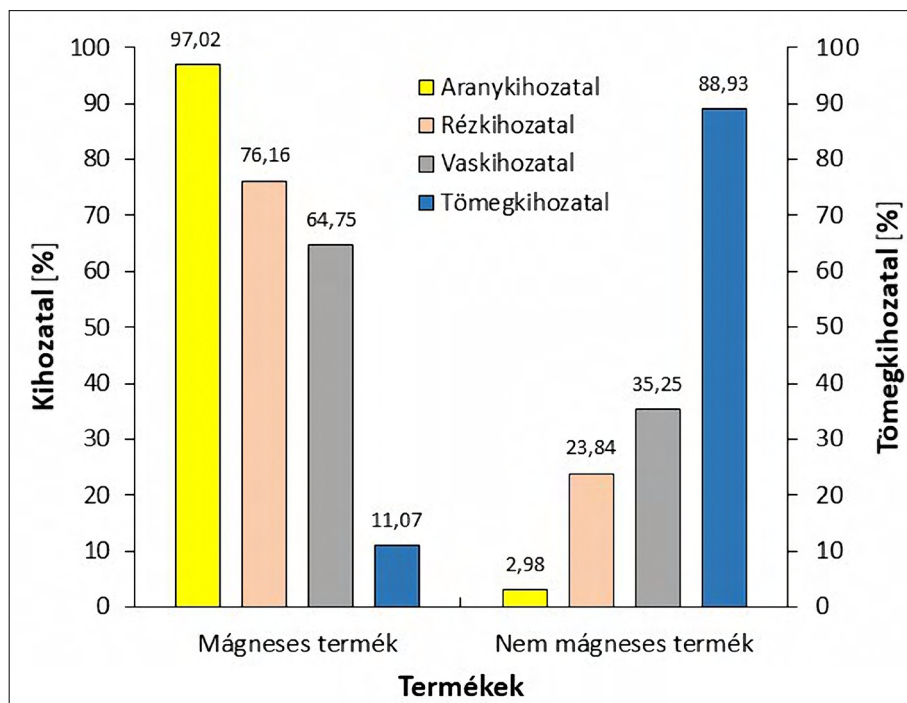


2. ábra. Az autóiipari csatlakozók és az ezekben található érintkező tűk

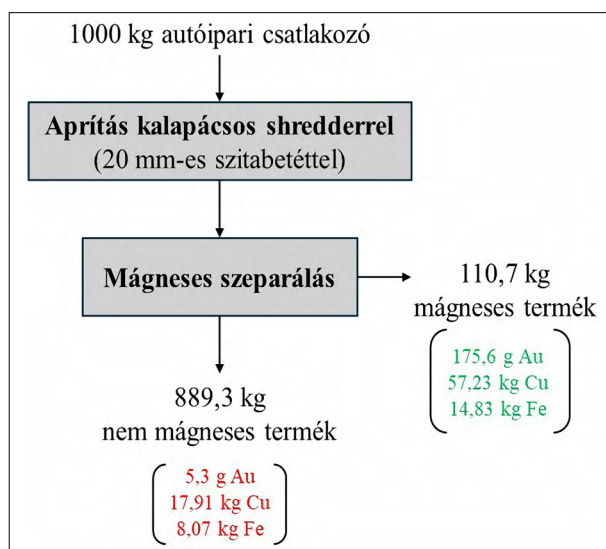
nyösebbnek. További cél volt aprítást követően, egy aranyban és rézben dús mágneses termék, valamint egy műanyagban dús nem mágneses termék létrehozása. A 3. ábrán a mágneses és nem mágneses termék tömeg- és fémkivonatai láthatók.

lepattogott finom arany szemcsékből és a mágneses szeparálás során sikertelenül elválasztott tűkből származik, míg a réztartalom főleg a csatlakozók tövében

lévő kábelekből kiesett finom rézdrótokból eredően van jelen. A 4. ábrán látható az eljárás anyag-anyagmérleg diagramja 1000 kg feldolgozott anyagra vonatkoztatva. A mágneses termékben jelentős az arany dúsulása, az eredeti anyaghoz viszonyítva közel 10-szeres az aranykoncentráció. A nem mágneses termék zömében műanyag törmelékből áll, a benne lévő fémes érték – mivel gazdaságosan nem nyerhető vissza – elveszett. Továbbá a jelentős mennyiségű műanyag elszállítása és deponálása nagymértékben növelheti az anyag feldolgozási költségeit. Tehát az eljárás ugyan hatékonyan képes



3. ábra. Autóiipari csatlakozók kalapácsos shedderben történő aprítását követő mágneses szeparálás fém- és tömegkivonatai

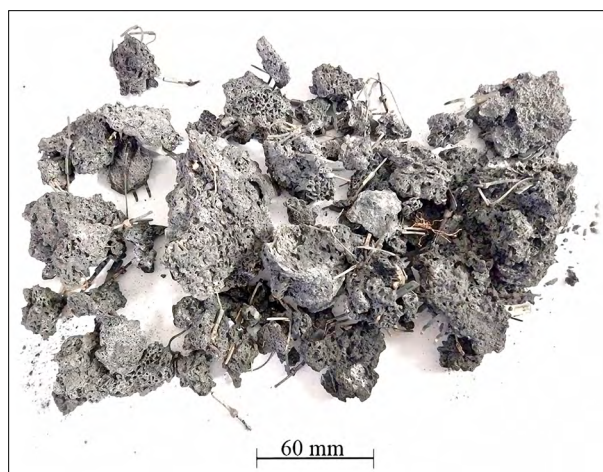


4. ábra. A csatlakozók feldolgozásának anyagáram-
anyagmérleg diagramja

az aranytartalmú érintkező tűk műanyagtól való elválasztására, és az aranyvesztés ugyan csekély, de jelentős mennyiségek feldolgozása esetén ez a 2,98%-os aranyvesztés akár komoly érték deponálását is jelentheti. Az eljárás további hátránya a nagy mennyiségben képződő, anyagában nem hasznosítható műanyag hulladék.

3.2. Termokémiailag kezelt csatlakozók mechanikai előkészítése

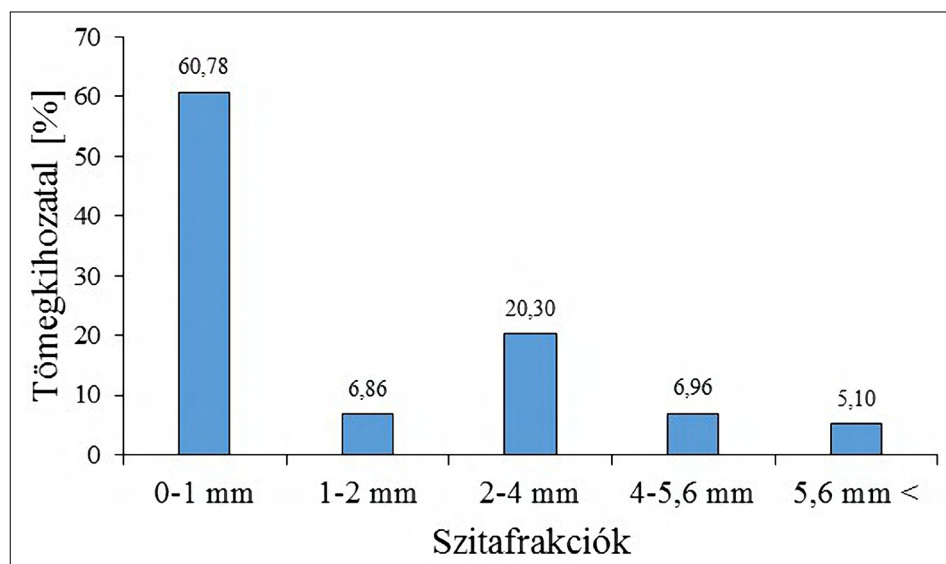
A termokémiailag kezelt anyag (5. ábra) esetében egy elszenesedett váz tartalmazza az aranytartalmú érintkező tűket. Azonban itt az arany már nem a tűk felületén található, hanem a termokémiailag kezelés során fellépő hő hatására beötvöződik az érintkező tűk anyagába.



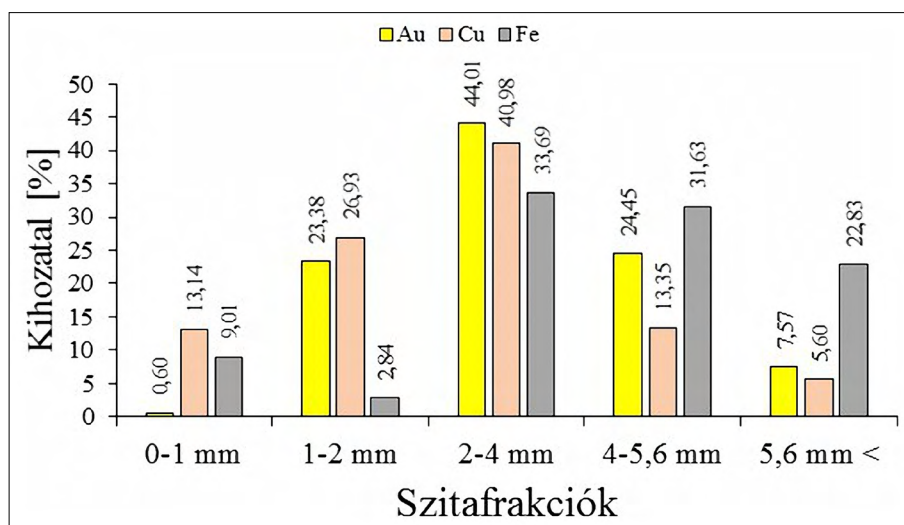
5. ábra. Termokémiailag kezelt csatlakozók

Mivel az anyag vázát egy könnyen málló, porózus szerkezetű anyag alkotja, amely nyomó és üto igénybevétel hatására is könnyen aprítható, fő igénybevételként nyomást és ütést alkalmazó berendezések alkalmazásával valószínűleg szelektív aprítás érhető el. Az elválasztása pedig könnyedén kivitelezhető szemcseméret szerinti osztályozással. Mivel az anyagban található nagyobb darabok, rögök is, ezért szükséges az anyag előaprítása. Ez hatékonyan kivitelezhető pofás törővel, hiszen a berendezésben fellépő fő igénybevétel a nyomás. Az előaprítás után a szelektív őrlés hatékony lehet golyósmalommal, hiszen a fellépő fő igénybevétel az ütés, ami kevésbé van hatással az érintkező tűkre, annál inkább az elszenesedett vázra. Az őrlés osztályozása megvalósítható szitassal. Az anyag feldolgozása az előbb említett logika alapján történt meg.

Ahogy az a 6. ábrán látható, a méret szerinti osztályozás során az anyag 5 szitafrakcióra lett szétválasztva. Az 1 mm feletti szitafrakciók zömében fém



6. ábra. A szitafrakciók tömegihozatalai



7. ábra. A szitafrakciók fémkihozatalai

komponenseket tartalmaznak, az elszenesedett váz legnagyobb része pedig az 1 mm alatti frakcióba került. Az anyag tömegének legnagyobb része, majdnem 61%-a finom por formájában az 1 mm alatti szitafrakcióba került leválasztásra. Ennek oka, hogy az elszenesedett váz a szelektív aprítás hatására finom porrá őrlődött, az aprítási igénybevétel az érintkező tűkre viszont nem volt jelentős hatással.

A 7. ábra az arany, a réz és a vas kihozatalait tartalmazza a különböző szitafrakciókban. Az aranyak mindössze 0,6%-a kerül az 1 mm alatti szitafrakcióba, 99,4%-a pedig az 1 mm feletti.

és fémkihozatalok alapján az anyag 1 mm-nél történő elválasztása tűnik optimálisnak, így az arany 99,4%-a az 1 mm feletti termékbe kerül és hulladékporként leválasztható a teljes anyag tömegének a 60,78%-a.

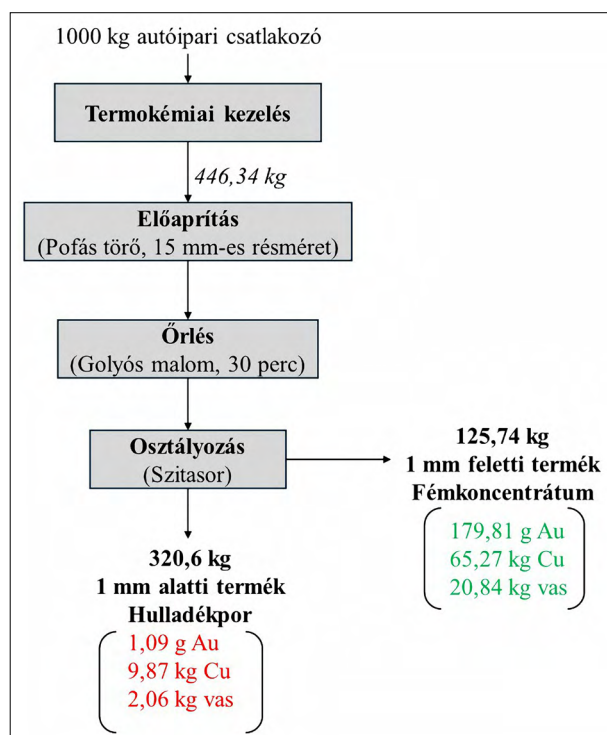
A 8. ábrán látható az eljárás anyagáram-anyagmérleg diagramja 1000 kg feldolgozott anyagra vetítve.

Látható, hogy a termokémiai kezelés hatására az anyag tömegcsökkenése 55,37%, ez teljes mértékben a műanyagtartalom átalakulása miatt lép fel. Ezáltal a fémek feldúsulnak, illetve az aprító és osztályozó berendezéseknek kevesebb anyagot kell feldolgozniuk. Tehát a mechanikai előkészítési fázis energiaigénye kisebb lehet, szemben az előkezeletlen csatlakozókéval. A golyósmalommal történő őrlés után szitálással elválasztott anyag tömegének 60,78%-a leválasztható 1 mm alatti hulladékporként. Az 1 mm feletti termék a koncentrátum, amelynek az aranykihozatala 99,4%. A módszert összehasonlítva az előző eljárással megállapítható, hogy ez a módszer nagyobb arany- és rézkihozattal rendelkezik. Ennek oka, hogy az arany beötvöződött az érintkező tűk anyagába. A módszer további előnye, hogy a termokémiai kezelés során képződő hőenergia – megfelelő technológia alkalmazása esetén – akár hasznosítható is. Ezenfelül a nagy mennyiségű, anyagában hasznosíthatatlan műanyag hulladék keletkezésével sem kell számolni. Azonban potenciális hátrány a füstgáztisztítás szükségessége.

Az elválasztott anyag 1 mm feletti része alkotja a koncentrátumot, amely összetétele a 2. táblázatban szerepel.

2. táblázat. Az 1 mm feletti szitafrakciók releváns fémkoncentrációi

Elem	Cu	Au	Fe
Koncentráció (g/kg)	519	1,43	165,72



8. ábra. A termokémiaileg kezelt csatlakozók mechanikai feldolgozásának anyagáram-anyagmérleg diagramja

Látható, hogy az így létrehozott koncentráció már jelentős, 1,43 g/kg aranykoncentráció-értékkel rendelkezik. A fémkoncentráció metallicitása nagy, tehát kémiai-metallurgiai hasznosításra alkalmas nyersanyagként tekinthető. Szemben a műanyag csatlakozók feldolgozásával, a meddő anyag tömege viszonylag kicsi, csupán 211 kg.

Fontos azonban megvizsgálni, hogy mi a maradványanyag összetétele, hiszen a deponálás helyetti hasznosítás mind környezetvédelmi, mind pedig gazdasági szempontból is preferált. A 3. táblázat mutatja a porfrakció összetételét.

3. táblázat. Az 1 mm alatti szitafrakció kémiai összetétele

Elem/Vegyület	m/m %	Meghatározás módja
Nedvességtartalom (H ₂ O)	1,34	Szárítás (105 °C)
C	30,58	Izzítás (800 °C)
Cu	4,95	XRF
Zn	3,25	XRF
Ni	0,00	XRF
Fe	1,28	XRF
Sn	0,46	XRF
Al	5,54	XRF
Si	22,75	XRF
S	0,05	XRF
K	0,49	XRF
Ca	24,21	XRF
Ti	3,85	XRF

Az anyag nedvességtartalma kicsi, karbontartalma viszont jelentős. Látható továbbá, hogy a C mellett a fő alkotók a Ca és a Si, utóbbiak valószínűleg CaO, SiO₂ és CaSiO₃ formájában vannak jelen. Mivel a kohászati folyamatokban a leggyakrabban alkalmazott redukálószer a karbon, a leggyakoribb salakképzők pedig a CaO és SiO₂, az anyag a fémelőállító iparban hasznosíthatónak tűnik [14]. Noha a viszonylag nagy réztartalom valamelyest korlátozza a por vaskohászati célokra való felhasználását, a vas- és acélgyártási volumeneket figyelembe véve szinte eltörpül ennek az anyagnak a mennyisége, így megfelelő mennyiségben bekeverhető a vaskohászati betétanyagokba, akár a nagyolvasztó vagy elektroacél-gyártó ívkemence elegyébe [15]. Ugyanakkor a fémkohászati oxidos anyagok (mint például réz salakok) karbotermikus redukációjához is hasznos alapanyag lehet, amennyiben kvarcos pótlékkal megfelelően be van állítva a salak bázicitása [16].

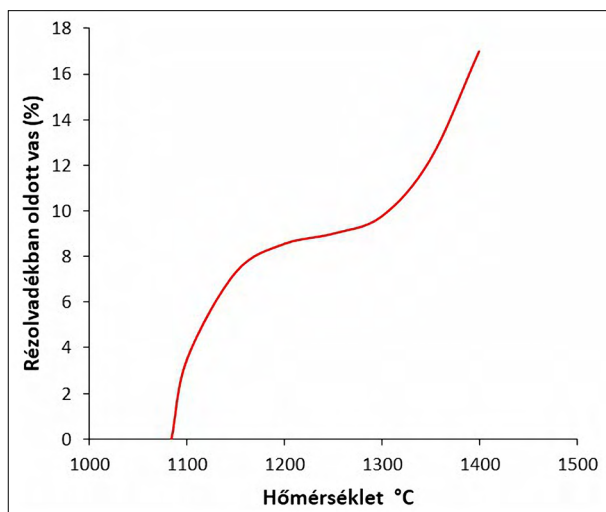
Saját kísérletekkel is igazoltuk, hogy a porfrakció hatékony lehet ipari réz-oxid vagy oxidos ónsalakok karbotermikus redukációjára, amennyiben a karbon-salakfolyósító-hulladékpor arány megfelelően be van állítva. Így elmondható, hogy a porfrakció nem hulladék, hanem hasznosítható termék.

4. Fémkoncentráció pirometallurgiai hasznosítása

A koncentráció közvetlen hidrometallurgiai úton történő aranyvisszanyerésre nem alkalmas, hiszen a nagy tömegű vasas fémátlós szolubilizációja jelentős mennyiségű hulladékoldat keletkezésével járna. További hátrány a réz értékének elvesztése, mivel a nagy vastartalom miatt a réz katódos redukciója nem lehet hatékony. A pirometallurgiai feldolgozás azonban perspektivikus opció, hiszen a fémeket feloldó olvasztás is hatékony szolubilizációs módszer. Savas oldatok alkalmazása helyett a rézolvadék jó oldószer lehet, ugyanis az arany és a réz – az olvadáspontok felett – korlátlanul elegyednek egymással. Ebben az esetben az olvasztás terméke egy rézbázisú nemesfém ötvözet, amely hatékonyan visszajártható a klasszikus oxigénkonverteres és elektrolitikus raffináláson alapuló kohászati vertikumokba. Noha az arany rézolvadékban jól oldódik, figyelembe kell venni, hogy a koncentráció jelentős mennyiségű vasat tartalmaz, és az arany egy része a vasötvözetben oldott állapotban van jelen. Ezért első lépés a vas oldhatóságának vizsgálata volt, amelyet a FactSage program segítségével számítottuk ki. Az eredmények a 9. ábrán láthatók.

A fémkohászatban gyakran alkalmazott tűzálló anyagokat is figyelembe véve az optimális olvasztási hőmérséklet-tartomány az 1200–1300 °C. Ebben a tartományban 8–10% Fe képes oldódni a rézolvadékban. Figyelembe véve az említett tényezőket, az olvasztási hőfokot 1250 °C-nak választottuk meg. A rézbázist 99% tiszta finomítási rézgranulátum adta, ehhez lett hozzáadva a fémkoncentráció. Ezek alapján szükséges volt olyan kísérleteket végezni, amelyekkel meghatározhatjuk a rézgranulátóhoz – még jó aránykihozattal adó – maximálisan adagolható fémkoncentráció mennyiségét. Az olvasztást indukciós kemencében végeztük a gyors, lényegében oxidációmentes hatékony beolvasztás érdekében. Először az olvasztással nyert öntecsek kémiai összetételét vizsgáltuk meg, ez látható a 4. táblázatban.

Noha az aranykoncentráció folyamatos növekedést mutat nagyobb fémkoncentráció mennyiségek hozzáadása mellett is, megfigyelhető, hogy 29,08%-nál több anyag beadása esetén már nem lineáris a növekedés. Ez igaz a vaskoncentrációra is. Tehát feltételezhető, hogy a vasoldódás nem hatékony, így az aranyhozam is csökken. Ezt támasztja alá a 10. ábrán



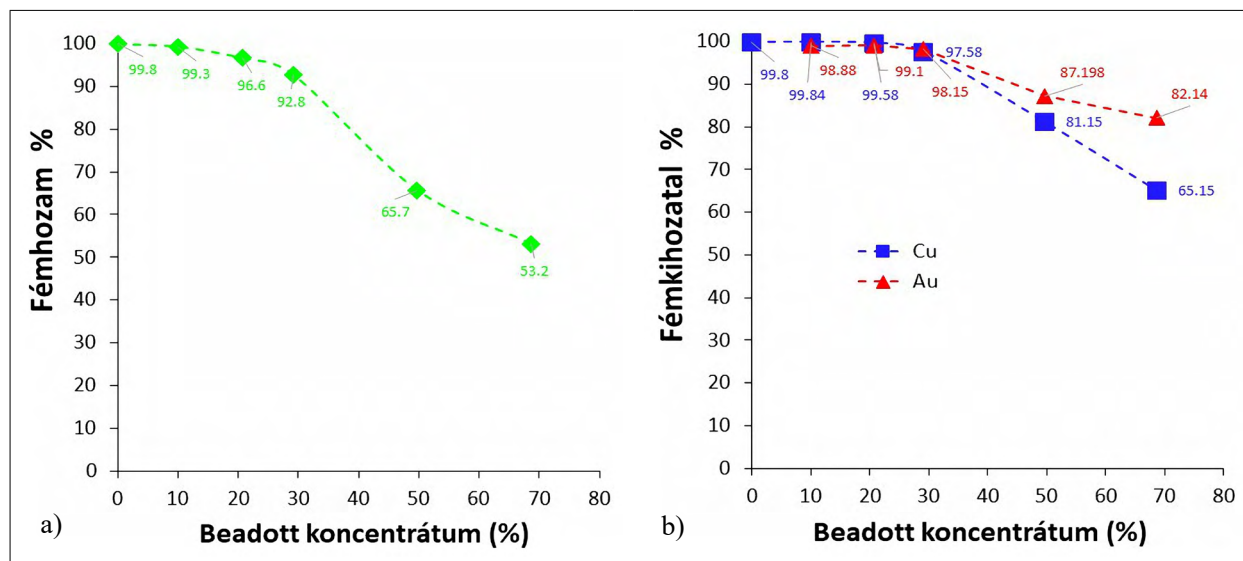
9. ábra. A vas oldhatósága a réz tőzzel folyó oldatában a hőmérséklet függvényében

látható fémhozamvizsgálat eredménye is. Továbbá a csatlakozókból származó arany és réz kihozatalai is egyaránt drasztikus csökkenést mutatnak, amikor már több mint 30% koncentrátum került a rézgranáliához.

Noha a 9. ábra alapján a 4% oldott vaskoncentráció önmagában nem indokolja a kihozatal csökkenését, az egyéb szennyező elemek miatt a vas oldhatósága kisebb lehet, mint a tisztán Cu-Fe rendszerben elérhető egyensúlyi koncentrációk. Ahogy a rézolvadék telítődik vassal, az aranytartalmú vasötözet érintkezők felületén kialakulhat egy rézdús intermetallikus vegyülettég, amely héjként akadályozza az egyéb elemek oldódását. Noha ilyen magas hőmérsékleten az aranydiffúzió jelentős sebességgel lehet képes akár a szilárd anyagból is az olvadékba szállítani a nemesfémeket, a folyékony fázis nagy aranykoncentrációja csökkentheti a folyamat termodinamikai hajtóerejét. Ugyanezen a hőmérsékleten króm-réz intermetallikus vegyület képződésével nem kell számolni, a jelentős krómkoncentráció hátrányos lehet, mivel csökkentheti az adott hőmérsékleten beoldható vasmennyiséget, illetve a rézolvadékba való lassabb oldódása is kinetikai gátat szabhat. Ezenfelül a koncentrátumban található az elszenesedett vázból is. Megfigyelés alapján elmondható, hogy ezt a szén-kerámikus vázat a rézolvadék viszonylag rosszul nedvesíti, illetve folyó-

4. táblázat. A fémkoncentrátum rézgranáliával való összeolvasztása során nyert öntecsek kémiai összetételei

Elem	Beadagolt koncentrátum (%)					
	0	9,92	20,66	29,08	49,66	68,62
	Koncentráció, g/kg					
Cu	>999	966	956	944	925,8	921,1
Au	<0,01	0,096	0,172	2,58	0,324	0,357
Fe	<0,01	14,3	20,3	30,7	38,4	41
Zn	<0,01	10,5	13,5	16	31,1	39
Sn	<0,01	0,481	1,95	2,04	2,24	3,24
Cr	<0,01	0,89	1,87	2,71	3,01	3,11
Mn	<0,01	0,18	0,3	0,6	0,978	1,24



10. ábra. A koncentrátum teljes olvasztási fémhozama (a), valamint arany- és rézkihozatalai (b)

sító pótlékok hiányában 1250 °C-on csupán sűrű viszkózus masszát és nem az olvasztási folyamatoknak kedvező híg folyós salakolvadékot alkot. Így a salakban lévő kis fémcseppek nem képesek a fémfűrdőbe kerülni, ami szintén negatív hatással lehet az olvasztási kihozatalokra.

Ezek alapján megállapítható, hogy az elegyben maximum 29% koncentrációt-hozzáadás esetén a fémhozam és az aranykihozatal is kedvező. Az olvasztási idő növelésével és folyékony salakfázis alkalmazásával a maximálisan hozzáadható koncentrációt mennyisége valószínűleg jelentős mértékben megnövelhető, azonban ez további kísérletek elvégzését igényli.

5. Összefoglalás

Mivel a gyártásból kikerült selejtes autóiipari csatlakozók egy tonna anyagra vonatkoztatva 180,9 g aranyat és 75,14 kg rezet tartalmaznak, ezért értékes másodnyersanyagnak tekinthetők. Azonban a nemesfém tartalmú tüket tömegarányosan nagy mennyiségű műanyag ház veszi körül, így nem alkalmasak közvetlenül kohászati feldolgozásra. Ezért először mechanikai előkészítéssel szükséges a műanyag és egyéb – a metallurgiai műveleteket akadályozó – anyagok elválasztása az értékes fém komponensek mellől, így előállítva egy fémkoncentrátumot. Két módszer alkalmazását vizsgáltuk meg. Az első esetben a csatlakozókat 20 mm-es szitabetéttel ellátott kalapácsos shredderben aprítottuk, majd ezután mágneses szeparálással választottuk el a műanyagot az aranytartalmú érintkező tüktől. Így a mágneses termék tömegkihozatala 11,07%, az aranykihozatala pedig 97,2% volt. A második módszer esetében termokémiai kezelésen átesett anyaggal történtek az eljárás technikai vizsgálatok. Ebben az esetben a csatlakozókat 15 mm-es résméretre beállított pófás törőben előaprítottuk, majd golyósmalomban őrlöttük. Az őrléményt szitasorral osztályoztuk. Az eredmények alapján az anyagot 1 mm-nél optimális elválasztani, így a fémkoncentrátum aranykihozatala 99,4% míg a rézkihozatala 86,86% volt. Az így kapott fémkoncentrátum pirometallurgiai hasznosítását fémeket feloldó olvasztással vizsgáltuk meg. A rézolvadék tömegéhez viszonyítva a maximum 29%-ban hozzáadott koncentrátum esetében az arany kihozatala 98,15% volt. Nagyobb mennyiségek beolvasztása során már lényegesen kisebb kihozatal volt elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton köszönik meg a mechanikai előkészítésben nyújtott segítséget dr. Mádainé dr. Üveges Valériának, a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar docensének. Továbbá há-

lával tartoznak a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetéhez tartozó Extrakciós Hidro-elektrometallurgiai Labor vezetőjének, prof. dr. Kékési Tamásnak.

Irodalom

- [1] M. Bigum, L. Brogaard, T. H. Cristensen: Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207–208 (2012) 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.001>
- [2] M. D. Rao, K. K. Singh, C. A. Morrison, J. B. Love: Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. *RSC Adv.*, Issue 8 (2020) 4300–4309. <https://doi.org/10.1039/C9RA07607G>
- [3] H. Kumar, S. Kumagai, Y. Saito, T. Yoshioka: Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables. *Waste Management*, 174 (2024) 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.012>
- [4] J. P. Sykes, S. Ulrich, M. Kanakis, D. I. Groves, S. Hagemann, A. Trench: Is grade king in gold? A preliminary analysis of gold production cost at Australian and New Zealand mines. In: *AusIMM New Zealand Branch Conference*, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34082.43200>
- [5] M. D. Adams: Overview of the gold mining industry and major gold deposits. In: *Gold Ore Processing*, New York, Elsevier, 2016, pp. 25–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00002-5>
- [6] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, A. Valero: Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality. *Resources*, 5/4 (2016) 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>
- [7] Resources and technology: World copper resources. <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8808/880807.PDF>
- [8] A. Cesaro, A. Marra, K. Kuchta, V. Belgioirio, E. D. van Hullebusch: WEEE management in a circular economy perspective: An overview. *Global NEST Journal*, 20/4, (2018) 743–750. <https://doi.org/10.30955/gnj.002623>
- [9] M. S. Sodhi, B. Reimer: Models for recycling electronics end-of-life products. *QR Spectrum*, 23/1, (2001) 97–115. <https://doi.org/10.1007/PL00013347>
- [10] C. Hagelüken, C. Corti: Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through ‘Design for Recycling’. *Gold Bulletin*, 43/3 (2010) 209–220. <https://doi.org/10.1007/BF03214988>
- [11] M. Takano, S. Asano, M. Goto: Recovery of nickel, cobalt and rare-earth elements from spent nickel-metal-hydride battery: Laboratory tests and pilot trials. *Hydrometallurgy*, 209/1 (2022) 105826. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105826>
- [12] London Metal Exchange: <http://www.lme.com>
- [13] Goldprice: <http://www.goldprice.org>.
- [14] F. Ottó: *Nyersvas-metallurgia*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1989.
- [15] S. László: *Elektroacél-gyártás*. Budapest: Magyar Vas- és Acélpári Egyesülés, 1990.
- [16] M. E. Schlesinger, K. C. Sole, W. G. Davenport, G. R. F. Alvear Flores: *Extractive Metallurgy of Copper*. New York: Elsevier, 2011. ISBN: 9780128219034

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 folyóirattikké, 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.

Rudabánya talajgeokémiai elemzéseinek statisztikai elemzése az Au–Ag eloszlások és elemkapcsolatok tisztázásához

MOHAMED ORABY, FÖLDESSY JÁNOS

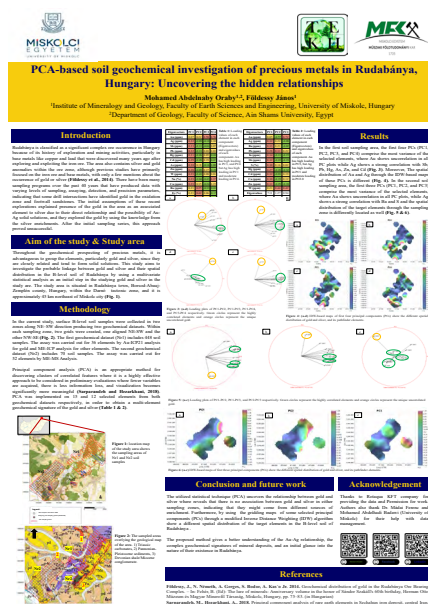
Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar,
Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Miskolc

A poszter a A poszter a 25. ISZA (Nagybörzsöny) konferenciára készült

A rudabányai ércek magas Ag-értékei régóta ismertek voltak, az aranytartalomra csak néhány szórványos elemzési adat és ásványtani leírás utalt. Az 1999-ben közzétett Carlin aranyra összpontosított országos geokémiai mintavételi program Rudabánya kiemelt pontenciálját jelezte. Ennek tisztázására az itt bemutatott vizsgálatban két, az egykori vasérces külfejtések északi és déli folytatásában vett B-szinű talajgeokémiai mintasorozatot és a mélyfúrások geokémiai adatait értékeltük statisztikai eszközökkel. A két sorozat különböző területeken, kissé eltérő feltérési és ICP elemzési technológiával készült.

Az eredményeket röviden összegezve:

- ❑ A két talajgeokémiai mintaterület középtértékei az Au és Ag elemekre eltérőek, bár a több-elemes korrelációs kapcsolatok mindkettőben hasonlóak mind az arany, mind az ezüst megoszlása esetében.
 - ❑ Az arany nem mutat korrelációt egyetlen egyéb vizsgált elemmel sem a talajmintákban.
- A Ba, Mn, Fe, Mo és Hg elemekkel gyenge korrelációt mutat a fúrásmintákban.
- ❑ Az ezüst mindegyik adatkészletben erős korrelációt mutat a Pb, Hg, Sb, Cd elemekkel mindenütt, ezenfelül az As, Zn, Cu, Na és W együttesével az 1. sz., Ba, In és S együttesével a 2. területen.
 - ❑ A fúrási mintákban az elemzések maximum-értékei nagyságrenddel magasabb, mint a talajértékeké.
 - ❑ A magas aranyértékek a mélyfúrási anyagban a korábban nemesfémre nem elemzett krémpát kőzetváltozatokban, a Bódvaszilasi Homokkő Formáció és a Szini Márga Formáció határán jelentkeztek.
 - ❑ Ez további, eddig ismeretlen új kutatási lehetőségeket körvonalaz a Rudabánya környezeteiben eddig már megismert sziderit, barit, réz, ólom, cink, ezüst ércesedések mellett.



Szerzői életrajzok

FEHÉR GERGŐ  okleveles bányamérnök, jelenleg a Metal Shredder Hungary Zrt.-nél dolgozik fejlesztőmérnök pozícióban. 2022-ben környezetmérnökként, a hulladékgazdálkodás specializáción végzett BSc-képzésen, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán. Ezt követően 2024-ben Bánya- és geotechnikai mérnöki MSc-képzésen a nyersanyagelőkészítés specializáción szerzett kitüntetéses mesterdiplomát.

ILLÉS ISTVÁN  okleveles kohómérnök, anyagmérnöki BSc- és kohómérnöki MSc-diplomáját a Miskolci Egyetem Anyagtudományi Karán szerezte, ahol jelenleg végzős PhD-hallgató. A Metal Shredder Hungary Zrt.-nél kutatás-fejlesztési vezető beosztásban dolgozik. Közel egy évtizede foglalkozik a fémkohászattal, azon belül főleg a hulladékokból történő fémkinyeréssel. Kezdetben az alumíniumsalakok forgódobkonverter-kemencében való feldolgozásának optimalizálása volt a kutatási témája. Ezt követően a különféle színes- és ritkafémek elektronikai hulladékokból történő hidro-elektrometallurgiai kinyerésével és tisztításával foglalkozott. Jelenleg a Li-ion akkumulátorok újraháznosítása és az elektronikai hulladékokból történő nemesfémkinyerés területein dolgozik.

KAZUP ÁGOTA 2020-ban kohómérnökként végzett, az akkor még Műszaki Anyagtudományi Karon (ME). Jelenleg a Kerpely Antal Anyagtudományok és technológiák Doktori Iskola doktorandusza. Kutatását az anyag-informatika tématerületen végzi, ahol az öntvények pórusszerkezete és a mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatot vizsgálja. Emellett a Miskolci Egyetemen a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet tudományos segédmunkatársa.

DR. MERTINGER VALÉRIA 2018-ban DSc-fokozatot szerzett. A Miskolci Egyetem Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének intézetigazgató egyetemi tanára. Szakterületei: martenzites átalakulás alakmemória fémekben és acélokban, finomszerkezet-vizsgálat.

DR. MIKÓ TAMÁS 2016-ban PhD-fokozatot szerzett a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolában. A Miskolci Egyetem Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet tudományos főmunkatársa, valamint a Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumának vezetője. Szakterülete a különböző fémek és ötvözetek mechanikai és fizikai tulajdonságainak jellemzése.

DR. MOLNÁR DÁNIEL doktori fokozatát 2010-ben szerezte a Miskolci Egyetemen. Jelenleg az Anyag és Vegyészmérnöki Kar, Fémelőállítási és Öntészeti Intézetében dolgozik docensi beosztásban. Fő kutatási területei az öntészeti folyamatok technológiájának fejlesztése és számítógépes szimulációja.

NYESTE VIKTOR a Széchenyi István Főiskolán szerzett gépészmérnök diplomát 1999-ben, Győrben. 2010-ben a Miskolci Egyetem Anyagmérnöki Karán Kohómérnöki MSc-diplomát szerez öntödei specializációval. 2023-ban kezdte meg a PhD-tanulmányait a Miskolci Egyetem Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Iskolájában. Kutatási témája: az utántömörítőcsap működtetésével kapcsolatos. 2001 őszétől dolgozik a Hanon Systems Hungary Kft.-nél, 2004-től légkondicionáló kompresszor alumínium-öntvényházaiért felelős tervezőmérnök.

TOVÁBBI SZERZŐK:

Kasó Attila Ifj., geológus bányamérnök, Rotaqua Geológiai Bányászati Kutató Mélyfúró Kft., **Földessy János**, professzor emeritus, **Leskó Máté** PhD, tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Miskolc

Kőrösy Gergely, **Roósz András**, **Mende Tamás**, Miskolci Egyetem, Anyag- és Vegyészmérnöki Kar, Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

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!

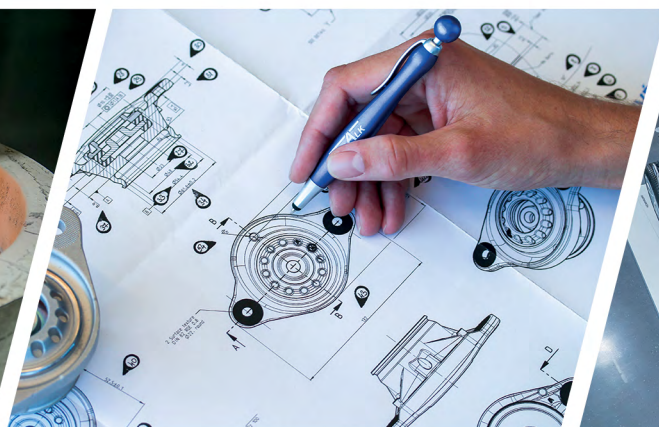
Facebook: <https://www.facebook.com/ombke1892/>

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

PCA-based soil geochemical investigation of precious metals in Rudabánya, Hungary: Uncovering the hidden relationships

Mohamed Abdelnaby Oraby^{1,2}, Földessy János¹

¹Institute of Mineralogy and Geology, Faculty of Earth Sciences and Engineering, University of Miskolc, Hungary

²Department of Geology, Faculty of Science, Ain Shams University, Egypt

Introduction

Rudabánya is classified as a significant complex ore occurrence in Hungary because of its history of exploration and mining activities, particularly in base metals like copper and lead that were discovered many years ago after exploring and exploiting the iron ore. The area also contains silver and gold anomalies within the ore zone, although previous studies have primarily focused on the iron ore and base metals, with only a few mentions about the occurrence of gold or silver (Földessy et al., 2014). There have been many sampling programs over the past 40 years that have produced data with varying levels of sampling, assaying, detection, and precision parameters, indicating that some drill intersections have identified gold in the oxidation zone and footwall sandstones. The initial assumptions of these recent explorations explained presence of the gold in the area as an associated element to silver due to their direct relationship and the possibility of Au-Ag solid solutions, and they explored the gold by using the knowledge from the silver enrichments. After the initial sampling series, this approach proved unsuccessful.

Aim of the study & Study area

Throughout the geochemical prospecting of precious metals, it is advantageous to group the elements, particularly gold and silver, since they are closely related and tend to form solid solutions. This study aims to investigate the probable linkage between gold and silver and their spatial distribution in the B-level soil of Rudabánya by using a multivariate statistical analysis as an initial step in the studying gold and silver in the study area. The study area is situated in Rudabánya town, Borsod-Abaúj-Zemplén county, Hungary, within the Darnó tectonic zone, and it is approximately 45 km northeast of Miskolc city (Fig. 1).

Methodology

In the current study, surface B-level soil samples were collected in two zones along NE-SW direction producing two geochemical datasets. Within each sampling zone, two grids were created, one aligned NE-SW and the other NW-SE (Fig. 2). The first geochemical dataset (Nr1) includes 448 soil samples. The assay was carried out for 36 elements by Au-ICP21 analysis for gold and ME-ICP analysis for other elements. The second geochemical dataset (Nr2) includes 70 soil samples. The assay was carried out for 52 elements by ME-MS Analysis.

Principal component analysis (PCA) is an appropriate method for discovering clusters of correlated features where it is a highly effective approach to be considered in preliminary evaluations where fewer variables are acquired, there is less information loss, and visualization becomes significantly more meaningful (Sarparandeh and Hezarkhani, 2018). PCA was implemented on 15 and 12 selected elements from both geochemical datasets respectively, in order to obtain a multi-element geochemical signature of the gold and silver (Table 1 & 2).

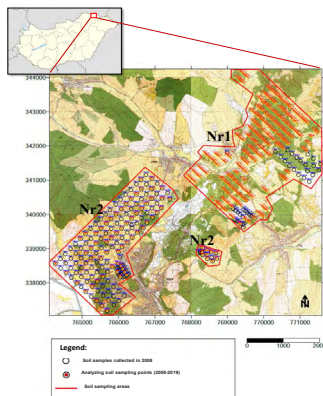


Figure 1: location map of the study area shows the sampling areas of Nr1 and Nr2 soil samples

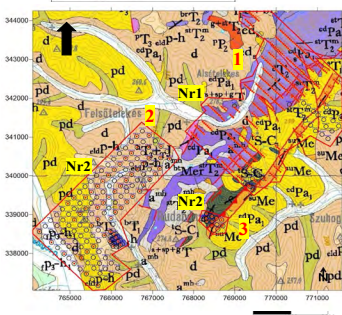


Figure 2: The sampled areas overlying the geological map of the area. 1) Triassic carbonates, 2) Pannonian-Pleistocene sediments, 3) Devonian shale/Miocene conglomerate.

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3	PC4
Au (ppm)	0.07	0.22	0.58	0.76
Ag (ppm)	0.32	-0.09	-0.10	0.10
Sb (ppm)	0.33	-0.11	-0.04	0.07
Pb (ppm)	0.32	-0.13	0.03	0.03
Hg (ppm)	0.31	-0.26	0.05	-0.02
Cd (ppm)	0.29	-0.28	0.19	-0.07
As (ppm)	0.30	0.18	-0.16	0.00
Zn (ppm)	0.28	-0.09	0.17	-0.20
W (ppm)	0.23	-0.43	0.08	0.01
Na (%)	0.23	-0.04	-0.45	0.37
Cu (ppm)	0.23	0.55	-0.24	0.15
Ba (ppm)	0.21	0.25	-0.33	-0.01
Fe (%)	0.21	0.42	0.06	-0.17

Table 1: Loading values of each element in each component (Eigenvectors) and eigenvalues of each component. Au has high loading in PC3, and PC4 but Ag has high loading in PC1 and moderate loading in PC4.

Eigenvectors	PC1	PC2	PC3
Au (ppm)	0.05	-0.57	0.72
Ag (ppm)	0.32	0.22	-0.08
Ba (ppm)	0.33	0.21	-0.02
Pb (ppm)	0.28	0.31	0.22
In (ppm)	0.34	-0.11	-0.15
Sb (ppm)	0.32	-0.22	-0.19
S (%)	0.30	0.16	0.02
Hg (ppm)	0.27	-0.28	-0.33
Cd (ppm)	0.32	-0.03	0.19
Cu (ppm)	0.30	-0.19	0.12
Zn (ppm)	0.31	-0.29	-0.18
W (ppm)	0.21	0.44	0.42
Eigenvalues	7.11	1.27	0.94

Table 2: Loading values of each element in each component (Eigenvectors) and eigenvalues of each component. Au has high loading in PC3, but Ag has high loading in PC1 and moderate loading in PC2.0

Results

In the first soil sampling area, the first four PCs (PC1, PC2, PC3, and PC4) comprise the most variance of the selected elements, where Au shows uncorrelation in all PC plots while Ag shows a strong correlation with Sb, Pb, Hg, As, Zn, and Cd (Fig. 3). Moreover, The spatial distribution of Au and Ag through the IDW-based maps of these PCs is different (Fig. 4). In the second soil sampling area, the first three PCs (PC1, PC2, and PC3) comprise the most variance of the selected elements, where Au shows uncorrelation in all PC plots, while Ag shows a strong correlation with Ba and S and the spatial distribution of the target elements through the sampling zone is differently located as well (Fig. 5 & 6).

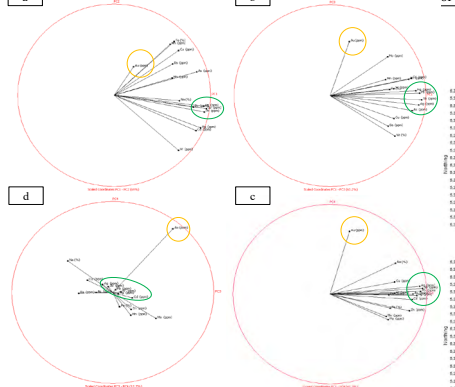


Figure 3: (a-d) Loading plots of PC1-PC2, PC1-PC3, PC1-PC4, and PC3-PC4 respectively. Green circles represent the highly correlated elements and orange circles represent the unique uncorrelated gold.

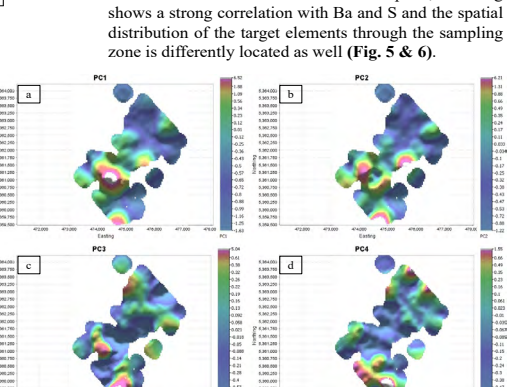


Figure 4: (a-d) IDW-based maps of first four principal components (PCs) show the different spatial distribution of gold and silver, and its pathfinder elements.

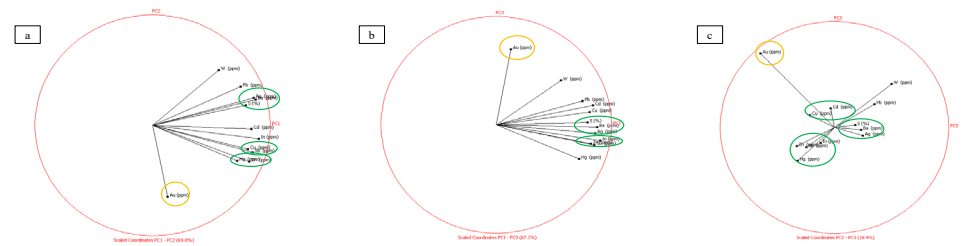


Figure 5: (a-c) Loading plots of PC1-PC2, PC1-PC3, and PC2-PC3 respectively. Green circles represent the highly correlated elements and orange circles represent the unique uncorrelated gold.

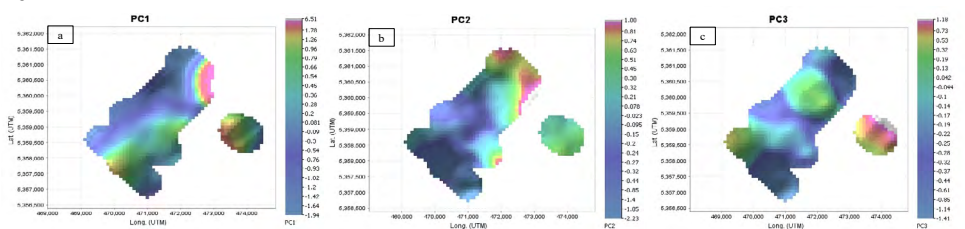


Figure 6: (a-c) IDW-based maps of first three principal components (PCs) show the different spatial distribution of gold and silver, and its pathfinder elements.

Conclusion and future work

The utilized statistical technique (PCA) uncovers the relationship between gold and silver where reveals that there is no association between gold and silver in either sampling zones, indicating that they might come from different sources of enrichment. Furthermore, by using the gridding maps of some selected principal components (PCs) through a modified Inverse Distance Weighting (IDW) algorithm show a different spatial distribution of the target elements in the B-level soil of Rudabánya.

The proposed method gives a better understanding of the Au-Ag relationship, the complex geochemical signatures of mineral deposits, and an initial glance into the nature of their existence in Rudabánya.

Acknowledgement

Thanks to Rotaqua KFT company for providing the data and Permission for work. Authors also thank Dr. Márai Ferenc and Mohamed Abdelhadi Badawi (University of Miskolc) for their help with data management.



References

- Földessy, J., N. Németh, A. Gerges, S. Bodor, A. Kasó Jr. 2014. Geochemical distribution of gold in the Rudabánya Ore Bearing Complex. - In: Fehér, B. (Ed): The lure of minerals: Anniversary volume in the honor of Sándor Szakáll's 60th birthday, Herman Otto Múzeum és Magyar Minerofil Társaság, Miskolc, Hungary, pp. 75-83. (in Hungarian)
- Sarparandeh, M., Hezarkhani, A., 2018. Principal component analysis of rare earth elements in Sechahun iron deposit, central Iran, International Journal of Advanced Geosciences 6 (2), 205-208.