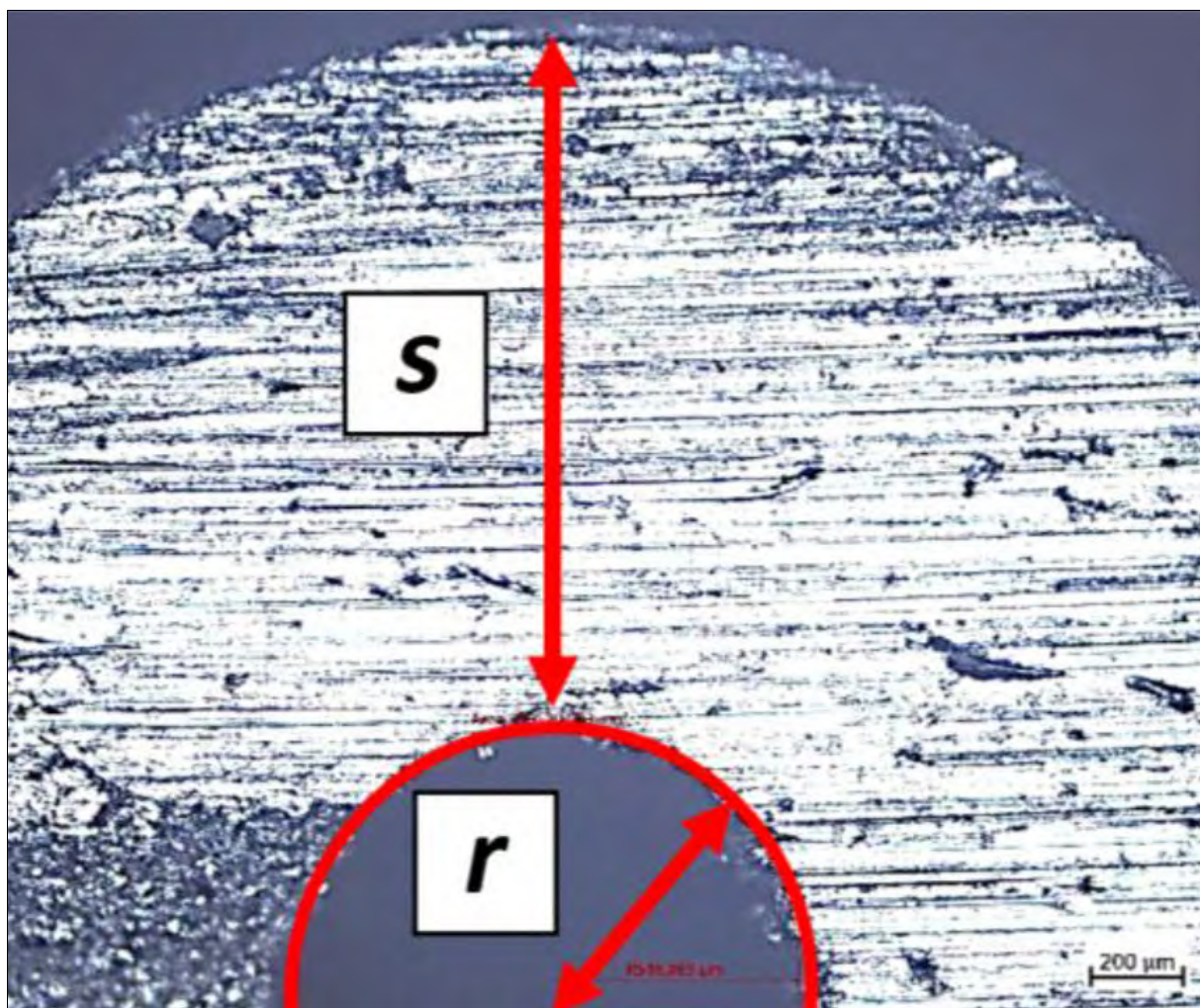


Lágyacélok öregedésének elemzése hajlítóvizsgálat alapján Analysis of aging of mild steels based on bending tests

Kondás Béla, Mertinger Valéria



FROM THE CONTENTS

GYÖRGY KAPTAY: An extract from J. W. Gibbs' work "On the Equilibrium of Heterogeneous Substances" for the 150th anniversary of its publication 2

ÉVA KÓCSÁK, ANDRÁS ROÓSZ, ARNOLD RÓNAFÖLDI, ZSOLT VERES: Effect of Magnetic Stirring on the Microstructure of Eutectic Al-Si Alloy 17

BÉLA KONDÁS, VALÉRIA MERTINGER: Analysis of aging of mild steels based on bending tests 26

CSILLA PATAKY, RICHMOND KOJO KYEI, JÁNOS FÖLDESSY, FERENC MÁDAI: From the Critical Raw Materials Hungary Data Collection: Feldspar, Mg, He, F, Ga, bauxite, phosphate – strategic and critical mineral raw material potential – global and domestic overview 30

ÁRPÁD ÓSZ SR.: Exploring the Earth under the sea 38

LAJOS PILISSY: The roots of metallography in Selmec. Commemoration of Professor Dr. Aladár Schleicher ... 54

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

PÉTER FODOR, ATTILA KASÓ JR., FERENC KRISTÁLY, JÁNOS FÖLDESSY: Geochemical behavior of strontium in the formations of the Rudabánya ore complex 63

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,
sokszósítása 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

KAPTAY GYÖRGY:

J. W. Gibbs „A heterogén anyagok egyensúlyáról” című művének
kivonata a megjelenés 150. évfordulójára 2

KÓCSÁK ÉVA, ROÓSZ ANDRÁS, RÓNAFÖLDI ARNOLD, VERES ZSOLT:

A mágneses keverés hatása az eutektikus Al–Si ötvözet mikro-
szerkezetére 17

KONDÁS BÉLA, MERTINGER VALÉRIA:

Lágyacélok öregedésének elemzése hajlítóvizsgálat alapján 26

PATAKY CSILLA, RICHMOND KOJO KYEI, FÖLDESSY JÁNOS, MÁDAI FERENC:

Kritikus nyersanyagok Magyarország Adatgyűjtemény: Földpát,
Mg, He, F, Ga, bauxit, foszfát – stratégiai és kritikus ásványi
nyersanyag potenciál – globális és hazai körkép 30

ID. ŐSZ ÁRPÁD:

A Föld felfedezése a tenger alatt 38

PILISSY LAJOS:

A metallográfia selmeci gyökerei. Megemlékezés dr. Schleicher
Aladár professzorról 54

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

FODOR PÉTER, KASÓ ATTILA IFJ., KRISTÁLY FERENC, FÖLDESSY JÁNOS:

A stroncium geokémiai viselkedése a rudabányai érces komplexum
képződményeiben 63

(for English titles see B2 page)

*Címlapon: Lágyacélok öregedésének elemzése hajlítóvizsgálat alapján
(Publikáció a 26. oldalon)*

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával jelenik meg.

J. W. Gibbs „A heterogén anyagok egyensúlyáról” című művének kivonata a megjelenés 150. évfordulójára

An extract from J. W. Gibbs' work “On the Equilibrium of Heterogeneous Substances” for the 150th anniversary of its publication

KAPTAY GYÖRGY^{1,2,@} 

¹Miskolci Egyetem, Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolc

²HUN-REN Anyagtudományi Kutatócsoport, Miskolc

@E-mail: kaptay@hotmail.com



J. W. Gibbs 1875–1878 között megjelent főművének nem ismert a magyar fordítása. Ezt persze nem csodálom, mert e 300 oldalas cikk szabatos fordítására én sem mernék vállalkozni, még akkor se, ha esetleg lenne rá időm. Egyszerűen azért nem, mert még ma sem értek belőle mindent, az pedig félrefordításhoz vezetne. Mivel azonban ez ma is a kohászat, az anyagtudomány, a fizikai kémia és általában a természettudományok egyik alpműve (amelyre többen hivatkoznak, mint ahányan olvassák is), ezért fontosnak tartom, hogy legalább kivonatossan közreadjam a magyar „fordítását” koncentrálni azokra a részletekre, amelyeket egyrészt érteni vélek, másrészt véleményem szerint ma is fontos és helytálló felismerések.

Kulcsszavak: Gibbs alpműve, kivonatok

The Hungarian translation of J. W. Gibbs' main work, published between 1875–1878, is unknown. Of course, I am not surprised by this, because I would not dare to undertake a precise translation of this 300-page article, even if I had the time. Simply because I do not understand everything in it even today, and that would lead to mistranslation. However, since this is still one of the basic works of metallurgy, materials science, physical chemistry and the natural sciences in general (which is referred to by more people than read), I consider it important to publish at least an excerpt of the Hungarian "translation", focusing on those details that I believe I understand, on the one hand, and on the other hand, which in my opinion are still important and relevant insights today.

Keywords: Gibbs' seminal work, extracts

Bevezetés

Legjobb tudomásom szerint Gibbs főműve [1] soha nem jelent meg magyar fordításban. Mivel e folyóiratban éppen egy cikksorozatot írok a témában, úgy gondolom, hogy ideje tényszerűen – ha csak kivonatossan is – összefoglalni, hogy mit is írt 1875–1878 között Gibbs. Ehhez az 1928-ban kiadott „Gibbs összes” I. kötetét használom fel [2], amelyben a mű a III. sorszám alatt, az 55–353. oldalak között jelent meg, 298 oldalon. Ugyanebben a kötetben a IV. sorszámú, 1878-ban megjelent cikkben Gibbs röviden összefoglalja a témát [3], amely a kötet 354–371. oldalai között található 16 oldalon, az eredeti mű 5,4%-ában. Vonzó lehetőség lenne nem a teljes mű kivonatát, hanem csak annak összefoglalóját közreadni magyarul. Azért nem ezt az utat választom, mert a [3] összefog-

láló cikkben Gibbs több olyan részletet elhagy, amely szerintem fontos az [1, 2] főműben. Ez utóbbit pedig két elv szerint kivonatom ebben a cikkben: csak arról írok, amit érteni vélek, és ami ma is fontos.

Ezt a kivonatot a mai jelölésekkel és a mai szóhasználattal írom azért, hogy könnyebb legyen megérteni. A cikk végén azonban megadok egy jelölésjegyzéket (1. táblázat) és egy szószeretet (2. táblázat), amelyek kapcsolatot teremtenek a Gibbs által használt jelek és szóhasználat, illetve azok modern változatai között, az utóbbit angol és magyar nyelveken is. Ezzel az a célom, hogy ha valaki a kezébe veszi Gibbs eredeti művét, könnyebben igazodjon el benne, mint anno én. Gibbs sajnos egyáltalán nem használt mértékegységeket (mint általában a természettudósok), de az 1. táblázatban én megadom a mai SI mértékegységeket is.

Ebben a kivonatban megadom azt az oldalszámot, ahol az adott állítás [2] hivatkozásban található, és azt az egyenletsorszámot, amely ott szerepel. Gibbs azonban a számozott 700 egyenleten túl további számozatlan egyenleteket is felírt. Ezek közül a fontosakat pl. a (123+) jellel jelölöm, ha az egyenlet Gibbs (123) sorszámmal jelölt egyenletét követő első, szerintem fontos egyenlet. Ebben a cikkben nagy lyukak lesznek az egyenletek sorszámai között, mivel az összes egyenlet megadására egyrészt nincs elég hely, másrészt ennek nem is látom értelmét. Lesz (123K) sorszámtípusú egyenlet is, amelyet Gibbs ugyan nem írt fel, de nyilvánvalóan következik az általa írtakból, és én felsoroltam ezt is a (123) egyenlet után.

Ebben a kivonatban használok fejezetcímeket, de azok nem egyeznek meg Gibbs fejezetcímeivel. Az itt megadott fejezetcímek a tisztelt Olvasót segítik a Gibbs által alkotott új tudás értelmezésében és rendszerezésében, és nem a szó szerinti történelmi hűséget szolgálják. Vannak dupla sorszámú egyenletek is, ezeket Gibbs duplán írta fel és duplán is számozta. Innen is látszik, hogy Gibbs nem pedagógiai céllal írta főművét, ezért nem nagyon foglalkozott azzal, hogy a logikailag összetartozó egyenletek egymás közelébe kerüljenek; Gibbs minden egyenletet akkor írt fel, amikor az eszébe jutott. Én az érthetőség kedvéért az összetartozó egyenleteket egymás közelébe szerkesztem, de egyebekben próbálok Gibbs eredeti művében oldalról oldalra és egyenletről egyenletre haladni.

Érdemes egy bekezdésben összefoglalni, hogy mi Gibbs főművének célja, lényege és tárgya. Gibbs célja a kémiai termodinamika megalkotása volt. Az ő idejében már létezett a mechanikai termodinamika és ettől teljesen függetlenül létezett a kémia is, de Gibbs volt az, aki a mechanikai termodinamika alapelveit kiterjesztette a kémiára. A Gibbs által tárgyalt fejezetek ma a fizikai kémia, a fázisegyensúlyok, az elektrokémia, a kolloidkémia és a kémiai reakciók egyensúlya fejezetek első tudományos tárgyalásának tekinthetők. Ugyanezek a fejezetek teszik ezt a tudást értékessé a kohászatban és az anyagtudományban is.

1. Clausius öröksége és az egyensúly két általános feltétele (55–56., 63. oldal)

Clausius volt az, aki 1850–1865 között teljessé tette a mechanikai termodinamikát azzal, hogy bevezette az entrópia fogalmát. Ez volt az a pont, amely felkelte Gibbs érdeklődését, mivel úgy érezte, hogy ez már egy kellőképpen teljes tudás ahhoz, hogy érdemes legyen azt a kémiai (anyagi) átalakulásokkal kapcsolatos folyamatokra is kiterjeszteni, amit ő meg is tett. Nem véletlen ezért, hogy Gibbs angol nyelvű főművének mottóját szó szerint Clausiustól vette át német nyelven, amelyet én itt most magyarul adok közre:

„A világ belső energiája konstans, de a világ entrópiája maximumra törekszik”.

Gibbs főműve elején tett egy anyagtudományi szempontból fontos felvezető kijelentést: minden anyagi rendszer egyben termodinamikai rendszer is, amelynek az egyensúlyát belső energiájának és entrópiájának változása határozza meg, utóbbit az $\int dQ/T$ kifejezéssel definiálta Clausius után, ahol Q (J) a hő, T (K) az abszolút hőmérséklet. Majd kifejtette, hogy a külső hatásoktól mentes anyagi rendszerek egyensúlyának feltételei:

- a) egy izolált anyagi rendszer egyensúlyának az a szükséges és elégséges feltétele, hogy a rendszer állapotaiban bekövetkező bármilyen olyan változást, ami nem jár a belső energia megváltozásával, vagy nulla, vagy negatív entrópiaváltozás kísérje:

$$(\delta S)_U \leq 0, \quad (1)$$

ahol S az entrópia (J/K), U a belső energia (J). Ha az utóbbit a végtelen kis entrópiaváltozás (δS) alsó indexében használjuk, az azt jelenti, hogy ez az entrópiaváltozás konstans belső energiaérték mellett valósul meg. Manapság az (1) egyenlet fordítottját szoktuk a termodinamika II. főtörvényének nevezni: minden, konstans belső energia mellett lejátszódó természetes folyamatot entrópiánövekedés kíséri. Pont azért van a rendszer egyensúlyban, mert (1) szerint nincs olyan belső folyamat, amit pozitív entrópiaváltozás kísérne.

- b) egy izolált anyagi rendszer egyensúlyának az a szükséges és elégséges feltétele, hogy a rendszer állapotaiban bekövetkező bármilyen olyan változást, ami nem jár az entrópia megváltozásával, vagy nulla, vagy pozitív belső energia változás kísérje:

$$(\delta U)_S \geq 0. \quad (2)$$

Ma a (2) egyenletnek is a fordítottját szoktuk használni: konstans entrópia mellett lejátszódó minden természetes folyamatot a belső energia csökkenése kíséri. Pont azért van a rendszer egyensúlyban, mert (2) szerint nincs olyan belső folyamat, amelyet negatív belső energiaváltozás kísérne.

Gibbs ezt követően azt is bemutatta, hogy az (1) és (2) egyenlet ekvivalens, és a továbbiakban főleg a (2) egyenletet használta. Kimutatta azt is, hogy az (1) és (2) egyenletben elegendő az egyenlőségjel használata. Azt is megfogalmazta, hogy egy homogén, egyfázisú rendszeren belül, amelynek minden pontjában azonos az összetétel és a szerkezet, továbbá ahol ráadásul a komponensek minősége és mennyisége is konstans, a belső energia, az entrópia és a térfogat változásait a következő egyenlőség köti össze:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV, \quad (11)$$

ahol p (Pa) a nyomás és V (m³) a térfogat. A (11) egyenletben $T \cdot dS$ (J) a rendszer által kapott hő (lásd

Clausius definícióját: $dQ \equiv T \cdot dS$), míg a $p \cdot dV$ (J) kifejezés a rendszer által végzett térfogati munka. Mindkettő a rendszer állapotváltozása során lép fel (ha egy rendszeren belül nincs állapotváltozás, akkor $dU = dS = dV = 0$).

2. A mechanikai rendszer kiterjesztése kémiai rendszerré (63–64. oldal)

Ebben a fejezetben Gibbs előrelátóan leszögezte, hogy az itt vizsgált anyagi rendszer mentes a gravitáció, az elektromosság, a mechanikai feszültség és a határfelületek hatásától. Ezeket a hatásokat később külön fejezetekben vizsgálta. A fent felírt (11) egyenlet még azonosan vonatkozhatott mechanikai vagy anyagi rendszerekre. Kémiai termodinamika ebből attól lett, hogy Gibbs felismerte: az állapotváltozások során a különböző i komponensek tömegei (m_i , kg) is megváltozhatnak, és ezért a (11) egyenletet egy új taggal egészítette ki:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV + \sum_i \mu_i \cdot dm_i, \quad (12 = 86)$$

ahol μ_i (J/kg-komponens) az i komponens parciális fajlagos kémiai potenciálja a rendszerben, amelyet Gibbs csak „potenciálnak” nevezett. Itt fontos, hogy minden komponens tömegváltozásának (dm_i) függetlennek kell lennie a többi komponens tömegváltozásától, illetve fontos az is, hogy a komponens tömegek kismértékű változása nem vezethet a nagyméretű fázisok összetételének vagy szerkezetének változásához. A (12) egyenlet harmadik tagja az, amelytől a termodinamika kémiaiává vált, és Gibbs főművének ez az első nagy találmánya. Ma a (12) egyenletet nevezzük Gibbs egyik alapvető (fundamentális) egyenletének.

3. A (12) egyenlet változatai

A (12) egyenlet a belső energia differenciál alakja. Ha a (12) egyenletet integráljuk – feltételezve, hogy a rendszer állapota változatlan –, akkor a belső energia integrális alakjához jutunk (lásd a 77. oldalon és később is):

$$U = T \cdot S - p \cdot V + \sum_i \mu_i \cdot m_i. \quad (55 = 93)$$

A (12) egyenlet egyszerre vonatkozik az egyfázisú rendszerre és arra a bizonyos egyetlen fázisra is, de ezt Gibbs csak később ismerte fel:

$$dU_\Phi = T \cdot dS_\Phi - p \cdot dV_\Phi + \sum_i \mu_{i(\Phi)} \cdot dm_{i(\Phi)}, \quad (58)$$

ahol U_Φ (J) a Φ fázis integrális belső energiája, S_Φ (J/K) a Φ fázis integrális entrópiája, V_Φ (m³) a Φ fázis integrális térfogata, $\mu_{i(\Phi)}$ (J/kg-komponens-a-fázisban) a Φ fázisban oldott i komponens fajlagos kémiai potenciálja és $m_{i(\Phi)}$ (kg-komponens-a-fázisban) a Φ fázisban oldott i komponens tömege. Gibbs az (58) egyenletet ugyan felírta, de annak integrális alakját

nem. Ez azonban analóg a (12)–(55) egyenletpárossal, ezért felírom én:

$$U_\Phi = T \cdot S_\Phi - p \cdot V_\Phi + \sum_i \mu_{i(\Phi)} \cdot m_{i(\Phi)}. \quad (58K)$$

Később Gibbs kapcsolatot teremtett a rendszerre és annak fázisaira vonatkozó mennyiségek között:

$$S = \sum_\Phi S_\Phi, \quad V = \sum_\Phi V_\Phi, \quad m_i = \sum_\Phi m_{i(\Phi)}. \quad (134)$$

Engedtessek meg nekem, hogy kiterjesszem a (134) egyenletet a belső energiára is:

$$U = \sum_\Phi U_\Phi. \quad (134K)$$

4. A heterogén rendszerek egyensúlyának feltételei (64–65. oldal)

Gibbs ezt követően az egyfázisú homogén rendszerekről áttért a többfázisú, heterogén rendszerek vizsgálatára. Ha a rendszerben több fázis van, azokat az általános Φ jel helyett én különböző görög betűkkel különböztetem meg egymástól (α, β, γ stb.), de Gibbs erre a felső indexben egy vagy több vesszőt használt. Egy többfázisú rendszerben a fázisok belső energiái összeadódnak, ezért ezek egyensúlyának általános feltétele a (2), (58) egyenletekből:

$$\sum_\Phi \delta U_\Phi \geq 0. \quad (14)$$

A (14) egyenlet a (2) egyenlet értelmében csak akkor érvényes, ha az (58) egyenletben szereplő azonos típusú változások fázisonként kreált összegei ki-egyenlítődnek:

$$\sum_\Phi \delta S_\Phi = 0, \quad (16)$$

$$\sum_\Phi \delta V_\Phi = 0, \quad (17)$$

$$\sum_\Phi \delta m_{i(\Phi)} = 0, \quad (18)$$

ahol a (18) egyenletből komponensenként kell felírni egyet-egyet. Gibbs szerint egy heterogén rendszer termikus, mechanikai és kémiai egyensúlyának feltételei:

$$T = T_\alpha = T_\beta = T_\gamma = \text{stb.}, \quad (19)$$

$$p = p_\alpha = p_\beta = p_\gamma = \text{stb.}, \quad (20)$$

$$\mu_i = \mu_{i(\alpha)} = \mu_{i(\beta)} = \mu_{i(\gamma)} = \text{stb.}, \quad (21)$$

ahol mindhárom egyenlet első tagja a teljes rendszerre vonatkozik (ezeket csak én tettem hozzá az egyenletekhez), míg a többi tag az egyes fázisokra vonatkozik. Például T_α (K) az α fázison belüli hőmérséklet, p_α (Pa) az α fázison belüli nyomás, $\mu_{i(\alpha)}$ (J/kg) az α fázisban oldott i komponens fajlagos kémiai potenciálja és a (21) egyenlőségeknek minden i komponensre külön-külön teljesülniük kell. A (19) egyenlőségek a rendszer termikus egyensúlyát garantálják, a

(20) egyenlőségek a rendszer mechanikai egyensúlyát garantálják, míg a (21) egyenlőségek a rendszer kémiai egyensúlyát garantálják. Tehát a (19)–(21) egyenlőségek jelentése: egy rendszer akkor van termikus, mechanikai és kémiai egyensúlyban, ha a rendszer minden fázisában és annak minden pontjában azonos a hőmérséklet, a nyomás és a kémiai potenciál, az utóbbinak igaznak kell lennie minden komponensre külön-külön is. Innen az is következik, hogy minden komponens jellemezhető a saját, teljes rendszerre vonatkozó μ_i fajlagos kémiai potenciáljával (lásd (12) egyenlet), amely persze egyensúlyban a (21) egyenletben jelzett összes többi értékkel is egyenlő (pl. $\mu_i = \mu_{i(a)}$). A (19)–(21) egyenletek mint a heterogén rendszerek egyensúlyának feltételei, Gibbs máig érvényes alapvető eredménye.

A (16)–(21) egyenletek összesen $N_p(N_C + 2)$ független egyenletet tartalmaznak, ahol N_C a komponensek száma, N_p pedig a fázisok száma. Ez egyrészt azért van, mert a (19)–(21) egyenletekben minden egyes egyenlethalmazban eggyel kevesebb matematikailag független egyenlet van, mint ahány fázis. Ha ugyanis fázispáronként nézzük az egyes egyenleteket, akkor pl. a (19) egyenlet három fázisára csak két független egyenlet jut ($T_\alpha = T_\beta$ és $T_\alpha = T_\gamma$ egyenletek), mivel a harmadik lehetséges egyenlet a $T_\beta = T_\gamma$, ami viszont az előző kettő matematikai következménye. Másrészt ez azért van, mert minden komponens kémiai potenciáljára érvényesnek kell lennie a (21) típusú egyenlőségeknek, és a hasonló (19), (20) egyenlőségeknek ezen túl még +2 mennyiségre is érvényesnek kell lennie (a hőmérsékletre és a nyomásra). Harmadrészt azért van így, mert a (16), (17) egyenletek 2 újabb egyenletet adnak, míg a (18) egyenletek még további N_C egyenletet adnak. Ugyanakkor a (19)–(21) egyenletekben használt, egymástól független ismeretlenek száma is $N_p(N_C + 2)$, mivel minden fázisnak van ismeretlen hőmérséklete, nyomása és bennük minden komponensnek van ismeretlen kémiai potenciálja. Persze az ebben a bekezdésben elkövetett magyarázó mondatokat csak én írom, mivel Gibbs nem volt egy szájbarágós fajta, ő inkább kinyilatkoztatott. Mindenestre innen az következik, hogy az ismeretlenek és az egyenletek számai megegyeznek egymással, tehát ennyi egyenletből valóban meghatározható ennyi ismeretlen, azaz Gibbs saját maga elé állított feladata megoldható.

Más kérdés, hogy Gibbs a hőmérsékletet, a nyomást és a fajlagos kémiai potenciálok értékeit tekintette ismeretleneknek, de nem világos, hogy mire jó, ha ismerjük a komponensek egyensúlyi fajlagos kémiai potenciáljait. A kohómérnökök számára lényeges ismeretlenek szerintem a fázisok egyensúlyi móltörtjei és egyensúlyi moláris fázisarányai, míg az ezek kiszámításra alkalmas egyenletek az

egyes komponensekre felírt (21) típusú egyenletek és a Gibbs által fel nem írt anyagmérleg-egyenletek, ahonnan persze ha kell, ki tudnánk számolni a kémiai potenciálokat is (lásd [4]). A jó hír az, hogy ebből nekem is az jött ki, hogy az ismeretlenek száma megegyezik az egyenletek számával [4] (1. számú „véletlen” egybeesés).

5. A kémiai reakciók egyensúlyának alapegyenlete (67–69. oldal)

Tegyük fel, hogy egy rendszerben az $a \cdot A + b \cdot B = c \cdot C + d \cdot D$ kémiai reakció játszódik le az A - B - C - D komponensek között, ahol a - b - c - d (kg) a kémiai reakcióba lépő vagy az abból keletkező komponensek tömegeit jelentik, és persze a tömegmegmaradás törvénye szerint ($a + b = c + d$). Ekkor Gibbs szerint a kémiai egyensúly feltétele:

$$a \cdot \mu_A + b \cdot \mu_B = c \cdot \mu_C + d \cdot \mu_D, \quad (33 = 312)$$

ahol mindegyik fajlagos kémiai potenciál J/kg-komponens mértékegységű. A (33) egyenlet a kémiai reakciók egyensúlyának alapegyenlete. Megjegyzem, hogy Gibbs már ismerte Cannizaro relatív atomtömegeit és a víz sztöchiometriáját is, mert a víz = hidrogén + oxigén reakciót a következőképpen írta fel a 94. oldalon: $9 \cdot \text{H}_2\text{O} = 1 \cdot \text{H} + 8 \cdot \text{O}$, ahol a számok a fentiek szerint tömegeket jelentenek és egy értékes jegy pontossággal megegyeznek a ma ismert tömegarányokkal. Mi ma ugyanezt mólókkal szoktuk felírni, mivel ismerjük a hidrogén 1 g/mol és az oxigén 16 g/mol moláris atomtömegeit. Mivel preferáljuk az egész számokat és a stabil molekulákat, helyett ma inkább ezt írjuk: $2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 2 \cdot \text{H}_2 + \text{O}_2$, de ez ekvivalens Gibbs tömegekben megadott fenti reakcióegyenletével. Ezt a bekezdést csak egy példának szántam annak illusztrálására, hogy hogyan kell érteni Gibbs a - b - c - d (kg) tömegeit.

6. A félígáteresztő hárttyák hatása (83. oldal)

Ha két, azonos komponenseket tartalmazó, de különböző összetételű fázist félígáteresztő hárttyával választunk el egymástól úgy, hogy az mindkét irányban átengedi az A komponenst, de egyik irányba se engedi át a B komponenst, akkor a heterogén egyensúly (19)–(21) feltételei közül érvényes marad a (19) egyenlet és a (21) egyenlet az A komponensre, de nem lesz érvényes a (20) egyenlet és a (21) egyenlet a B komponensre. A hárttyának nyilván azon az oldalán lesz nagyobb a nyomás is és a B komponens kémiai potenciálja is, ahol nagyobb a kiindulási B koncentráció, ami a hárttyán nem tud átjutni, emiatt a hárttya körüli két fázis a B komponens szempontjából nem tud egyensúlyi állapotba kerülni.

7. A standard állapot előérzete (85. oldal)

Gibbs helyesen mutatott rá arra, hogy a belső energiának csak a különbségei mérhetőek és az entrópiának a hőváltozásokból szintén csak a különbségei származtathatóak. Következésképpen mind az energia, mind az entrópia abszolút értékei tetszőlegesen. Ezért minden egyszerű anyagnak ki kell választanunk azt az állapotát, amelyben az anyagnak mind a belső energiája, mind az entrópiája zérus. Ezt követően, ehhez az alaphoz mérve ugyanezen anyag minden egyéb állapotát jellemző belsőenergia- és entrópiaérték meghatározható. Gibbs ezzel lényegében azt látta előre, hogy a praktikus számításokat megelőzően szükség lesz egy olyan „standard” állapot definiálására (Gibbs a „standard” kifejezést nem használta), amely mellett a belső energia és az entrópia értékei a nulla alapértéken lesznek. Gibbs ezt az igényt ugyan előre látta, de nem definiálta ezt az állapotot.

A kémiai termodinamika későbbi fejlődése a részletekben korrigálta Gibbs elképzeléseit. Ma ugyanis nullának tekintjük az elemek tökéletes kristályainak entrópiáját 0 K hőmérsékleten Nernst 3. főtörvénye alapján, és általában nullának tekintjük az elemek stabil fázisainak entalpiáját standard állapotban, azaz 298,15 K hőmérsékleten és 1 bar nyomáson.

8. A fajlagos mennyiségek használata (86. oldal)

Ugyan Gibbs szinte minden egyenlete abszolút belső energiáról szól, de van egy bekezdés a 86. oldalon, ahol kifejti, hogy mennyivel racionálisabb lenne fajlagos mennyiségeket használni, amikor a belső energia osztva van a tömeggel (vagy a térfogattal). Gibbs ezt az ötletet ugyan leírta, de lényegében nem használta semmire. De pontosan ezért van az, hogy a modern egyenletek többsége moláris mennyiségeket tartalmaz, amikor a belső energia az anyagmennyiséggel van osztva, amely arányos a tömeggel.

9. Egyéb állapotfüggvények és fundamentális egyenletek (87. oldal)

Gibbs az (55) egyenlettel meghatározott belső energián túl a további állapotfüggvényeket definiálta:

$$A \equiv U - T \cdot S = -p \cdot V + \sum_i \mu_i \cdot m_i = G - p \cdot V, \quad (87 = 94)$$

$$H \equiv U + p \cdot V = T \cdot S + \sum_i \mu_i \cdot m_i = G + T \cdot S, \quad (89 = 95)$$

$$G \equiv U + p \cdot V - T \cdot S = H - T \cdot S = \sum_i \mu_i \cdot m_i, \quad (91 = 96)$$

ahol mai megnevezéssel A (J) a Helmholtz-energia, H (J) az entalpia, G (J) a Gibbs-energia. A (91) egyenlet jelentése: a rendszer teljes Gibbs-energiája (J) egyenlő a komponensek fajlagos kémiai potenciáljai (J/kg) tömegekkel (kg) szorzott összegével ugyanúgy, ahogy

általában minden egész (azaz a rendszer) mindig a részeinek (azaz a komponenseinek) összegéből áll. Most vessünk egy pillantást a varázsfüggöny mögé: vajon miért éppen a fenti három új mennyiséget definiálta Gibbs? Azért, mert az (55) egyenlet szerint a bal oldalon a belső energia van (U), míg a fenti három definícióban az (55) egyenlet jobb oldalának első két tagját vitte át a bal oldalra: a (87) egyenletben az első tagot ($T \cdot S$), a (89) egyenletben a második tagot ($-p \cdot V$), míg a (91) egyenletben mindkét tagot ($T \cdot S - p \cdot V$).

Most vegyük a (87), (89), (91) egyenletek első feleinek teljes differenciáljait, és helyettesítsük be az így adódó dU helyére a (12) egyenletet. Az így kialakított egyenletek egyszerűsítése után megkapjuk a (12) fundamentális egyenletet kiegészítő másik három fundamentális egyenletet (ez a négy fundamentális egyenlet ekvivalens egymással):

$$dA = -S \cdot dT - p \cdot dV + \sum_i \mu_i \cdot dm_i, \quad (88)$$

$$dH = T \cdot dS + V \cdot dp + \sum_i \mu_i \cdot dm_i, \quad (90)$$

$$dG = V \cdot dp - S \cdot dT + \sum_i \mu_i \cdot dm_i. \quad (92)$$

Gibbs ezeket az egyenleteket ugyan nem írta fel, de érdemes legalább a (91), (92) egyenleteket a fázisokra is felírni, kiegészítve ezekkel az (58), (58K) egyenleteket:

$$G_\Phi \equiv U_\Phi + p \cdot V_\Phi - T \cdot S_\Phi = H_\Phi - T \cdot S_\Phi \\ = \sum_i \mu_{i(\Phi)} \cdot m_{i(\Phi)}, \quad (91K)$$

$$dG_\Phi = V_\Phi \cdot dp - S_\Phi \cdot dT + \sum_i \mu_{i(\Phi)} \cdot m_{i(\Phi)}. \quad (92K)$$

Engedtesék meg nekem, hogy kiterjesszem a (134K) egyenletet is:

$$G = \sum_\Phi G_\Phi. \quad (134KK)$$

Ezen túl szerintem érdemes a fenti (1), (2) feltételeket kiegészíteni (sőt, lecserélni) egy olyannal, amelyet a (91), (92) egyenletekkel definiált Gibbs-energián keresztül fogalmazok meg: „egy izolált anyagi rendszer egyensúlyának az a szükséges és elégséges feltétele, hogy a rendszer állapotaiban bekövetkező bármilyen olyan változást, ami nem jár a hőmérséklet, a nyomás és az egyes komponenstömegek megváltozásával, vagy nulla, vagy pozitív Gibbs energia változás kíséresse”, azaz:

$$(\delta G)_{p,T,m_i} \geq 0. \quad (2K)$$

Számomra a (2K) egyenlet a kémiai termodinamika igazi főtörvénye, amelyet persze rajtam kívül senki nem tekint annak. Lényege az, hogy konstans hőmérsékleten, nyomáson és komponenstömegek mellett egy rendszer akkor van egyensúlyban, ha Gibbs-energiája minimális. Pont azért van a rendszer egyensúlyban, mert a (2K) egyenlet szerint nincs

olyan belső folyamat, amelyet negatív Gibbs-energia-változás kísérne.

10. A Gibbs–Duhem-egyenlet (88. oldal)

Ha vesszük az (55) egyenlet teljes differenciálját, akkor annak bal oldala azonos lesz a (12) egyenlet bal oldalával, ezért ezen egyenletek jobb oldalai is azonosak kell, hogy legyenek. Innen jutunk el a ma Gibbs-Duhem egyenletnek nevezett egyenlethez, amit ezek szerint szintén Gibbs írt fel először:

$$S \cdot dT - V \cdot dp + \sum_i m_i \cdot d\mu_i = 0. \quad (97)$$

Gibbs általában (sajnos) nem tett különbséget a fázisok integrális mennyiségei és a rendszerre vonatkozó mennyiségek között, ezért a teljes rendszerre vonatkozó (97) egyenletet írta fel az egyes fázisokra érvényes egyenletek helyett (pedig csak az utóbbiakat kellett volna felírnia). Később azonban a 97. oldalon pótolta ezt a hiányt is:

$$S_\Phi \cdot dT - V_\Phi \cdot dp + \sum_i m_{i(\Phi)} \cdot d\mu_{i(\Phi)} = 0. \quad (124)$$

Érdemes megjegyezni, hogy egy N_p fázist tartalmazó rendszerben N_p számú, (124) típusú egyenlet érvényes (ez a 13. fejezetben lesz fontos). Azt a fenti eljárást, amiből a (97) egyenlet adódott, nemcsak a belső energiával, hanem a (87)–(92), (94)–(96) egyenletek felhasználásával az entalpiával, a Helmholtz-energiával és a Gibbs-energiával is végig lehet vinni, de érdekes módon minden alkalommal a (97) egyenlethez jutunk, amely tehát egy általános érvényű egyenlet.

A (124) egyenlet azt fejezi ki, hogy egy fázisban a különböző komponensek kémiai potenciáljainak változásai között kapcsolat van. Ha például egy két-komponensű fázisban lemérjük az egyik komponens kémiai potenciáljának koncentrációfüggését konstans hőmérsékleten és nyomáson, akkor a (124) egyenlettel kiszámítható a másik komponens kémiai potenciáljának koncentrációfüggése ugyanazon a konstans hőmérsékleten és nyomáson. Ez ma hasznos módszer még akkor is, ha Gibbs ezt még nem használta semmire.

11. A kémiai potenciálok lehetséges definíciói (89–93. oldal)

A (12), (88), (90) és (92) egyenletekből négyféleképpen is definiálható a kémiai potenciál:

$$\begin{aligned} \mu_i &\equiv \left(\frac{dU}{dm_i} \right)_{S, V, m_{j \neq i}} \equiv \left(\frac{dA}{dm_i} \right)_{T, V, m_{j \neq i}} \\ &\equiv \left(\frac{dH}{dm_i} \right)_{S, p, m_{j \neq i}} \equiv \left(\frac{dG}{dm_i} \right)_{p, T, m_{j \neq i}}. \end{aligned} \quad (104)$$

A kémiai potenciál (104) egyenletekkel megadott matematikai definícióihoz Gibbs szöveges definíciót

is fűzött (lásd 93. oldal), pl. az első definícióhoz: „ha egy véges méretű homogén fázishoz egy i komponens végtelen kis tömegét adagoljuk úgy, hogy a fázis homogén és az eredetivel azonos állapotú marad, illetve ha eközben a fázisnak se az entrópiája, se a térfogata nem változik meg, akkor az adagolt komponens fajlagos kémiai potenciálja a belsőenergia-változás és az adagolt komponens-tömeg-változás hányadosa lesz”. Hasonló definíció írható a (104) egyenlet többi matematikai definíciójához is, pl. az utolsóhoz: „ha egy véges méretű homogén fázishoz egy i komponens végtelen kis tömegét adagoljuk úgy, hogy a fázis homogén és az eredetivel azonos állapotú marad, illetve, ha eközben se a nyomás, se a hőmérséklet nem változik meg, akkor az adagolt komponens fajlagos kémiai potenciálja a Gibbs-energia-változás és az adagolt komponens-tömeg-változás hányadosa lesz. Itt megjegyzem, hogy az első definíció nem túl hiteles, mert ha változik a fázis belső energiája a komponens adagolása miatt, akkor hogyan maradhat konstans értékű az entrópiája és a térfogata. Ehhez képest a második definíció már sokkal hihetőbb, hiszen ha egy fázisba komponens adagolunk, akkor miért ne tarthatnánk ettől függetlenül a fázis hőmérsékletét és a felette lévő gáznyomást is konstans értékeken. Ez az egyik oka, hogy én az anyagegyensúlyi számításokban a Gibbs-energiát és nem a belső energiát használom.

Ezek a szöveges definíciók persze megint lebuktatják Gibbst, hiszen ezek szerint a (104) egyenleteket nem a rendszerre, hanem az egyes fázisokra kellett volna felírnia:

$$\begin{aligned} \mu_{i(\Phi)} &\equiv \left(\frac{dU_\Phi}{dm_{i(\Phi)}} \right)_{S_\Phi, V_\Phi, m_{j(\Phi) \neq i(\Phi)}} \equiv \left(\frac{dA_\Phi}{dm_{i(\Phi)}} \right)_{T, V_\Phi, m_{j(\Phi) \neq i(\Phi)}} \\ &\equiv \left(\frac{dH_\Phi}{dm_{i(\Phi)}} \right)_{S_\Phi, p, m_{j(\Phi) \neq i(\Phi)}} \equiv \left(\frac{dG_\Phi}{dm_{i(\Phi)}} \right)_{p, T, m_{j(\Phi) \neq i(\Phi)}}. \end{aligned} \quad (104K)$$

A (104), (104K) egyenletben megadott négy definíció közül matematikailag mindegyik ekvivalens egymással, így elvileg mindegyik használható mérnöki számításokra is. Elvileg ez ugyan tényleg így van, de a gyakorlati használhatóság szempontjából a belső energia, a Helmholtz-energia, az entalpia és a Gibbs-energia erősen különböznek egymástól. A (12), (90) egyenletek szerint pl. a belső energia vagy az entalpia kontrollálásához az entrópiát is kontrollálni kellene, de az entrópiát nemhogy kontrollálni, még függetlenül mérni se tudjuk, ezért a belső energia és az entalpia hiába állapotfüggvények, segítségükkel az anyagegyensúlyok számítása rémálom lenne.

Sokkal jobb a helyzet a Helmholtz-energia és a Gibbs-energia mennyiségekkel, mert a (88), (92) egyenletek szerint ezek kontrollálásához a hőmérsékletet és ezen túl vagy a térfogatot vagy a nyomást

kell kontrollálni. A hőmérséklet ugyebár könnyen kontrollálható hűtő- és fűtőgépekkel, így mind az A , mind a G függvények praktikusnak tűnnek. A Helmholtz-energiát főleg a kémikusok használják, akik általában folyékony és gőzfázisokkal dolgoznak, és ezek összes térfogata könnyen beállítható az edény belső térfogatán keresztül, de a gáznyomás kontrollálása ebben a zárt térben már problémás (pont ezért helyeznek el biztonsági szelepeket a zárt kémiai tartályok tetején, hogy ha a belső gáznyomás kontrollálatlanul nőni kezd egy váratlan folyamat beindulása miatt, akkor a felesleges gáz szabadon eltávozhasson, és ne okozzon robbanást). Ezzel szemben az anyagtudományban és a kohászatban praktikusabb a Gibbs-energia használata, hiszen mi általában szilárd és folyékony anyagokkal dolgozunk; a szilárd és folyékony fázisok feletti gáznyomás ugyan könnyen kontrollálható, de a fázisok térfogatainak szinte lehetetlen az adott értéken tartása (lásd a spontán hőtágulás jelenségét).

Így végeredményben a kohászatban és az anyagtudományban eljutottunk a praktikusan használható Gibbs-energiáig, ami helyett nem kell feltétlenül azt a belső energiát használnunk, amelyet a mechanikai termodinamikától örököltünk. Azt csak sajnálni tudom, hogy Gibbs a közel 300 oldalas főművében végig a belső energiát tekintette alapmennyiségnek, míg a Gibbs-energia szinte csak lábjegyzetnek számított nála. Ennek ellenére igaz, hogy a (91), (92), (96) egyenletekkel definiált Gibbs-energiát is Gibbsnek köszönhetjük, aki persze nem így hívta ezt a mennyiséget, illetve nem is hívta sehogy se ezt, se az entalpiát, se a Helmholtz-energiát. Talán szűziesen arra számított, hogy e három mennyiség közül majd az egyiket a hálás utókor róla nevezi el, és ez a várakozása (ha volt ilyen), be is jött. Gibbs ezt nyilvánvalóan kiérdemelte, és én örülök, hogy pont az általam preferált mennyiséget nevezték el elődeim Gibbs-energiának, és nem irigylem kémikus barátaimat az ő Helmholtz-energiájukért.

12. A fázis definíciója (96. oldal)

Gibbs egészen eddig a „fázis” helyett főleg a „rész” (angolul a „part”) kifejezést használta, de mielőtt megalkotta a fázisszabályt, áttért a fázis kifejezésre, viszont ezt követően se javította ki az előzetesen írt „rész” szavakat (na ja, kézzel írt, nem volt szövegszerkesztője). Ekkor 9,5 sorban megadta a fázis definícióját, amely ma is érvényes. Ezek szerint azokat a testeket, melyek egymástól összetételükben és/vagy szerkezetükben különböznek, fázisoknak nevezzük. Azok a testek azonban, melyek összetételükben és szerkezetükben ugyan azonosak, és csak tömegükben, térfogatukban, bármelyik méretükben vagy alakjukban különböznek egymástól, ugyanazon fázis különböző darabjainak vagy diszpergált részeinek nevez-

zük. Azok a fázisok, melyek egy rendszerben egymás mellett léteznek úgy, hogy azokat sík határfelületek választják el egymástól (melyek nem jelentenek kinetikai gátat a komponensek fázisok közötti mozgásával szemben), „egymással együtt létező” vagy „társlétező”¹ (angolul „coexistent”) fázisoknak nevezzük. Ezek szerint, amikor Gibbs homogén rendszerről írt, akkor egyfázisú rendszerre gondolt, és amikor heterogén rendszerről írt, akkor két- vagy többfázisú rendszerre gondolt.

13. A szabadságfok és a fázisszabály (96. oldal)

Gibbs újabb 10,5 sorban eljutott a szabadságfok definíciójáig is, amit ő „varianciának” nevezett. A 96. oldalon kijelentette, hogy egy N_p egyensúlyi fázisból álló rendszerben, mely fázisok mindegyikében megtalálható ugyanaz az N_C számú komponens, melyek tömegét a fázisokban semmi sem korlátozza, a fázisok varianciája $N_C + 2 - N_p$. Magyarázatként hozzáfűzte, hogy ez azért van, mert az egyes egyensúlyi fázisokban megegyeznek a nyomás, a hőmérséklet és a kémiai potenciálok értékei a (19)–(21) egyenletek szerint (ezek száma $N_C + 2$), de ezen mennyiségek varianciáját N_p számú (124) típusú Gibbs–Duhem-egyenlet korlátozza. A modern kémiai termodinamikában ezt a mennyiséget „szabadságfoknak” nevezzük, amely tehát Gibbs szerint:

$$N_F = N_C + 2 - N_p. \quad (123+)$$

Megjegyzem, hogy Gibbs nemcsak a szabadságfok fogalmát nem használta, hanem az N_F (vagy akár F) jelölést sem, és persze a (123+) egyenletet is csak a szövegbe rejtette el, és nem számozta be. A fentiekből az következik, hogy Gibbs szerint a szabadságfok alatt a nyomást, a hőmérsékletet és a komponensek kémiai potenciáljait kell érteni. Ma a kémiai potenciál helyett valamilyen koncentrációt használunk, de vita folyik arról, hogy melyik koncentrációt kell használni: a rendszer átlagos koncentrációját vagy a fázisok egyensúlyi koncentrációit [5]? A 96. oldal utolsó 10 sorában Gibbs megvizsgálta azt az esetet is, amikor a variancia minimális értékű ($N_F = 0$) és felismerte, hogy behelyettesítve ezt az értéket a (123+) egyenletbe, a maximális, egy rendszerben társlétező fázisok számát kapja meg:

$$N_{p-\max} = N_C + 2, \quad (123++)$$

ahol Gibbs persze az $N_{p-\max}$ jelölést se használta, illetve a (123++) egyenletét is csak a szövegben rejtette el, és nem számozta be azt; valójában pedig csak azt írta fel, hogy ha $N_p = N_C + 2$, akkor variancia nem lehetséges. Ha például $N_C = 1$, akkor a (123++) egyenlet szerint $N_{p-\max} = 3$, azaz egy egykomponensű rend-

¹ Szabó Renáta nyelvújítása.

szerben három fázis (általában szilárd, folyadék és gőz) csak a természettörvények által meghatározott speciális nyomás- és hőmérséklet-értékeken tarthatnak egymással egyensúlyt, és ebben semmilyen variancia, azaz a kohómérnökök által elkövethető változtatás nem megengedett anélkül, hogy e három fázis egyensúlya meg ne szűnne. Gibbs ezzel megteremtette a fázisszabály lényegét, amelyet azóta is elterjedten használ a kohászat, az anyagtudomány és a kémia. Más kérdés, hogy én ugyanezen egyenletek általánosított formáját teljesen máshogyan vezettem le [5], ami azért is előnyös, mert a fenti levezetésben mintha lenne egy csúsztatás: a (21) egyenletek a kémiai potenciálok abszolút értékei között teremtenek kapcsolatot, míg a (124) egyenlet csak a kémiai potenciálok változásai között, így ezt nevezhetjük a 2. számú „véletlen” egybeesésnek.

A (123+) és (123++) egyenletek összehasonlításából egyértelműen származtatható a szabadságfok definíciója is, bár Gibbs ezt az egyenletet még a szövegben sem rejtette el:

$$N_F \equiv N_{P-\max} - N_P. \quad (123K)$$

14. A Clausius–Clapeyron-egyenlet levezetése (98. oldal)

Gibbs a 98. oldalon az $N_P = N_C + 1 = N_{P-\max} - 1$ esetet vizsgálva eljutott a ma „Clausius–Clapeyron”-egyenletnek nevezett egyenlet levezetéséig. Gibbs ehhez két, egykomponensű fázis (α és β) egyensúlyát vizsgálta, és kétszer újra írta a (124) egyenletet, egyszer az α , másodszor a β fázisra. Először mindkét egyenletből kifejezte $\sum_i m_{i(\Phi)} \cdot d\mu_{i(\Phi)}$ értékét, melyek egyensúlyban azonosak, ezért a két egyenlet jobb oldalai (és ezért a bal oldalai is) megegyeznek, ahonnan már következik a Clausius–Clapeyron egyenlet:

$$dp/dT = (S_\beta - S_\alpha)/(V_\beta - V_\alpha). \quad (131)$$

A (131) egyenlet lényegében az $(\alpha + \beta)$ egykomponensű, kétfázisú egyensúlyhoz tartozó egyensúlyi nyomás hőmérsékletfüggését adja meg. Az anyagtudományban gyakran használjuk a (131) egyenletet reciprokát, amikor például egy egykomponensű szilárd fázis egyensúlyi olvadáspontjának a nyomásfüggését keressük. Vegyük észre, hogy ebben az esetben $N_C = 1$ és $N_P = 2$, azaz a (123+), (123K) egyenletekből $N_{P-\max} = 3$ és $N_F = 1$. Tehát a két lehetséges állapotváltozó – a nyomás és a hőmérséklet – közül csak az egyiket változtathatjuk meg szabadon, de a másiknak követnie kell a (131) egyenlettel felírt természet-törvényt ahhoz, hogy a rendszer változatlanul ugyanabban a kétfázisú egyensúlyban maradjon. Ez a fázisszabály lényege egy példán bemutatva.

15. Az azeotropos minimum- vagy maximumpont létezésének megsejtése (99–100. oldal)

Gibbs egy olyan kétkomponensű rendszert vizsgált, amelyben két fázis van egyensúlyban, melyeknek azonos az összetételük (ami ritkán fordul elő). Gibbs erre az esetre megmutatta, hogy konstans nyomáson ehhez a ponthoz minimális vagy maximális egyensúlyi hőmérséklet tartozik, illetve konstans hőmérsékleten minimális vagy maximális egyensúlyi nyomás, amelyet ma azeotropos pontnak nevezünk. Gibbs ugyan nem szerkesztett ilyen fázisdiagramokat, de kijelentései érvényesek az általunk ma ismertekre. Gibbs ugyanezt kiterjesztette a háromkomponensű és háromfázisú esetre is, amikor a harmadik fázis összetétele az első két fázis kombinációjából adódik.

16. Egy fázis stabilitásának határa (100–115. oldal)

Gibbs egy α fázissal kapcsolatban azt vizsgálta, hogy mi a feltétele annak, hogy abból ne tudjon egy másik (β) fázis képződni ugyanazokkal a komponensekkel, ebben az esetben ugyanis az α fázis stabil marad. Gibbs arra jutott, hogy egy α fázis akkor stabil, ha az abból elvileg képződni képes összes, vele azonos tömegű β fázisnak pozitívabb a Gibbs-energiája. Ha az $\alpha \rightarrow \beta$ fázisátalakulást vizsgáljuk, amelyet a $\Delta G \equiv G_\beta - G_\alpha$ Gibbs-energia-változás kíséri zéró tömegváltozás mellett, akkor az eredeti α fázis akkor marad stabil, ha $\Delta G > 0$. Ma ugyanezt a feltételt két másik alakban is szoktuk használni: a természetben spontán csak olyan átalakulások mehetnek végbe, melyeket negatív Gibbs-energia-változás kíséri ($\Delta G < 0$), és csak olyan állapotok lehetnek egymással egyensúlyban, melyek egymásba alakulását zérus Gibbs-energia-változás kíséri ($\Delta G = 0$). Ugyanezek a következtetések egyébként már a (2K) egyenlettel felírt egyensúlyi feltételből is következnek.

Gibbs ezen túl levezette egy fázis stabilitásának határát is:

$$\left(\frac{d\mu_i}{dm_i} \right)_{T, P, \mu_{j \neq i}} = 0. \quad (182 = 200)$$

A (182) egyenletet persze megint inkább egy fázisra kellett volna felírnia, mint az egész rendszerre, hiszen az egy fázis és nem a teljes rendszer stabilitására vonatkozik, azaz:

$$\left(\frac{d\mu_{i(\Phi)}}{dm_{i(\Phi)}} \right)_{T, P, \mu_{j(\Phi) \neq i(\Phi)}} = 0. \quad (182K)$$

A (182K) egyenletet talán nem ismerjük fel elsőre, de ismerősebbé válik, ha $\mu_{i(\Phi)}$ helyére a (104K) egyenletet helyettesítjük:

$$\left(\frac{d^2 G_\Phi}{dm_i^2(\Phi)} \right)_{T, p, \mu_j(\Phi) \neq \mu_i(\Phi)} = 0. \quad (182KK)$$

A (182KK) egyenletet ma úgy használjuk, hogy ha a (182KK) kifejezés bal oldala pozitív, akkor a fázis stabil, ha pedig negatív, akkor a fázis instabil, azaz spontán két fázisra esik szét. Látjuk, hogy a (182KK) egyenlet a fázisstabilitás határfeltételét adja meg.

17. A kritikus állapot (129–131. oldal)

Gibbs idejében már kísérletileg ismert volt a kritikus jelenség, amely azt jelentette, hogy két állapot egyensúlyi létezésének a változók egyik irányában lehet egy határa, amely felett ez az egyensúly már nem létezik tovább – ezt nevezi Gibbs kritikus állapotnak. Érdekes, hogy ez az első indok, amely miatt a 129. oldalon Gibbs valakinek az előző munkájára hivatkozik egy lábjegyzetben, leszámítva a Clausiustól átvett mottót. Gibbs először szintén a (182) egyenletet vezette le mint a kritikus állapot feltételét, de azt ezúttal a (200) sorszámmal látta el. Azután továbbment, és úgy találta, hogy a kritikus állapotra a következő feltételnek is teljesülnie kell:

$$\left(\frac{d^2 \mu_i}{dm_i^2} \right)_{T, p, \mu_j \neq \mu_i} = 0. \quad (201)$$

18. A gravitáció hatása a heterogén egyensúlyra (144. oldal)

Gibbs (219), (220) egyenletei szerint ahhoz, hogy figyelembe vegyük a gravitáció hatását az anyagegyensúlyokban, a belső energiát a Newton-féle potenciális energiával kell megnövelni: $g \cdot h \cdot m$, ahol g (m/s^2) a gravitációs gyorsulás, h (m) egy tetszőleges alapszinttől mért magasság a gravitációs erőterben, m (kg) pedig a tömeg, így e kifejezés mértékegysége energia (J). Behelyettesítve például a (92) egyenletbe ezt a mennyiséget, egyensúlyban (azaz a $dG = 0$ érték mellett), konstans hőmérsékleten a következő kifejezéshez jutunk:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh, \quad (233)$$

ahol ρ (kg/m^3) a fázis sűrűsége. Ebből az egyenletből az következik, hogy a gáznyomás fokozatosan csökken a magasság növelésével, ami a Föld gravitációs- és légterében bizonyított tény. Az anyagegyensúlyok feltételei pedig a következőképpen módosulnak:

$$\mu_i + g \cdot h = \text{const.}, \quad (234)$$

ahol minden komponensre teljesülnie kell külön-külön a (234) egyenletnek. A (234) egyenlet szerint a komponensek egyensúlyi fajlagos kémiai potenciáljai gravitációs erőterben nem konstans értékűek (mint ahogy az a (21) egyenletekből következne), hanem magasságfüggőek.

19. Az ideális gázok és gázelegyek alapegyenletei (150–184. oldal)

A 150. oldal első nem számozott egyenletében Gibbs az ideális gáztörvényt írta fel, bár annak nem teljes alakjában:

$$p \cdot V = a \cdot T, \quad (254+)$$

ahol a -t konstansnak nevezi. Azt nem csodálom, hogy 1875–1878-ban még nem ismerte a gázállandót, de azt igen, hogy Avogadro után három nemzedékkel nem szerepelteti a tömeget a (254+) egyenlet jobb oldalán. Aztán persze eljött ennek is az ideje, de csak 17 oldallal később, amikor a gázelegyekre a következő egyenletet írta fel:

$$p \cdot V = T \cdot \sum_i a_i \cdot m_i. \quad (308)$$

Ezt az egyenletet redukálva egy komponensre kapjuk:

$$p \cdot V = T \cdot a_i \cdot m_i. \quad (308K)$$

A (308K) egyenlet azért nem a gázállandót tartalmazza, mert ezt nem az anyagmennyiség, hanem a tömeg függvényében írta fel, így az a_i konstans az univerzális gázállandó és a komponensfüggő moláris tömeg hányadosa. Gibbs később feljegyezte a (308K) egyenletet is, de sajnos általános formában, ami szerintem hibás (lásd fent):

$$p \cdot V = a \cdot m \cdot T. \quad (350)$$

20. A Dalton-szabály kiterjesztése (158. oldal)

Gibbs megismételte, bebizonyította és kiterjesztette Dalton empirikus törvényét, miszerint a kémiai reakcióktól mentes ideális gázokban a teljes nyomás egyenlő a komponensek parciális nyomásainak összegével ($p = \sum p_i$). Gibbs szerint hasonló egyenletek érvényesek több mennyiségre is:

$$\begin{aligned} p &= \sum p_i, & S &= \sum S_i, & U &= \sum U_i, \\ H &= \sum H_i, & A &= \sum A_i, & G &= \sum G_i \end{aligned} \quad (282-283)$$

A (282–283) egyenletek szerint egy gázelegyenben az egyes gázkomponensek úgy viselkednek, mintha nem vennének tudomást a többi gázkomponensről, azaz mintha egyedül lennének a gázelegyenben. Ez persze csak a kisnyomású, ún. ideális gázokban igaz, ahol a gázatomok – gázmolekulák messze vannak egymástól és csak nagyon ritkán ütköznek.

21. Gázkomponensek összekeveréséből származó entrópiánövekmény (165–168. oldal)

Gibbs a (282–283) egyenletekben még nem vette figyelembe a konfigurációs entrópiát, amely az ő korában még nem volt ismert. Azonban először egy példán

keresztül levezette a (297) egyenletet, amelyet aztán a (298) egyenlettel általánosított is, amely a (282–283) egyenletekhez képest fellépő entrópiánövekményt adja meg. Némi átalakítással Gibbs (297–298) egyenleteiből következik az i komponens parciális konfigurációs entrópiánövekménye (ΔS_i , J/K, bár ezt a jelet Gibbs nem használta):

$$\Delta S_i = -k \cdot \ln \left(\frac{V_i}{\sum_i V_i} \right), \quad (298K)$$

ahol k (J/K) a Boltzmann-állandó (amelyet Gibbs 1875–1878-ban még nem ismert, és persze nem is így jelölt), V_i (m³), pedig az i gázkomponens különálló térfogata az összekeverés előtt, azonos hőmérsékleten és nyomáson. Vegyük észre, hogy a logaritmus alatt az i komponens térfogathányada = móltörtje szerepel a gázelegyenben, de Gibbs sajnos koncentrációkkal nem foglalkozott. A (298K) egyenlet tudtommal a konfigurációs entrópia első levezetése. A (298K) egyenlet értelmében a konfigurációs entrópia mindig pozitív értékű, hiszen az 1-nél kisebb számok logaritmusai negatív. Emiatt persze a (87), (91) egyenletek értelmében valamennyire csökkeni fog a Helmholtz-energia is és a Gibbs-energia is akkor, amikor egykomponensű gázokat keverünk össze egymással. Behelyettesítve a (298K) egyenletet a (91) definícióegyenletbe és figyelembe véve, hogy az ideális gázelegyek képződése nem jár entalpiaváltozással, a gázelegy kialakulásával járó parciális Gibbs-energia-változás képlete:

$$\Delta G_i = k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{V_i}{\sum_i V_i} \right). \quad (298KK)$$

Tehát a (282–283) egyenletek közül csak a p , U és H értékekre felírtak igazak, a többit korrigálni kell. Gibbs elsőként értette meg, hogy az S , A és G esetében a (282–283) egyenletek nem tökéletesek, és elsőként jutott el a konfigurációs entrópia képletéig gázelegyekben. Innen már csak egy lépés ugyanazt a képletet kiterjeszteni folyékony és szilárd oldatokra is.

22. A mechanikai feszültség hatása a szilárd fázisok egyensúlyára (184 – 218. oldal)

Gibbs szerint az anyagok egyensúlya szempontjából is meg kell különböztetni a mechanikai feszültség alatt álló, azaz képlékenyen alakított (deformált) szilárd fázisokat azoktól, amelyek nem állnak mechanikai feszültség hatása alatt és ezért nem deformáltak. Gibbs a tökéletes (nem deformált) szilárd testek „pontjait” (kerülve az „atom” kifejezést) ($x' - y' - z'$) koordinátákban helyezte el, és különbséget tett ugyanazon valós (deformált) pontok ($x - y - z$) koordinátái között. E koordinátákból származtatott dx/dx' típusú mennyiségek a relatív deformáció mértékét fejezik ki. Gibbs a következő egyenletet írta fel a szilárd test deformációja okán fellépő belsőenergia-növekményre:

$$\delta U = V \cdot X \cdot \sum \delta \frac{dx}{dx'}, \quad (355)$$

ahol X (Pa = J/m³) egy Gibbs által közelebbről nem definiált anyagjellemző (lényegében egy rugalmassági állandó). A (355) egyenlet jobb oldali tagja adja a deformáció hatására bekövetkező Gibbs-energia-növekményt is. Gibbs ebben a fejezetben is (mint mind egyikben) helyesen érezte a lényeget, de ezt az egyenletet később még tovább kellett fejleszteni ahhoz, hogy alkalmassá váljon konkrét számításokra is.

23. Gibbs fundamentális egyenletei határfelületet tartalmazó rendszerekre (219–228. oldal)

Gibbs a határfelületet az azt két oldalról körülvevő két szomszédos fázissal értelmezte. Majd a határfelület két oldalán, azzal párhuzamosan, a két homogén fázison át húzott egy-egy párhuzamos síkot, és az így kapott hasábot tekintette rendszernek, amelynek a közepén van a határfelület és annak a bal és a jobb oldalán a két homogén fázis. Mivel a hasáb vastagsága konstans, ezért annak térfogata is konstans, így a (12) egyenletből hiányozni fog a térfogati tag. A heterogén rendszerek egyensúlyára előzőleg talált (19), (21) feltételek most is érvényesek, azaz a határfelületet magában foglaló rendszerben is azonos a hőmérséklet és a kémiai potenciál a rendszer bármely pontjában, beleértve a határfelületet is, és ez utóbbi érvényes minden egyes komponensre külön-külön is. A két fázis tulajdonságait a továbbiakban is α és β alsó indexekkel jelölöm, míg a teljes rendszernek nem lesz indexe. Ez a rendszer azonban tartalmaz egy határfelületet is, aminek alsó indexe „s”. Innen a határfelület tulajdonsága egyenlő a teljes rendszer tulajdonságával mínusz a két fázis tulajdonságainak összegével:

$$U_s = U - U_\alpha - U_\beta, \quad S_s = S - S_\alpha - S_\beta, \quad (490-491)$$

$$m_{i(s)} = m_i - m_{i(\alpha)} - m_{i(\beta)}$$

ahol U_s (J) a felületi réteg többlet-belsőenergiája, S_s (J/K) a felületi réteg többletentrópiája és $m_{i(s)}$ (kg) az i komponens többlet tömege a felületi rétegben. A fentiek szerint redukált (12) egyenlet a határfelületi többlet mennyiségek között is érvényes lesz:

$$dU_s = T \cdot dS_s + \sigma \cdot dA + \sum_i \mu_i \cdot dm_{i(s)}, \quad (501)$$

ahol σ (J/m²) a határfelület energia, A (m²) a határfelület (egyik oldalának) alapterülete. Az (501) egyenlet legnagyobb újítása a (12) egyenlethez képest az, hogy tartalmazza a határfelületi tagot is ($\sigma \cdot dA$). Gibbs kijelentette [3], hogy σ értékének mindig pozitívnak kell lennie, és adott körülmények között (azaz a határfelületet körbevevő fázisok mibenléte, azok összetétele,

a hőmérséklet és a nyomás fix értékei mellett) olyan összetételű és szerkezetű határfelület lesz stabil, amelynek a határfelületi energiája minimális, azaz:

$$0 < \sigma \rightarrow \min. \quad (497K)$$

Ezt követően Gibbs integrálta az (501) egyenletet:

$$U_s = T \cdot S_s + \sigma \cdot A + \sum_i \mu_i \cdot m_{i(s)}. \quad (502)$$

Gibbs sajnos a határfelületet is tartalmazó rendszerek teljes belső energiájára nem írt fel egyenletet, de mi ezt megtehetjük, ha az eredeti (55 = 93) egyenletekhez hozzáadjuk az (502) egyenlet új tagját, és ha a (12) egyenlethez hozzáadjuk az (501) egyenlet új tagját:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV + \sigma \cdot dA + \sum_i \mu_i \cdot dm_i, \quad (501K)$$

$$U = T \cdot S - p \cdot V + \sigma \cdot A + \sum_i \mu_i \cdot m_i. \quad (502K)$$

A (12) egyenlet helyett az (501K) egyenlet tekinthető Gibbs egyik fundamentális egyenletének a határfelületeket tartalmazó rendszerekben. A (497), (501), (501K) egyenletekben látható $\sigma \cdot dA$ tag Gibbs újabb zseniális felismerése, ami a dA alapterület-növekményű új határfelület megteremtéséhez szükséges munka. Gibbs azonban nem egy, hanem négy fundamentális egyenletet vezetett be műve elején (lásd a (88), (90), (92) egyenleteket is) és ezek mindegyike kiegészíthető a határfelületi taggal. Példaként a (91–92) egyenletek is kiegészíthetők az (501–502) egyenletek új tagjaival:

$$G \equiv U + p \cdot V - T \cdot S + \sigma \cdot A + \sum_i \mu_i \cdot m_i, \quad (502KK)$$

$$dG = V \cdot dp - S \cdot dT + \sigma \cdot dA + \sum_i \mu_i \cdot dm_i. \quad (501KK)$$

Az anyagtudományban az (501KK) egyenletet tekintjük Gibbs fundamentális egyenletének határfelületet is tartalmazó rendszerekre. Innen következik a határfelületi energia termodinamikai definíciója is:

$$\sigma \equiv \left(\frac{dG}{dA} \right)_{p, T, m_i}, \quad (501KKK)$$

ahol a komponenstömegek és a határfelület alapterülete függetlenek egymástól, ami vagy a fázisok alakjának megváltoztatásával, vagy azok diszpergálásával érhető el. Ez még akkor is így van, ha vannak kutatók, akik ezeket a mennyiségeket (szerintem hibásan) egymástól függő mennyiségeknek tekintik [11, 12]. Az utóbbi öt egyenletet Gibbs ugyan nem írta fel, de ezek egyértelműen következnek Gibbs főművéből, és ezért a tudományos világ Gibbs nevéhez kapcsolja ezeket. Mint a [6] cikkemben bemutattam, az (501KK) egyenletből eredeztethető a kolloidkémia és az anyagi rendszerekben érvényes határfelületi jelenségek összes egyenlete.

24. A Laplace-egyenlet levezetése (228–242. oldal)

A (2) egyenletből az egyensúly feltétele: $\delta U = 0$. Behelyettesítve ide a (490) egyenletből az $U = U_s + U_a + U_\beta$ egyenlőséget, a határfelületet is tartalmazó rendszer egyensúlyára a következő egyenletet kapjuk:

$$\delta U_s + \delta U_a + \delta U_\beta = 0. \quad (498)$$

Helyettesítsük be ide a (58), (497) egyenleteket úgy, hogy az összes entrópia- és tömegértéket konstansnak tekintjük! Innen:

$$\sigma \cdot \delta A - p_a \cdot \delta V_a - p_\beta \cdot \delta V_\beta = 0. \quad (499)$$

Most csúsztassuk arrébb a határfelületet δN távolságra a β fázis irányába, ekkor $\delta V_a = A \cdot \delta N$ és $\delta V_\beta = -A \cdot \delta N$. Behelyettesítve ezeket az egyenleteket a (499) egyenletbe:

$$p_a - p_\beta = \frac{\sigma}{A} \cdot \frac{\delta A}{\delta N}. \quad (499K)$$

A (499K) egyenlet szerint a határfelület két oldalán lévő nyomáskülönbség attól függ, hogy a határfelület eltolásával mennyi lesz $\delta A / \delta N$ értéke. Ha a határfelület sík, akkor annak eltolása nem változtat annak alapterületén, ezért ekkor $\delta A / \delta N = 0$, és ekkor a (499K) egyenletből $p_a - p_\beta = 0$, vagy más szavakkal $p_a = p_\beta$. Ezzel visszakaptuk a heterogén egyensúlyok (20) egyenlettel már leírt feltételét, miszerint az egymástól sík határfelülettel elválasztott fázisok egyensúlyban azonos nyomással rendelkeznek. Ha azonban a határfelület görbült, akkor Gibbs szerint a következő egyenlethez jutunk:

$$p_a - p_\beta = \sigma(c_1 + c_2), \quad (500)$$

ahol c_1 és c_2 (1/m) a határfelület két főgörbületi sugara úgy, hogy a görbületek középpontja az α fázisban van, azaz a nyomás mindig a görbülettel bezárt (nano-)fázisban lesz nagyobb. Ezzel Gibbs reprodukálta a Laplace-egyenletet, amely egyébként a határfelületi energiák kísérleti meghatározásának egyik alapegyenlete. Példaként megemlítem, hogy egy r sugarú gömbre $c_1 + c_2 = 2/r$, és ezért az (500) egyenlet konkretizálódik:

$$2\sigma = r(p_a - p_\beta). \quad (522 = 550)$$

Tehát egy gömb alakú, kis méretű, r sugarú α fázis akkor lesz mechanikai egyensúlyban az azt körülvevő nagy méretű β fázissal, ha teljesül az (522 = 550) egyenlet.

25. A határfelületi Gibbs–Duhem-egyenlet levezetése (229–230. oldal)

Ezt követően Gibbs vette az (502) egyenlet teljes differenciálját. Ennek baloldala megegyezik az (501) egyenlet bal oldalával, így ezek jobb oldalainak is

meg kell egyezniük egymással. Némi átalakítás után megkapta a felületi Gibbs-Duhem egyenletet:

$$S_s \cdot dT + A \cdot d\sigma + \sum_i m_{i(s)} \cdot d\mu_i = 0. \quad (503)$$

Megjegyzem, hogy Végh Ádám és Korózs József doktoranduszaimmal ezentúl több felületi Gibbs-Duhem-egyenletet vezettünk le [7].

26. Gibbs adszorpciós egyenletének levezetése (230–237. oldal)

A többlet felületi tömegeket osztva a felülettel kapjuk a Γ_i (kg/m²) mennyiségek definícióját, amelyek az i komponens határfelületi többletei:

$$\Gamma_i \equiv m_{i(s)}/A. \quad (505)$$

Osszuk el az (503) egyenletet a határfelület alapterületével és helyettesítsük be az így adódó egyenletbe az (505) egyenlettel definiált mennyiségeket! Innen következik Gibbs adszorpciós egyenlete konstans hőmérsékleten:

$$d\sigma = -\sum_i \Gamma_i \cdot d\mu_i. \quad (508)$$

Az (508) egyenlet elvileg a határfelületi energia kiszámítására alkalmas a térfogati összetétel függvényében, adott hőmérsékleten. De csak elvileg, mert az (508) egyenlet még egy kétkomponensű A – B rendszerben is három ismeretlent tartalmaz (σ , Γ_A és Γ_B) még akkor is, ha ismert a kémiai potenciálok függése a térfogati összetételtől:

$$d\sigma = -\Gamma_A \cdot d\mu_A - \Gamma_B \cdot d\mu_B. \quad (508K)$$

Gibbs egy lépéssel közelebb került az (508K) egyenlet hasznossá tételéhez azzal, hogy az egyik komponens felületi többletét formálisan kinullázta ($\Gamma_A \equiv 0$), és ekkor csak a másik komponens relatív felületi többlete marad meg az (508) egyenletben, amelyet $\Gamma_{B(A)}$ -val jelölhetünk. Ekkor egy kétkomponensű rendszerben konstans hőmérsékleten:

$$d\sigma = -\Gamma_{B(A)} \cdot d\mu_B. \quad (514)$$

Sajnos még az (514) egyenlet sem alkalmas a felületi feszültség és a felületi összetétel együttes modellezésére, hiszen az egyetlen (514) egyenlet mindkét határfelületi ismeretlent tartalmazza (σ és $\Gamma_{B(A)}$). Ennek ellenére az (514) egyenletet főleg a kolloidkémiaiban gyakran használják, hiszen a vizes oldatokban gyorsan és könnyedén lehet a térfogati koncentráció függvényében felületi feszültséget mérni. Ha ezentúl lemérjük a kémiai potenciálok függését is a térfogati koncentrációk függvényében, akkor az (514) egyenletből legalább $\Gamma_{B(A)}$ értéke kiszámítható, ami fontos a kétkomponensű oldatok felületi dúsulásának értelmezéséhez.

Ha azonban mindkét ismeretlent (a felületi feszültséget és a felületi koncentrációt is) ismeretlen-

nek tekintjük, és modellezni akarjuk, akkor az (508), (514) egyenletek helyett az 1932-ben publikált Butler-egyenletet [8], illetve annak kiterjesztését [9] érdemes használni. Arról, hogy a Butler-egyenlet is Gibbs termodinamikájából eredeztethető, lásd [10].

27. Csíráképződés (252–258. oldal)

Gibbs megvizsgálta egy gömb alakú, r sugarú csíra (α fázis) keletkezésének feltételét egy nagy méretű β fázisból, annak belsejében. Gibbs W -vel jelölte azt a munkát (J), amely ennek a csírának a keletkezéséhez szükséges, és amely egy térfogati és egy felületi tagot tartalmaz:

$$W = -(4/3)\pi r^3(p_\alpha - p_\beta) + 4\pi r^2\sigma. \quad (554 = 559)$$

Majd Gibbs kifejezte a csíra sugarát az (522) egyenletből, és behelyettesítette ezt a kifejezést az (554) egyenletbe, így a csíráképződéshez szükséges maximális munkához jutott:

$$W_{\max} = \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma^3}{(p_\alpha - p_\beta)^2}. \quad (557)$$

Az (557) egyenlettel leírt mennyiség a ma „kritikus csírasugár”-ként ismert, csírasugárhoz tartozó maximális munka, amit a csíra megteremtéséhez kívülről be kell fektetni: ezt a modern irodalom a csíráképződés aktiválási energiájának is nevezi. A csíra növekedése ezen méretig problematikus és bizonytalan. Ha azonban a csíra sugara (véletlenül) ezen kritikus érték fölé nő, akkor a csíra spontán növekedésnek indul és ennek csak az anyafázis mérete szab határt. Érdekes, de egyben gyanús is, hogy ez a kritikus csíraméret megegyezik az (522) egyenlettel leírt „mechanikai egyensúlyi” mérettel.

Gibbsnek ezt a levezetését kissé problematikusnak érzem. Nem értem, hogy milyen alapon tett negatív előjelet az (554) egyenlet első tagja elé. Ez a tag ugyanis azt a munkát fejezi ki, amely a nagyobb nyomású csíra térfogatának létrehozásához kell, de hogyan keletkezhethet egy nagy nyomású belső rész spontán egy kis nyomású fázis belsejében. A megoldás talán a belsőenergia-változás (11) egyenletében rejlik, ahol valóban negatív előjel van $p \cdot dV$ tag előtt, de esetünkben nem térfogatnövekedés (dV), hanem nyomásnövekedés ($dp = p_\alpha - p_\beta$) lép fel. Újfént erre jó a Gibbs-energia használata, hiszen dG a (92) egyenletben a $+V \cdot dp$ taggal arányos, és ezek szerint az (554) egyenlet első tagja elé valóban pozitív előjelet kellene írni. Ha viszont így teszünk, akkor a $W_{\max} = \infty$ eredményre jutunk. A ma is elfogadott (557) egyenlet csak úgy jön ki, ha megőrizzük a negatív előjelet az (554) egyenlet első jobb oldali tagja előtt.

Most röviden bemutatom, hogy a mai korban hogyan jutunk el közel ugyanehhez az (557) egyenlethez

[6]. Vegyük figyelembe, hogy α csíra azért képződik a β fázis közepén, mert az α és β fázisok különböznek egymástól. Ezért a csíra keletkezése az anyafázisból térfogati Gibbs-energia-változással jár, amelynek a jele egységnyi térfogatú csírára: ΔG_V (J/m³), ahol ΔG_V hőmérséklet- és nyomásfüggő, és értéke függ az α és β fázisok anyagi minőségétől is. Ekkor a csíráképződéssel kapcsolatos munka, avagy Gibbs-energia-változás:

$$W = (4/3)\pi r^3 \cdot \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma. \quad (554K)$$

Mivel ΔG_V hőmérséklet- és nyomásfüggő mennyiség, van olyan hőmérséklet és/vagy nyomásintervallum, amelyen belül $\Delta G_V \geq 0$, azaz a csíráképződés a térfogati tag szerint sem előnyös, és ekkor az (554K) egyenlet szerint a csírasugár növelésével W értéke monoton módon nő a végtelenig. Általában van azonban olyan hőmérséklet- és/vagy nyomástartomány is, amelyen belül a csíráképződés legalább a térfogati tag szempontjából előnyös, azaz $\Delta G_V < 0$. Ekkor az (554K) egyenlet szerint a $W = f(r)$ függvény egy maximumon megy át, ahol a maximumhoz tartozó kritikus csírasugár (r_{cr} , m) úgy kapható meg, ha az (554K) egyenlet r szerinti deriváltját nullával tesszük egyenlővé, és ekkor:

$$r_{cr} = 2\sigma/\Delta G_V. \quad (522K)$$

Ha ezt az egyenletet visszahelyettesítjük az (554) egyenletbe, akkor:

$$W_{max} = \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma^3}{\Delta G_V^2}. \quad (557K)$$

Vegyük észre, hogy az (522K), (554K), (557K) egyenletek megegyeznek az (522), (554), (557) egyenletekkel, ha elkövetjük a $\Delta G_V \rightarrow (p_\alpha - p_\beta)$ átalakítást, és nagyvonalúan kezeljük az előjeleket. De fontos, hogy az (522K) egyenlet a kritikus és nem az egyensúlyi csíraméretre vonatkozik, ami különösen a nanoanyagok egyensúlya szempontjából lényeges különbség [6, 11]. Ezért fontos, hogy az (522) egyenletben csak mechanikai szempontból, de nem a fázis-egyensúly szempontjából értelmezett egyensúlyi méretről írtam, bár Gibbs sajnos ezt a különbséget nem tette egyértelművé, így sokan még mindig a fázis görbületéről gondolják, hogy az meghatározza a nanoanyagok fázisegyensúlyát [6, 11].

Mint látjuk, én ugyan nem pontosan értem Gibbs fenti logikáját, de Gibbs végeredménye hasonlít a maihoz, és ezért joggal állíthatjuk az egész világgal egyetértésben, hogy a csíráképződés elmélete is Gibbstől származik, és tény, hogy ez az elmélet ma is az anyagtudomány fontos fejezete. A feni értetlenségem miatt pedig nevezhetjük ezt a történetet 3. számú „véletlen” egybeesésnek.

28. Egy új sík fázis instabilitásának feltétele két fázis határán (258-265. oldal)

Gibbs egy α és egy β fázisok sík határfelületét vizsgálta, és arra a kérdésre kereste a választ, hogy mi a feltétele annak, hogy ezen a határfelületen ne tudjon megjelenni egy sík γ fázis, amely elválasztaná az eredeti α és β fázisokat egymástól. Úgy találta, hogy a γ sík fázis instabilitásának a feltétele:

$$\sigma_{\alpha/\beta} < \sigma_{\alpha/\gamma} + \sigma_{\beta/\gamma}, \quad (560+)$$

ahol $\sigma_{\alpha/\beta}$ (J/m²) az α és β fázisokat elválasztó határfelület határfelületi energiája, $\sigma_{\alpha/\gamma}$ (J/m²) az α és γ fázisokat elválasztó határfelület határfelületi energiája, $\sigma_{\beta/\gamma}$ (J/m²) a β és γ fázisokat elválasztó határfelület határfelületi energiája. Gibbs a γ fázist elég vastagnak tekintette ahhoz, hogy az utóbbi két mennyiség ne legyen a γ fázis vastagságának függvénye. Az (560+) egyenlet, azaz a fenti kérdésre adott válasz egyébként már a (497K) egyenletből is következik, miszerint egyensúlyban $\sigma \rightarrow \min$.

Gibbs azt is helyesen látta, hogy ha az (560+) egyenlőtlenség teljesül, akkor az α és β fázisok sík határfelületén nem sík, hanem lencse alakú γ fázis fog megjelenni. Gibbs bonyolult képletet is levezetett ennek a fázisnak a pontos alakjára, de az ebben a kivonatban túl specifikus információ lenne.

29. Az egyensúlyi peremszög Young egyenletének levezetése (326. oldal)

Gibbs több, a fentihez hasonló példája közül érdemes kiemelni egy speciális fáziskonfigurációt, amikor egy kis méretű, nyugvó folyadékcsepp egy sík szilárd fázison pihen egy gázfázisban úgy, hogy a gravitáció hiányában gömbsüveg alakú folyadékfázis Θ peremszöget alkot a sík szilárd fázison. Erre az esetre Gibbs levezette (reprodukálta) a Young-egyenletet:

$$\sigma_{lg} \cdot \cos \Theta = \sigma_{sg} - \sigma_{sl}, \quad (672)$$

ahol σ_{lg} (J/m²) a folyékony fázis felületi feszültsége, σ_{sg} (J/m²) a szilárd fázis felületi energiája, σ_{sl} (J/m²) a szilárd/folyadék határfelületi energia.

30. Az elektromotoros erő hatása az anyag-egyensúlyra (331–349. oldal)

Gibbs ebben a fejezetben áttért az elektrokémiai rendszerek tárgyalására. Az ő idejében az atomok létezése sem volt biztos, így töltött atomokról, azaz ionokról pláne nehéz volt beszélni. Gibbs mindenestre túltette magát ezen, és úgy kezelte, hogy az elektrolitokban lévő ionok képesek az elektromosság (azaz az elektromos töltések) vezetésére, bár arról még nem tudhatott, hogy az ion olyan atom, amely vagy elveszített vagy nyert egy vagy több elektront, mivel ekkor még nem fedezték fel az elektront. Ezen

túl két, anyagában azonos fémes elektródát helyezett gondolatban az elektrolitba, és azt az elektromos áramot vizsgálta, amely az egyik elektródán keresztül belép az elektrolitba, majd a másikon át kilép abból. A lényegig végül a cikke utolsó egyenletében jutott el, amikor a Gibbs-energia változásának megadja egy újabb, az elektromos töltésátvitellel kapcsolatos tagját úgy, hogy a kettő közötti arányossági tényező a potenciálkülönbség, avagy „elektromotoros erő” (ΔE , V):

$$dG = -\Delta E \cdot dq, \quad (700)$$

ahol q (C) az elektromos töltés. Gibbsnek ebben a cikkében ez az utolsó és egyben utolsó zseniális egyenlete. Ma a (700) egyenlet az elektrokémiai termodinamika alapegyenlete.

Összefoglalás

A fenti kivonatban három alkalommal is „véletlen egybeesést” véltem felfedezni Gibbs eredményei és a saját gondolataim között. Ez azonban lehet, hogy csak azért van, mert Gibbs akkora zseni volt, hogy a még nekem illogikusnak tűnő levezetései is helyes eredményre vezettek, avagy én sajnos nem látok át mindent, amit Gibbs átlátott.

Mivel Gibbs idejében még nem volt ismert se a mol fogalma, se az Avogadro-szám értéke, se a mai értelemben (g/mol mértékegységgel) megadott moláris atomtömegek, ezért Gibbs nem dolgozhatott moláris mennyiségekkel, illetve anyagmennyiségekkel (mólok). Ehelyett tömegekkel dolgozott. A kettő között ma ismert kapcsolat: anyagmennyiség (mol) = tömeg (g) / moláris tömeg (g/mol). Tehát az anyagmennyiség arányos a tömeggel, az arányossági tényező pedig csak a komponens milyenségétől függ, de nem függ attól, hogy a komponens milyen fázisban van oldva, vagy milyen kémiai vegyületben van lekötve. Így Gibbs tömegalapú egyenletei könnyen átalakíthatóak anyagmennyiség-alapú egyenletekké.

Ennél sokkal nagyobb probléma volt az, hogy Gibbs nem azzal kezdte a cikkét², hogy a komponensek tömegeiből átlagos komponens-tömeghányadot (= a komponens teljes tömege osztva a teljes rendszer tömegével), a komponensek egy fázisra vonatkozó egyensúlyi tömeghányadát (= a fázisban oldott komponens tömege osztva a teljes fázis tömegével) és fázis-tömegarányt (= az adott fázis tömege osztva a

teljes rendszer tömegével) definiált volna. Emiatt persze esélye se volt felírni az anyagmérleg (vagy tömegmérleg) egyenletet, amivel kiegészíthette volna az általa feltalált (21) egyenleteket. Emiatt nem láthatta át a mérnöki probléma lényegi részét sem. Nevezetesen azt, hogy a mérnök által kiválasztott hőmérséklet, nyomás és átlagos komponens-tömegtörtek mellett keressük azt, hogy hány fázis van egyensúlyban a rendszerben, és melyek ezek, mekkorák ezekben a komponensek egyensúlyi tömeghányadai és mennyi ezek egyensúlyi fázis-tömegarányai (lásd [4]). Ezért van az, hogy a mérnök által kontrollálható koncentrációk helyett a mérnök számára ködös „potenciálok”-ról szól Gibbs főműve, és szerintem ezért vesztette el potenciális olvasóinak jelentős részét.

Ellenére Gibbs 150 éve szinte „a semmiből” megalkotta a kémiai termodinamika majdnem teljes, de kicsit hiányos csontvázát – köszönjük ezt meg neki! A csontvázzal azonban hiányzott néhány kisebb csont és főleg az izomzat és a hús. Az elmúlt 150 év részben arról szólt, hogy néhány újabb kis méretű csonttal ékesítettük fel a csontvázat, de főleg arról, hogy rengetegen rengeteg munkaóránál külön-külön komponensek kémiai potenciáljait mérték meg különböző fázisokban az összetétel, a hőmérséklet, a nyomás (stb.) függvényében, illetve határozták meg a legkülönbözőbb anyagok egyensúlyi állapotát a legkülönbözőbb nyomásokon, hőmérsékleteken stb. Az 1970-es években megjelentek a személyi számítógépek, így azóta egyre többen foglalkoznak azzal is, hogy Gibbs tanaiból szoftvereket írnak, amivel persze csak akkor tudnak akármit is kiszámolni, ha ezeket kiegészítik olyan adatbankok is (amelyeket megint mások építtetnek), amelyek a rengeteg mérésből desztillált modellparamétereket tartalmazza, amelyek segítségével „minden” lehetséges fázisban oldott „minden” komponens kémiai potenciálja számolható minimum a fázis összetételének, a hőmérsékletnek és a nyomásnak a függvényében. A többi már „csak” a numerikus módszereken, a számítástechnikán és némi gépigényen múlik és mindezt „Calphad” (= Calculation of Phase Diagrams = Fázisdiagramok Számítása) módszernek nevezzük.

Mint minden területen, újabban ezen a területen is vannak olyanok is, akik saját természetes intelligenciájukban nem bízva az anyagegyensúlyi számításokat is az ún. mesterséges intelligenciára bízják. Én nem tartozom közéjük, szerintem ez az irány zsákutca. De engem nem is kérdeznek meg erről azok, akik ezt a témát művelik, és ráadásul mindezt nem állják „tudománynak” nevezni.

² Tóth Levente kohómérnök barátom kedvenc mondását idézve talán az volt itt is a baj, hogy „a sas nem kapkod legyek után”, azaz a magasan szárnyaló Gibbsnek a koncentrációkkal való bajlódás szint alattinak tűnt, hiszen ő a NAGY kérdések megoldására fókuszált, és ezért Clausistól indította a cikkét.

1. táblázat. Gibbs jelölései (és neveztana) összevetve a modern verziókkal (ha ezek különböznek egymástól), a szövegben való előfordulás sorrendjében

Mai jelölés	Mai elnevezés, SI mértékegység	Gibbs jelölése és elnevezése
U	belső energia, J	ϵ , energia
S	entrópia, J/K	η , entrópia
T	hőmérséklet, K	t , hőmérséklet
V	térfogat, m ³	v , térfogat
N_C	a komponensek száma, –	n , a komponensek száma
N_P	a fázisok száma, –	ν , a fázisok száma
A	Helmholtz-energia, J	ψ , –
H	entalpia, J	χ , –
G	Gibbs-energia, J	ζ , –
A	alapterület, m ²	s , alapterület
q	elektromos töltés, C	e , az elektromosság mennyisége

2. táblázat. Gibbs és a modern szóhasználat összevetése

Gibbs kifejezése	Ugyanaz ma angolul	Ugyanaz ma magyarul
substances	materials	anyagok
energy	inner energy	belső energia
part	phase	fázis
mass	mass or system	tömeg vagy rendszer
potential	chemical potential	kémiai potenciál

IRODALOM

[1] J. W. Gibbs: On the equilibrium of heterogeneous substances. Trans of Connect Academy, III, pp. 108–248. (1875. május – 1876. október) <https://doi.org/10.5479/sil.421748.39088007099781>, és pp. 343–524. (1877. május – 1878. július).

[2] The collected works of J. Willard Gibbs in two volumes. Volume I: Thermodynamics. Longmans, Green and Co, NY, 1928.

[3] J. W. Gibbs: Abstract on the “equilibrium of heterogeneous substances”. Amer. J. Sci., Ser 3, Vol. XVI, (1878) 441–458. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-16.96.441>

[4] Kaptay Gy.: 150 éve jelent meg J. W. Gibbs főműve a heterogén anyagok egyensúlyáról, amelynek alapja R. Clausius 160 éve megjelent mechanikai hőelmélete és az általa bevezetett entrópia fogalma). Bányászati és Kohászati Lapok, 157 (2024-IV) 1–12. <https://ojs.mtak.hu/index.php/bkl/article/view/17916>

[5] G. Kaptay: The generalized phase rule, the extended definition of the degree of freedom, the component rule and the seven independent non-compositional state variables: to the 150th anniversary of the phase rule of Gibbs. Materials, 17 (2024) 6048. <https://doi.org/10.3390/ma17246048>

[6] G. Kaptay: The chemical (not mechanical) paradigm of thermodynamics of colloid and interface science. Adv. Colloid Interface Sci., 256 (2018) 163–192. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.04.007>

[7] A. Vegh, J. Korozs, G. Kaptay: Extension of the Gibbs–Duhem Equation to the Partial Molar Surface Thermodynamic Properties of Solutions. Langmuir 38 (2022) 4906-4912. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00229>

[8] J. A. V. Butler: The thermodynamics of the surfaces of solutions. Proc. R. Soc., A 135 (1932) 348–375. <https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0040>

[9] G. Kaptay: A coherent set of model equations for various surface and interface energies in systems with liquid and solid metals and alloys. Adv. Colloid Interface Sci., 283 (2020) 102212. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102212>

[10] J. Korozs, G. Kaptay: Derivation of the Butler equation from the requirement of the minimum Gibbs energy of a solution phase, taking into account its surface area. Coll. Surf., A 533 (2017) 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.09.010>

[11] G. Kaptay: Comparison of different model equations for size- and shape-dependent integral and partial molar Gibbs energies of nanophases to screen out the incorrect ones. Langmuir (2025) <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c04663>

[12] J. Lee, K. J. Sim: General equations of CALPHAD-type thermodynamic description for metallic nanoparticle systems. Calphad, 44 (2014) 129–132. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2013.07.008>

A mágneses keverés hatása az eutektikus Al–Si ötvözet mikroszerkezetére

KÓCSÁK ÉVA^{1,2,@} , ROÓSZ ANDRÁS^{1,2,@} , RÓNAFÖLDI ARNOLD^{1,2}, VERES ZSOLT^{1,2} 

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

²HUN-REN Magyar Kutatási Hálózat, 1052 Budapest

@E-mail: eva.nagy-kocsak@uni-miskolc.hu; Tel.: +36-(46)-565-111-(15-38)

Másodközlés – Eredeti közlemény:

Effect of Magnetic Stirring on the Microstructure of Eutectic Al-Si Alloy

Éva Kócsák^{1,2}, András Roósz², Arnold Rónaföldi², Zsolt Veres¹

Crystals 2025, 15(9), 778.

<https://doi.org/10.3390/cryst15090778>

A cikkben a forgó mágneses térrel (RMF) való keveréssel és keverés nélkül kristályosított eutektikus alumínium–szilícium (Al–12,6 tömeg% Si) ötvözet próbáinak a részletes vizsgálatát mutatjuk be. A kristályosítási kísérletek, amelyeket a MICAST Hungary projekt keretében végeztünk, a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) a Solidification and Quench Furnace (SQF) berendezésben végzett kristályosításnak a tükörkísérletei voltak.

A földi minták az ISS-en végzett kísérletekkel azonos kristályosítási paraméterek mellett készültek.

A vizsgálat során elemeztük a minták mezoszerkezetét és az eutektikus mikroszerkezetet mind a mágneses keverésnek kitett, mind a keverés nélküli (RMF-mentes) minták esetében. Különös figyelmet fordítottunk a mágneses keverés hatásának az olyan kulcsfontosságú mikroszerkezeti jellemzőkre, mint az eutektikuslemez-távolság, a lemezek hossza, valamint a lemezek térbeli orientációja.

E paraméterek mérése és elemzése átfogó képet ad az eutektikumok mikroszerkezetéről. A kísérletben alkalmazott 10 mT-val való RMF keverés kimutatható hatást gyakorol az eutektikus szerkezet kialakulására: az alumíniumdendritek a kevert minta mindkét szélén koncentrálnak, arányuk pedig a minta vége felé csökken. Ezzel szemben a keverés nélküli mintában hosszú, elnyúlt Al-dendritek kristályosodnak a hőelvonás irányával párhuzamosan, és ezek aránya, valamint mérete a minta mentén fokozatosan növekszik. A vizsgálat lehetséges összefüggést tárt fel az eutektikus lemez-hossz csökkenése és a lemezek átlagos távolsága között.

Kulcsszavak: eutektikum, forgó mágneses tér, kristályosodás, olvadékáramlás

1. Bevezetés

Kristályosodás során az olvadékáramlás befolyásolja a kialakuló szerkezetet. A koncentráció- és hőmérséklet-különbségek eltérő sűrűségeket eredményeznek, ami áramlást idéz elő az olvadékból földi körülmények között. Az áramlás mesterségesen is előidézhető, például forgó mágneses tér (RMF) alkalmazásával kristályosodás során [1].

Mikrogravitációs körülmények között számos kísérletet végeztek az olvadékáramlás kikapcsolásá-

val az olvadékáramlás jobb megértése érdekében, az eredmények csak a földi kísérletek eredményeivel összehasonlítva adnak reális képet az olvadéka-áramlás hatásáról, ezért fontos a földi körülmények között kristályosított mikroszerkezetek tanulmányozása [2, 3]. Ezen túlmenően érdemes létrehozni egy egységes osztályozási rendszert az irreguláris, lemezes eutektikumokra.

A múltban számos kísérlet történt az eutektikus morfológiák rendszerezésére, azonban ezek korláto-

zott sikerrel jártak, mivel az adott eutektikum morfológiáját jelentősen befolyásolja az összetétel és a hűlési sebesség. Croker és munkatársai [4] kimutatták, hogy binér ötvözetek esetében bizonyos szabályok alkalmazásával az eutektikus növekedés teljes mértékben leírható.

A legtöbb kutató az eutektikus szerkezet osztályozását a kialakult morfológia alapján végezte, amely lehet rudas (rod-like) vagy lemezes (lamella-like), más szempontból reguláris vagy irreguláris, melyet a fázisok aránya határoz meg [5–8]. Mindazonáltal az irreguláris eutektikumok esetében nem létezik egységes mérési módszer és megfelelő irodalom az eredmények kiértékelésére.

A Jackson–Hunt-modell az egyik legismertebb elméleti modell az eutektikum kristályosodásának megértéséhez [9]. Számos kutatás vizsgálta a lemezek közötti távolságot (λ) különböző kristályosítási paraméterek – például túlhűlés (ΔT) és hőmérséklet-gradiens (G) – változtatásával. Ezek a tanulmányok azonban nem feltétlenül kristályosodott szerkezeteket elemeztek, hanem elméleti összefoglalókat nyújtottak az eutektikus növekedésről [10–13].

A Clapham és Smith által végzett kutatás áll a legközelebb az irreguláris eutektikumok numerikus méréséhez: ők a lemezek közötti távolságot egy vonal mentén, az eutektikus lemezekkel való metszéspontok alapján határozták meg [14].

Bizonyos esetekben, amikor a primer fázis (leggyakrabban szilárdoldat-dendrit) kristályosodása végén visszamaradó olvadékfázis térfogata olyan kicsi, hogy annak kiterjedése összemérhető az eutektikus lemeztávolsággal, elfajult eutektikum alakul ki, amelyben a két fázis egymástól függetlenül növekszik. Ilyen esetben az eutektikum második fázisa egy réteget képez a primer fázis körül [15].

Az olvadékáramlás hatást gyakorol az ötvözet mezo- és mikroszerkezetére. Az áramlásnak két típusát különböztetjük meg: a természetes (felhajtóerő-alapú) és a kényszer áramlást. A természetes áramlást az olvadékból kialakuló koncentráció- és a hőmérséklet-különbség okozta sűrűségkülönbség, felületfeszültség-különbség (Marangoni-áramlás) vagy a megszilárdult részek zsugorodása idézheti elő. A kényszeráramlás előidézésének egyik módja a forgó mágneses tér (RMF) alkalmazása, amely befolyásolja a hő- és anyagtranszportot a szilárd-olvadék határfelület előtti régióban, ezáltal jelentős változásokat idézve elő a végső szerkezet kialakulásában [1]. Korábbi kutatások azt is kimutatták, hogy a kényszerolvadékáramlás a szerkezet finomodásához vezethet [16, 17].

Mivel az ötvözetek mikroszerkezete alapvetően meghatározza azok mechanikai tulajdonságait, ezért a mikroszerkezet befolyásolásával célzott anyagtulajdonságok érhetők el. Számos módszer áll rendelkezésre e tulajdonságok javítására, például az eutektikus front sebességének szabályozása [9, 18–20], illetve az olvadékáramlás létrehozása forgó vagy haladó mágneses térrel (RMF, TMF).

Az Al–Si ötvözetek napjainkban is kiemelt jelentőségűek az iparban. Alkalmazásuk különösen elterjedt az autóiparban, a repülőgépiparban és az űrparban, valamint fontos öntészeti ötvözetként is szerepet kapnak. Ennek eredményeként számos kutatás irányul e rendszer tanulmányozására [21–30].

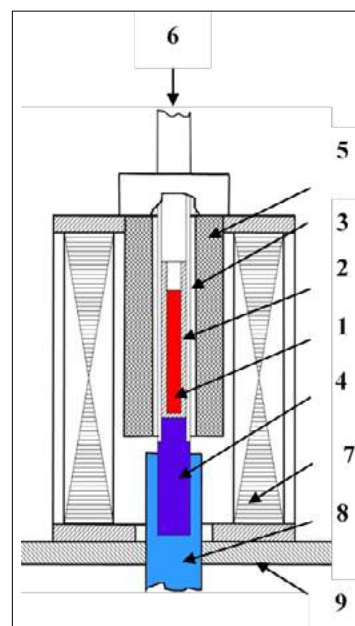
2. Kísérletek

2.1. Kristályosítási Kísérlet

A kísérletekhez Al–12,6 tömeg% Si eutektikus összetételű ötvözetet használtunk, amelyeket a Hydro Aluminium Rolled Products GmbH készített. Az alkalmazott alumínium és szilícium alapanyagok tisztasága 99,95 tömeg% volt.

A kristályosítási kísérleteket egy függőleges elrendezésű, négy fűtési zónával rendelkező Bridgman-típusú csökemencében végeztük, amelynek vázlatos felépítését az 1. ábra szemlélteti. A berendezés kilenc fő egységből áll, működését az egyenirányú hőelvonás jellemzi [31]. A minta mozgathatósága minden esetben 0,1 mm/s volt.

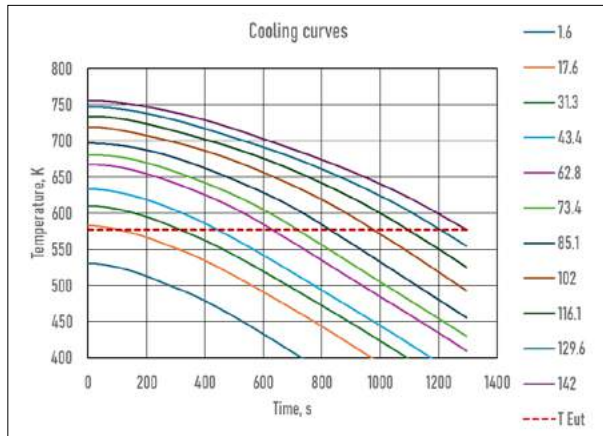
A kristályosodási folyamat kezdeti szakaszában a minták egy része nem olvadt meg teljes mértékben, így az eutektikus kristályosodási front a minta alsó végétől 18 mm távolságban helyezkedett el. A minták mentén kialakuló hőmérséklet-eloszlást 13 darab K típusú termoelemmel mértük.



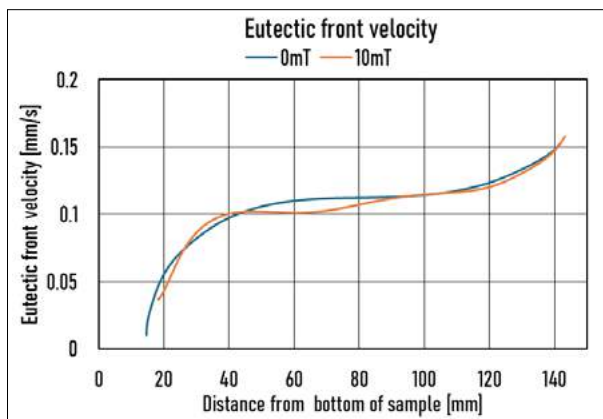
1. ábra. A kristályosító berendezés vázlata [31]. 1: minta, 2: alumínium-oxid-kapszula, 3: kvarccső, 4: réz hűtőtömlő, 5: kemence négy fűtési zónával, 6: stepmotor, 7: RMF induktor, 8: vízhűtő tank, 9: alaplap

2.2. Az eutektikus frontsebesség és a hőmérséklet-gradiens meghatározása

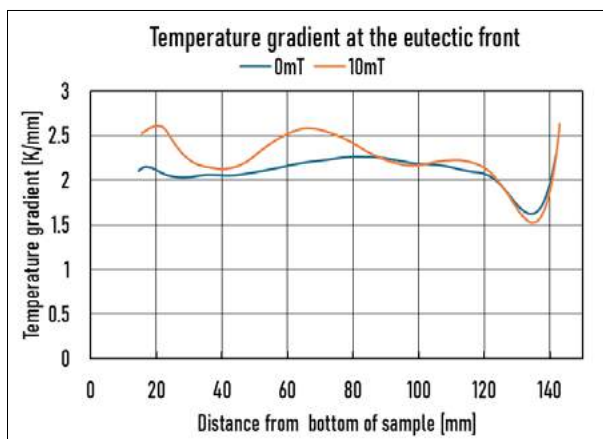
Az eutektikus front sebességét és a hőmérséklet-gradienst az eutektikus front előtt a hűlési görbék kiértékelésével határoztuk meg. A kísérlet során a minta hőmérsékletét a kerámia kapszula felületén 13 pozícióban mértük, amelyek alapján meghatározható volt az az időpillanat, amikor az adott a próba



2. ábra. Lehülési görbék a próba különböző helyein és az eutektikus hőmérséklet



3. ábra. Eutektikus frontsebesség a minta hossza mentén



4. ábra. Hőmérséklet-gradiens a minta hossza mentén

adott helyén a hőmérséklet elérte az eutektikus értéket (577 °C).

Az így kapott időpontokat a hely függvényében ábrázoltuk (távolság–idő függvény), majd az adatokra polinomot illesztettünk, és a kapott függvény idő szerinti deriválásával – meghatározhatóvá vált az eutektikus front sebessége a frontpozíció mentén (2. ábra).

Az így meghatározott értékeket a mérési pontokon ellenőriztük, és ezek jó egyezést mutattak a kísérlet során rögzített adatokkal.

Az eutektikus frontsebesség mindkét vizsgált minta esetében közel azonos értékeket mutatott (4. ábra). A folyamat kezdeti szakaszában a frontsebesség a keverés nélküli mintában (0 mT) 0,02 mm/s, míg a mágneses keveréssel (10 mT) előállított mintában 0,04 mm/s érték volt. Ezt követően a sebesség rövid idő alatt 0,1 mm/s-ra növekedett, ami a minta mintegy 40 mm-es szakaszánál volt megfigyelhető.

A 40 mm és 120 mm közötti tartományban a frontsebesség fokozatos növekedést mutatott, elérve a 0,12 mm/s értéket, majd a minta 140 mm-es pozíciójánál 0,14 mm/s maximális érték volt jellemző.

A hőmérséklet-gradiens meghatározása során először egy adott termoelem távolságnál meghatároztuk az eutektikus hőmérséklethez tartozó időpontot. Ennél az időpontnál leolvastuk az előző és a következő termoelem távolsághoz tartozó hőmérsékletet. A két hőmérséklet különbségét elosztva az előző és a következő termoelemek távolságának különbségével kaptuk az adott termoelem távolságnál a hőmérséklet-gradienst. Az így meghatározott hőmérséklet-gradienseket a távolság függvényében ábrázolva, a számított értékekre polinomot illesztve kiszámítottuk a hőmérséklet-gradienst a próba távolságának függvényében (4. ábra).

A meghatározott hőmérséklet-gradiens a keverés nélküli, illetve a mágneses keveréssel (RMF) előállított minták esetében közel azonosnak bizonyult: $2,2 \pm 0,2$ K/mm a 20 mm és 120 mm közötti tartományban (4. ábra). A minta vége felé (120–140 mm közötti szakaszon) a gradiens értéke először hirtelen 1,5 K/mm-re csökkent, majd ezt követően ismét 2,5 K/mm-re növekedett.

2.3. Mérési módszerek

2.3.1. Minta-előkészítés a vizsgálathoz

A kristályosodást követően a mintákat a tengelyükre merőlegesen két, közel azonos méretű részre vágtuk a könnyebb kezelhetőség érdekében. A minták műganytába történő beágyazását követően a hengeres próbatesteket hosszirányban a tengely mentén kettévágtuk annak érdekében, hogy a hosszmetset vizsgálhatóvá váljon. Ez a metszet megfelelő alapot biztosított a mezo- és mikroszerkezeti jellemzők elemzéséhez.

A minták előkészítése során csiszolás, gyémánt-pasztával történő polírozás, valamint 2%-os HF-vizes oldattal végzett maratás történt. A mezo- és mikroszerkezetet optikai mikroszkóppal (Zeiss AXIO Imager M1M) készült felvételeken vizsgáltuk. A minták teljes felületét lefedő mozaikképek 50-szeres nagyításban kerültek rögzítésre, amelyek a mezo-szerkezeti elemzésekhez szolgáltak alapul.

Ezen túlmenően a minták jellegzetes területeiről 500-szoros nagyításban is készültek felvételek a mikroszerkezeti részletek elemzéséhez. Mind a keverés nélküli, mind a mágneses keveréssel (RMF) előállított minták esetében 5-6 darab képmátrix készült, egyenként 10×20 képből összeállítva. Ezek a felvételek az eutektikus mikroszerkezet részletes vizsgálatára is alkalmasnak bizonyultak. A mikroszkópos felvételek kiértékelése az ImageJ képelemző szoftverrel (verzió: 1.54f) történt. A kiértékelés során kapott adatok statisztikai feldolgozásra kerültek. Mindkét mintatípus esetében négy, a szerkezet szempontjából legjellemzőbb paramétert határoztuk meg. Ezek:

- az eutektikus fázis aránya,
- a szilíciumlemezek hossza,
- az átlagos Si-lemeztávolság,
- a Si-lemezek orientációja.

2.3.2. Eutektikumarány

A mikroszkópos felvételek ebben az esetben alacsony felbontásban készültek, így az eutektikus mikroszerkezet részletes megfigyelésére nem nyílt lehetőség. A felvételeken a minta különböző fázisai szürkeárnyalatos formában jelentek meg, ami lehetővé tette a képelemző szoftver számára a fázisok elkülönítését a szürkeárnyalat-intenzitás alapján. Ennek segítségével a primer alumínium fázis és az eutektikus régiók megbízhatóan azonosíthatók voltak, és a szoftver segítségével meghatározhatóvá vált az eutektikus fázis térfogataránya is.

2.3.3. Eutektikus lemezek hosszeloszlása (ELLD)

Minden mikroszkópos felvételen meghatároztuk az összes eutektikus lemez maximális Feret-átmérője. A kiértékelés során kizárólag azokat az eutektikus Si-lemezeket vettük figyelembe, amelyek területe meghaladta a $0,05 \mu\text{m}^2$ értéket, ezzel minimalizálva a felületi karcolásokból és egyéb minta preparálási hibákból származó torzításokat. A képek szélein elhelyezkedő lemezeket az elemzésből kizártuk.

Az adott képmátrixokon mért eutektikus Si-lemezek hosszértékeiből a gyakorisági eloszlást határoztuk meg. Tekintettel arra, hogy a lemezek mintegy 90%-a $40 \mu\text{m}$ -nél kisebb méretű volt, az értékelés ebben a tartományban $1 \mu\text{m}$ -es lépésközökkel történt.

2.3.4. Átlagos lemeztávolság (ALD)

Az Al–Si eutektikum szabálytalan szerkezeti jellege miatt a lemezek közötti távolság közvetlen módon nem határozható meg egyértelműen. Ennek következtében az elemzés során az átlagos, származtatott lemeztávolságot határoztuk meg.

A vizsgálatok során az alábbi paraméterek voltak mérhetők: az eutektikus lemezek hossza és száma, a vizsgált kép területe, valamint a Si-lemezek teljes területéhez viszonyított aránya.

Az átlagos lemeztávolság kiszámításához az alábbi összefüggés alkalmazható, amely a lemezhossz-eloszlási paraméterrel együttesen numerikus úton meghatározza az eutektikus szerkezet finomsági mutatóját [32]:

$$\lambda_a = 2[A_p(1 - A_f)]/(NP_0), \quad (1)$$

ahol

P_0 – a vizsgált képen szereplő Si-lemezek átlagos kerülete [μm];

N – az eutektikus lemezek száma;

A_p – a mikroszkópos felvétel területe (μm^2);

A_f – az eutektikus lemezek terület aránya a szerkezetben.

2.3.5. Eutektikus lemezorientáció (ELO)

A maximális Feret-átmérő meghatározása mellett az eutektikus Si-lemezek hőelvonásának az irányával bezárt szögét is mértük. Ez lehetővé tette annak vizsgálatát, hogy egy adott irányban növekvő lemez átlagosan milyen hosszúságra nő. A szögmérés 10° -os intervallumokban történt, ahol a hőelvonással párhuzamos lemez 0° -os szöget zár be.

Az ImageJ szoftver (verzió: 1.54f) elkülönítette azokat a lemezeket, amelyek 0° – 90° közötti szöget zártak be a hőelvonás irányával (az olvadék felé növekvők), illetve azokat, amelyek 90° – 180° közötti szöget zártak (az ellenkező irányba növekvők). Az azonos szögértékű lemezeket összevontuk, függetlenül attól, hogy a hőelvonás irányával megegyező vagy ellentétes orientációban helyezkedtek el; például a 0 – 10° és 170 – 180° közötti lemezek egy csoportba kerültek.

3. Eredmények

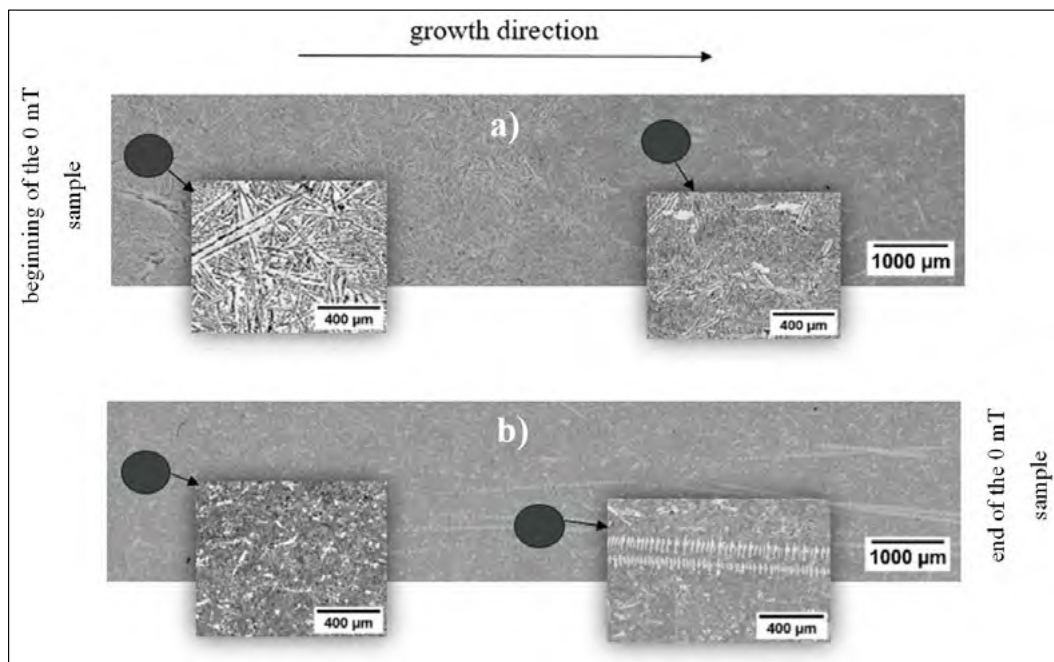
3.1. Mezostruktúra: alumínium-szilárdoldat és eutektikus fázisarány

A nem kevert minta mezostruktúrája az 5a–b. ábrán, míg a kevert minta mezostruktúrája a 6a–b. ábrán látható. Tekintettel arra, hogy a minták hosszanti tengelye mentén közel középpontos szimmetriát mutatnak, a képeken kizárólag a minta egyik felét mutatjuk be.

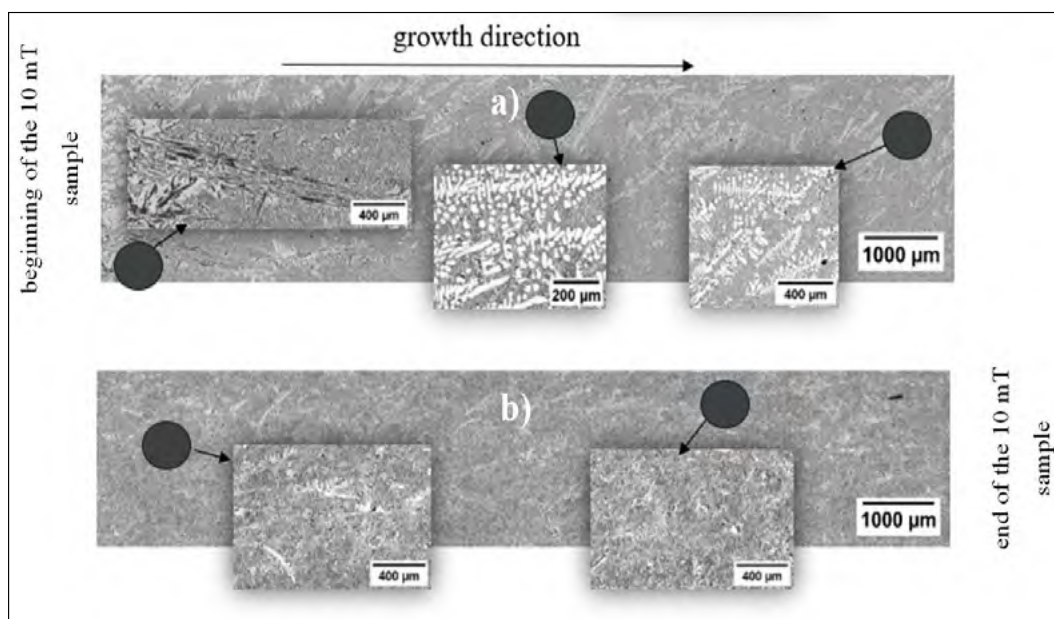
A mikroszkópos felvételek elemzése alapján a kevert mintában a rövid alumínium dendritok koncentrációja a minta szélén a legmagasabb. A minta végéhez közeledve a dendritok aránya csökken, miközben az eutektikus fázis aránya növekszik. Ezzel szemben a keverés nélküli mintában a hosszú, elnyúlt Al-dendritok a hőelvonás irányával párhuzamosan kristályosodnak.

Ha az olvadék a kristályosodás során nem áramlik, az eutektikum Si- és Al-szilárdoldat fázisa közül elsőként az Si kristályosodik (Si-csíra keletkezik

először), ez az ún. vezető fázis, majd ezt követi az Al-szilárdoldat kristályosodása. Az RMF-keverés hatására az olvadék áramlásának következtében a vezető fázis az alumínium-szilárdoldat lesz [33, 34]. Amikor az Al-fázis kristályosodik elsőként, a kristályosodás során a rácsból kiszoruló szilíciumatomok a keverés hatására eltávolodnak az eutektikus kristályosodási fronttól. Ennek következtében a helyi Si-koncentráció nem éri el azt a szintet, amely az összetételi túlhűlés révén az eutektikus Si-fázis kialakulásához szükséges. Ennek eredményeként az alumíniumfázis



5. ábra. A nem kevert minta hosszanti metszete 50-szeres nagyítással, valamint az egyes helyeken nagyobb nagyítású képek a szerkezet változásáról. A minta első fele (a), a minta második fele, 0 mT RMF (b)

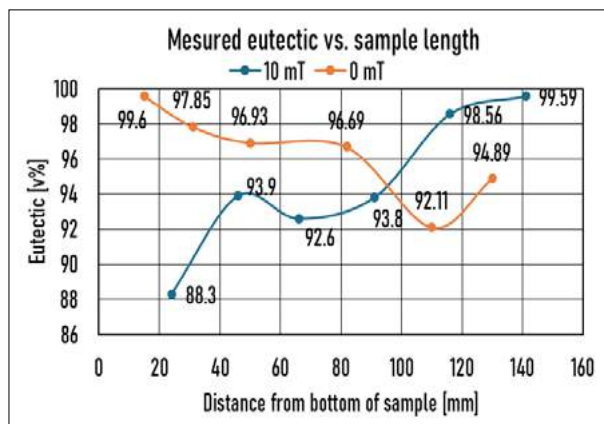


6. ábra. A nem kevert minta hosszanti metszete 50-szeres nagyítással, valamint az egyes helyeken nagyobb nagyítású képek a szerkezet változásáról. A minta első fele (a), a minta második fele, 10 mT RMF (b)

primer dendritekként tovább növekszik, miközben az eutektikum nem alakul ki, és a Si-koncentráció az olvadéokban folyamatosan növekszik [31]. A jelenség mértéke az olvadék áramlási sebességétől és a Si-koncentrációtól függ, miközben a kristályosítási paraméterek állandóak maradnak. A kevert olvadék áramlási sebessége a minta tengelye mentén nulla, és a hengeres minta széle felé haladva nő. A dendritek növekedésének mértékével és sűrűségével azonban az olvadékáramlás sebessége csökken. Közvetlenül a keverés bekapcsolása után a Si-koncentráció eutektikus, a primer Al-dendritek mind a minta szélén, mind a belső régiókban növekednek. A dendritek növekedésével az eutektikus frontnál az olvadékáramlás lassul, ami a dendritek közötti térben a helyi Si-koncentráció növekedéséhez és így az eutektikum kialakulásához vezet. A kristályosodás előrehaladtával az olvadék Si-koncentrációja tovább emelkedik, ami a primer Al-dendritek képződésének csökkenéséhez vezet; ezek főként a minta szélén helyezkednek el, ahol az áramlási sebesség nagyobb. A keverés és a primer Al-dendritek megszilárdulása következtében a kevert minta elején, a középső régióban mintegy 1 mm-es szakaszon Si-dúsulás jött létre, amely primer Si-fázis megjelenéséhez vezetett.

3.2. Eutektikumarány

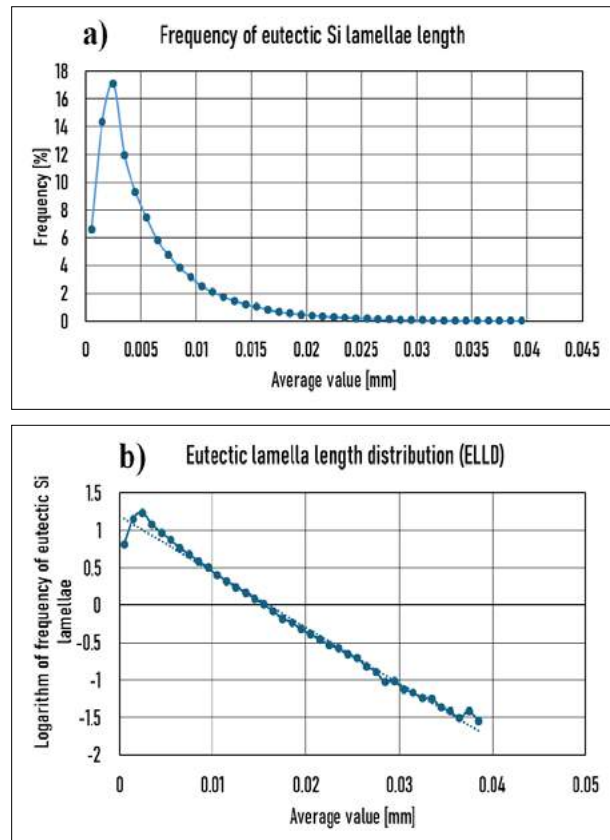
Az eutektikum aránya a 7. ábrán látható. A minták mért pontjain az eutektikum mennyisége eltérő. Látható, hogy a nem kevert mintában az eutektikum mennyisége kezdetben magas, majd enyhén csökken, mivel a hosszú Al-dendritek szinte párhuzamosan nőttek a hőelvonás irányával. Ezzel szemben a kevert mintában az eutektikum aránya kezdetben alacsonyabb, majd élesen nő a 3.1. bekezdésben leírt Al-dendritek miatt. A keverés hatására a minta végén majdnem tisztán eutektikum kristályosodott.



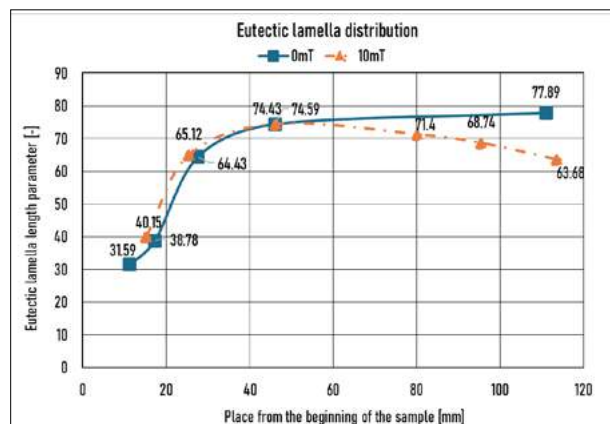
7. ábra. Az eutektikum aránya a minta hosszának függvényében

3.3. Eutektikus lemezek hosszeloszlásának analízise

A gyakoriságeloszlás exponenciális függvényt mutat (8a. ábra). Ebből az eredményből lineáris függvény is nyerhető, ha a gyakorisági adatokat logaritmikusan ábrázoljuk. A lineáris függvény meredeksége (ELLD) (abszolút értékben megadva) meghatározza, hogy milyen hosszúra nőhetnek az eutektikus lemezek, ami a szerkezet finomsági indexének egyik összetevője. Minél nagyobb az ELLD, annál finomabb és egyenletesebb a szerkezet (8a, b. ábra).

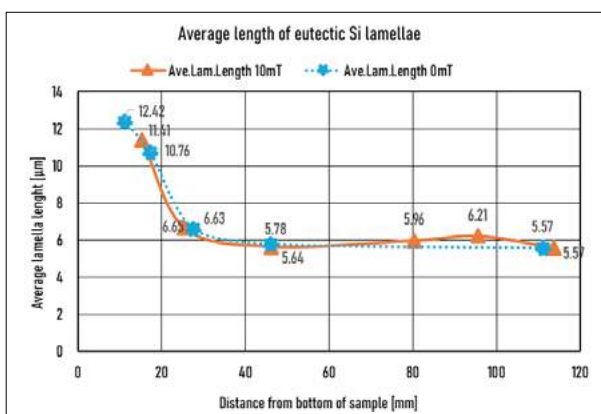


8. ábra. (a) Az eutektikus Si-lemez hosszának gyakorisága, (b) ELLD lineáris meredekségértékkel



9. ábra. Eutektikus Si-lemezek hosszparamétere a minta hosszának függvényében

Ahogy a 9. ábra is mutatja, a hosszparaméter mind a kevert, mind a nem kevert mintákban jelentősen nő ~ 40 mm-ig. A nem kevert mintánál 40 mm és 120 mm között enyhén növekszik, ezzel szemben a kevert mintánál csökken, amit az ELLD paraméter a frontsebesség függvényében mutat. A nem kevert minta első adatpontja 31,59, míg a kevert mintáé 40,15, mert a frontsebesség 0,01, illetve 0,04 mm/s. Látható, hogy ~ 40 mm-ig a frontsebesség növekedése mindkét mintánál erősen befolyásolja a hosszparamétert; a keverés hatása ebben a tartományban nem észlelhető. Ezután a kevert mintánál a hosszparaméter csökkent, miközben a frontsebesség enyhén nőtt, ami azt jelenti, hogy a keverés megzavarta a koncentrációeloszlást a növekvő eutektikus Si-lemezek előtt, így ezek a lemezek hosszabbra nőttek.

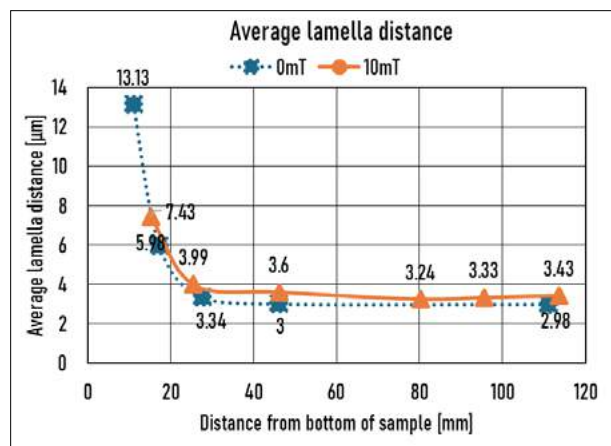


10. ábra. Átlagos eutektikus Si-lemez-hossz a minta hosszának függvényében

Összehasonlításképpen a 10. ábra az átlagos eutektikus Si-lemez-hosszt a minta hossza függvényében mutatja. A frontsebesség hatása gyakorlatilag megegyezik a hosszparaméter esetével, de nincs jellegzetes különbség a nem kevert és a kevert minták között. Következésképpen az ELLD paraméter segítségével többet tudhatunk meg a keverés hatásáról. A diagramok azt is mutatják, hogy az ELLD nemcsak egy átlagértéket ad, hanem teljes mért adatkészletet lefed, így használata nem torzítja a méréseink eredményét.

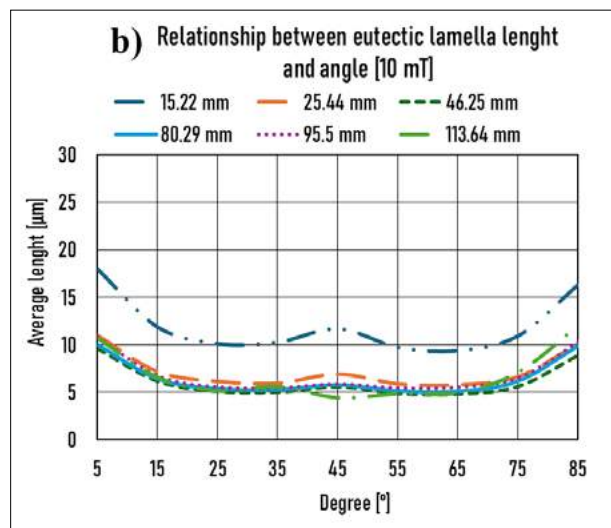
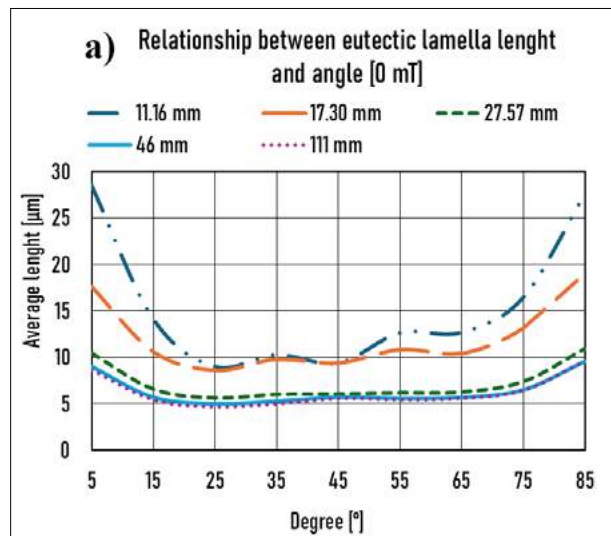
3.4. Átlagos lemeztávolság

A nem kevert minta elején a lemezek közötti távolság rendkívül nagy, mert a frontsebesség mindössze 0,02 mm/s. Ezután a távolság a minta első negyedében jelentősen csökken (11. ábra). A kevert mintánál a lemezek közötti távolság több mint 20%-kal nagyobb, mint a nem kevert mintánál. Ennek az az oka, hogy a keverés hozzáadódik a diffúzióhoz az eutektikus front előtt, így a frontsebesség enyhén nőtt, és a lemeztávolság ezáltal csökkent. Ezt a kis frontsebesség-növekedést a hűlési görbékkel nem lehet kimutatni.



11. ábra. Az átlagos lemeztávolság a minta hosszának függvényében

Az eutektikus Si-lemezek közötti távolság szinte tükrözi az ELLD paramétert (9. ábra) és az átlagos Si-lemez-hosszt (10. ábra).



12. ábra. Az eutektikus lemezek hossza és a lemezek szöge közötti kapcsolat (a) 0 mT RMF, (b) 10 mT RMF

Ha az eutektikus lemezek átlagos hosszát szögintervallumok függvényében ábrázoljuk, a minták különböző helyein kétféle diagramot figyelhetünk meg. Megállapítottuk, hogy ha a vizsgált terület nagyobb mennyiségű elfajult eutektikumot tartalmaz, a lemezek átlagos hossza megnő, és a diagramon egy vagy két lokális maximum jelenik meg. Ha az elfajulás nem jelentős, a lokális maximumok nem léteznek. Minél inkább elfajult az eutektikum, annál magasabbak a lokális maximumok.

A mintától függetlenül a 0° és 90° közelében növekvő lemezek a leghosszabbak, vagyis merőlegesen a hőelvonás irányára (12a, b. ábra). A kis mennyiségben elfajult eutektikumot tartalmazó részek a nem kevert mintánál a 27,57 mm, 46,00 mm és 111,00 mm távolságban mérhetők a minta aljától. Összehasonlításképpen az elfajult eutektikum mennyisége nagyobb a 11,16 mm és 17,30 mm pontoknál. A kevert mintánál csak a 15,22 mm-nél mért adatok mutatnak nagy mennyiségű elfajulást.

4. Következtetések

A fent ismertetett négy jellemző paraméter alkalmazásával az eutektikus lemezek számszerűen jellemezhetők, ami lehetővé teszi annak meghatározását, hogy a kristályosodás során milyen minőségű szerkezettel alakul ki az eutektikum. A 10 mT-ás RMF-keverés kimutathatóan befolyásolja az eutektikus szerkezet kialakulását: a kevert minták elején kisebb eutektikumarány figyelhető meg a keverés nélküli állapothoz képest. Ennek következtében az átlagos lemez-hossz a kevert és a nem kevert mintákban közel azonosnak adódott, ugyanakkor az ELLD-értékek alapján a minták végén eltérés mutatkozik.

A mikroszkópos felvételek szerint a rövid alumíniumdendritok a kevert minták két szélén koncentrálnak, és arányuk a minta vége felé csökken. Ezzel szemben a keverés nélküli mintákban a hosszú, megnyúlt Al-dendritok a hőelvonás irányával párhuzamosan kristályosodnak, és mennyiségük, valamint méretük a minta mentén folyamatos növekedést mutat. Továbbá az eutektikus front sebességének növekedésével az eutektikus lemezek hossza csökken, ami együtt jár az átlagos lemeztávolság mérséklődésével. Bár az átlagos lemeztávolságot leíró görbék végig hasonló lefutást mutatnak, a keverés hatására mintegy 10%-os méretkülönbség figyelhető meg. Emellett összefüggés állapítható meg az eutektikum elfajulása és az adott orientációban növekvő eutektikus lemezek hossza között. A keverés a görbék alakját is módosította.

A kutatást az Európai Űrügynökség támogatta a CET-SOL/HUNGARY ESA PRODEX (No. 4000131880/NL/SH) projektek keretében.

Irodalom

- [1] Zimmermann, G.; Weiss, A.; Mbaya, Z. Effect of forced melt flow on microstructure evolution in Al-Si7Mg0.6 alloy during directional solidification. *Mater. Sci. Eng.* 2005, 413, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.049>
- [2] Zimmermann, G.; Weiss, A. Directional solidification of dendritic microstructures in microgravity and with forced melt flow. *Micro. Sci. Tech.* 2005, 16, 143–149. <https://doi.org/10.1007/BF02945965>
- [3] Sriramamurthy, A.M.; Arunachalam, V.S. Eutectic growth in space. *Bull. Mater. Sci.* 1982, 4, 247–259. <https://doi.org/10.1007/BF02919590>
- [4] Croker, M.N.; Fidler, R.S.; Smith, R.W. The Characterization of Eutectic Structures. *Roy. Soc. Pub.* 1973, 335, 15–37. <https://doi.org/10.1098/rspa.1973.0111>
- [5] Brady, F.L. The Structure of Eutectics. *J. Inst. Met.* 1922, 28, 369–413.
- [6] Portevin, A.M. The Structure of Eutectics. *J. Inst. Met.* 1923, 29, 239–273.
- [7] Scheil, E. Über die eutektische Kristallisation. *Int. J. Mater. Res.* 1946, 37, 1–11. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1946-371-201>
- [8] Podolinsky, V.V.; Taran, Y.N.; Drykin, V.G. Classification of binary eutectics. *J. Cryst. Growth* 1989, 96, 445–449. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(89\)90543-5](https://doi.org/10.1016/0022-0248(89)90543-5)
- [9] Jackson, K.A.; Hunt, J.D. Lamellar and Rod Eutectic Growth. *Trans. Metall. Soc.* 1966, 236, 1129–1142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092523-3.50040-X>
- [10] Walker, H.; Shan, L.; Lee, J.H.; Trivedi, R. Eutectic Growth in Three Dimensions. *Metall. Mater. Trans. A* 2007, 38, 1417–1425. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9163-0>
- [11] Fisher, D.; Kurz, W. A theory of branching limited growth of irregular eutectics. *Acta Metall.* 1980, 28, 777–794. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(80\)90155-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(80)90155-8)
- [12] Magnin, P.; Mason, J.T.; Trivedi, R. Growth of irregular eutectics and the Al-Si system. *Acta Metall. Et Mater.* 1991, 39, 469–480. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90115-H](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90115-H)
- [13] Steen, H.A.H.; Hellawell, A. The growth of eutectic silicon-Contributions to undercooling. *Acta Metall.* 1975, 23, 529–535. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(75\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(75)90093-0)
- [14] Clapham, L.; Smith, R.W. Partial modification in unidirectionally solidified Al-Si eutectic alloys. *Acta Metall.* 1989, 37, 303–311. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90288-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90288-5)
- [15] Stefanescu, D.M. *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2008; pp. 529–535. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15693-4>

- [16] Hernández, F.R.; Sokolowski, J. Comparison among chemical and electromagnetic stirring and vibration melt treatments for Al-Si hypereutectic alloys J. Alloys Compd. 2006, 426, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.09.039>
- [17] Li, X.; Fautrelle, Y.; Gagnoud, A.; Ren, Z.; Moreau, R. EBSD study of the influence of a high magnetic field on the micro-structure and orientation of the Al-Si eutectic during directional solidification. Metall. Mater. Trans. 2016, 47, 2952–2963. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3432-8>
- [18] Abdallah, A.; Roósz, A.; Rónaföldi, A.; Veres, Z. Effect of Solid/Liquid and Eutectic Front Velocities on Microstructure Evolution in Al-20%Cu Alloys. Crystals 2024, 14, 638. <https://doi.org/10.3390/cryst14070638>
- [19] Zuo, X.; Zhao, C.; Zhang, L.; Wang, E. Influence of Growth Rate and Magnetic Field on Microstructure and Properties of Directionally Solidified Ag-Cu Eutectic Alloy. Materials 2016, 9, 569. <https://doi.org/10.3390/ma9070569>
- [20] Koçak, Y.; Engin, S.; Böyük, U.; Marasli, N. The influence of the growth rate on the eutectic spacings, undercoolings and microhardness of directional solidified bismuth-lead eutectic alloy. Curr. Appl. Phys. 2013, 13, 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.10.005>
- [21] Hu, Z.; Huo, Q.; Chen, Y.; Liu, M.; Chen, X. Improving Mechanical Property of Hyper-Eutectic Al-Si Alloys via Regulating the Microstructure by Rheo-Die-Casting. Metals. 2023, 13(5), 968. <https://doi.org/10.3390/met13050968>
- [22] Zemlyanov, A.V.; Utyaganova, V.R.; Dymnich, E.; Shamari N.N.; Nikonov, S.Yu.; Romanova, V.A.; Kulkov, A.S.; Balokhonov, R.R. A Study of Deformation and Fracture of the Eutectic in an Additively Manufactured Al Si Composite Alloy. Phys Mesomech. 2023, 26, 678–690. <https://doi.org/10.1134/S10299599230600737>
- [23] Bibik, N.; Metel, A.; Cherenda, N.; Sotova, C.; As-tashynski, V.; Kuzmitski, A.; Melnik, Y.; Vereschaka, A. Structure of Eutectic Al-Si Alloy Subjected to Compression Plasma Flow Impact. Metals. 2024, 14(12), 1415. <https://doi.org/10.3390/met14121415>
- [24] Bayram, Ü. Directional Solidification of Al-Si-Ti Irregular Ternary Eutectic Alloy and Thermophysical Properties. Metall. and Mater. Trans. B. 2022, 53(1) 3865–3881. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02648-6>
- [25] Zhang, X.; Zhou, Y.; Zhong, G. et al. Effects of Si and Sr elements on solidification microstructure and thermal conductivity of Al-Si-based alloys. J Mater Sci. 2022, 57, 6428–6444. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07045-7>
- [26] Chen, H.; Zeng, Y.; Li, Y. et al. Study of Microstructure Scale and Regulation of Mechanical Properties of Al-6Si Hypoeutectic Alloy. Silicon 2023. 15, 1635–1646. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02096-6>
- [27] Sahoo, S.K.; Majhi, J.; Patnaik, S.C. et al. Microstructure characterisation and dry sliding wear behaviour of Al-Si near eutectic and hypereutectic alloys reinforced with in-situ TiB₂ synthesized by stir casting route. Discov Mater. 2024, 4, 87. <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00163-w>
- [28] El-Eraki, B.; El-Sayed Seleman, M.; El-Sissy, A. et al. Structural and mechanical modifications of hyper-eutectic Al-16Si alloy using friction stir processing. Discov. Appl. Sci. 2025, 7, 875. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06762-3>
- [29] Zakaraia, D.; Roósz, A.; Rónaföldi, A.; Veres, ZS. Influence of Magnetic Stirring and Eutectic Front Velocity on the Solidified Microstructure of Al-18 wt.% Si Alloy. Materials. 2024, 17(24), 6029. <https://doi.org/10.3390/ma17246029>
- [30] Choudhary, C.; Sahoo, K.L.; Keche, A. J.; Mandal, D.(2023). Effect of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of hypo-eutectic and eutectic Al-Si alloys. In: Broek, S. (eds) Light Metals 2023. TMS 2023. The Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_63
- [31] Veres, Zs.; Roósz, A.; Rónaföldi, A.; Sycheva A.; Svéda, M. The effect of melt flow induced by RMF on the meso- and micro-structure of unidirectionally solidified Al-7wt.% Si alloy Benchmark experiment under magnetic stirring. J. Mater. Sci. Tech. 2022, 103, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.060>
- [32] Kassab, A.; Rónaföldi, A.; Roósz, A.; Veres, Z. Complex Characterization of Irregular Eutectic Structure. Hung. Mater. Chem. Sci. Eng. 2020, 45, 171–181. <https://doi.org/10.32974/mse.2020.017>
- [33] Kim, Y.W.; Shingu, P.H. The effect of the fluid flow strength on macro-segregation in the unidirectionally solidified structure of eutectic Al-Si. J. Mater. Sci. Lett. 1990, 9, 241–243. <https://doi.org/10.1007/BF00727731>
- [34] Zhiqiang, C.; Junze, J.; Dong, L.; Xianshu, Z.; Cho, Y.; Oh, Y.; Shim, J. Thermodynamic criterion of separated eutectic phenomena. J. Mater. Sci. 1998, 33, 2313–2317. <https://doi.org/10.1023/A:1004339421223>



Effect of Magnetic Stirring on the Microstructure of Eutectic Al-Si Alloys

by Éva Kócsák ^{1,2,*} , András Roósz ² , Arnold Rónaföldi ² and Zsolt Veres ¹

¹ Institute of Metallurgy, Metal Forming and Nanotechnology, University of Miskolc, 3515 Miskolc, Hungary

² Hun-Ren Hungarian Research Network, 1052 Budapest, Hungary

* Author to whom correspondence should be addressed.

Lágyacélok öregedésének elemzése hajlítóvizsgálat alapján

Analysis of aging of mild steels based on bending tests

KONDÁS BÉLA[@], MERTINGER VALÉRIA[&]

Miskolci Egyetem, Anyag- és Vegyészmérnöki Kar,
Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolc

[@]E-mail: bela.kondas@uni-miskolc.hu

[&]E-mail: valeria.mertinger@uni-miskolc.hu

A lágyacél lemezek alakíthatósága már rövidebb tárolási időt követően is leromolhat az öregedési jelenség következtében. Mivel az öregedés dinamikája nem egyenletes ezért ugyanazon adagból származó lemeztáblák mechanikai tulajdonságai is különbözhetnek egymástól, amely az automata megmunkáló berendezéseknél gyakori paraméter utánállítást, hosszabb ciklusidőt, megemelkedett selejtképződést okozhat. Cikkünkben a feldolgozóipar számára olyan egyszerűen végrehajtható hajlítóvizsgálati módszert mutatunk be, ami megbízhatóan jelzi az öregedést. Kísérleteink során DC01 jelű lemezpróbatesteket vetettünk hajlítóvizsgálat alá gyártásukat követő tíz időintervallumban. A vizsgálat megfelelő szintű érzékenységeinek biztosítása érdekében az értékelési kritériumokat a szabványkövetelményekhez képest tovább szigorítottuk, mely által egy költséghatékony vizsgálati módszert kaptunk.

Kulcsszavak: lágyacél, alakíthatóság, öregedés, hajlítóvizsgálat

The formability of mild steel sheets can deteriorate even after a short storage period due to the strain aging phenomenon. Since the aging dynamics are not uniform, the mechanical properties of steel sheets from the same batch can also differ from each other, which can cause frequent parameter readjustment, longer cycle times, and increased scrap formation in automatic processing equipment. In our paper, we present a bend test method for the processing industry that reliably indicates aging. In our experiments, DC01 sheet metal specimens were subjected to bend tests at ten time intervals after their manufacture. In order to ensure an appropriate level of sensitivity of the test, the evaluation criteria were extended compared to the standard requirements, which resulted in a cost-effective test method.

Keywords: mild steel, formability, strain ageing, bend test

1. Bevezetés

A feldolgozó cégek nagy tömegében alkalmazzák a hidegképlékenyen alakítható acélok valamely típusát. A különböző alakító műveletekkel készülők alkatrészek vagy használati cikkek gyárthatóságát, valamint élettartamát jelentős mértékben befolyásolja az alapanyagok anyagjellemzőinek stabilitása. Az acélművekből kikerülő ötvöztelen lágyacél lemezek alakíthatósága bizonyos idő elteltével leromlik az öregedési jelenség következtében. A feldolgozó cégek számára ez különös jelentőséggel bírhat, ugyanis a gépbeállítási paraméterek megválasztásánál nem csak a különböző beszerzési források anyagai között lehet tulajdonságbéli különbség, hanem ugyanazon gyártó különböző korú anyagai között is. Amennyiben erre nem fordítanak kellő figyelmet úgy a terméktulajdonságok ingadozása az automata megmunkáló be-

rendezéseknél gyakori paraméter utánállítást, ezáltal hosszabb ciklusidőt, kedvezőtlen esetben gyorsabb szerszámkopást, súlyosabb esetekben nagymértékű selejtképződést okozhat, ami befolyással bírhat a vevői elégedettségre továbbá az adott vállalkozás versenyképességére is.

Az öregedés jelenségét a vasrácsban elhelyezkedő interstíciós atomok (C, N) okozzák melyek a diszlokációk magjába diffundálnak, ezzel azok mozgását akadályozzák. Ennek a blokkoló hatásnak az eredményessége függ elsősorban a rendelkezésre álló időtől, így a *hevertetési idő függvényében nő a diszlokációkhoz eljutó atomok mennyisége*. Az öregedés eredményeképpen megnövekszik a folyáshatár és a szakítószilárdság, de lecsökken a nyúlás értéke. Ezt a megállapítást sok kutató leírta kísérletei eredményeként. Hrvňák és Sobotová [1] 38 MPa-nyi folyáshatár

emelkedést mért kb 6 hétnek megfelelő tárolási időt követően lágyacél lemezeken, míg Bhagat [2] 26–37 MPa emelkedést mért BH acélokon a teljes öregedési időtartam alatt.

A gyakorlati felhasználás szempontjából a mechanikai mérőszámok kedvezőtlen változása megnövelheti a repedések kialakulásának kockázatát a lemezek alakításakor. Érthető tehát az ipari szereplők azon igénye, hogy az alapanyagok tulajdonságainak időben beálló változását még a károsodás bekövetkezése előtt megbízható módszerrel állapíthassák meg.

Az eddigi kutatások az öregedés hatását leggyakrabban normál és csökkentett sebességű szakítóvizsgálatokkal tanulmányozták. A mai korszerű acélgyártó és hengerlési technológiával előállított lemeztermékek öregedésének mérése szakító vizsgálattal azonban meglehetősen bonyolult feladat. Korszerű szakítógépet, precíz nyúlásmérést és a vizsgálószemélyzet részéről nagy felkészültséget igényel. Ezen feltételek biztosítása rendkívül megterhelő egy magyarországi KKV számára ráadásul a kellő rutinnal bíró szakképzett és elérhető anyagvizsgálók száma is meglehetősen limitált. Az öregedés jelenségét több éve tartó komplex vizsgálatok sorozatával elemeztük, melynek részeként került látókörünkbe a hajlítóvizsgálat is. Ennek egyszerűbb változata nem igényel sem költséges berendezést sem pedig különösebb szak tudást, így könnyen elvégezhető. Sikeres alkalmazásához csupán a vizsgálat végrehajtásának, valamint az eredmények értékelésének szabályait kell pontosan és egyértelműen meghatározni.

2. A vizsgálati anyag és konvencionális módszer

Az európai szabványok számos hidegképlékeny acélt különböztetnek meg, melyek közül a belépő minőség a DC01, ennek összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. DC01 minőségű acél elemzett összetétele

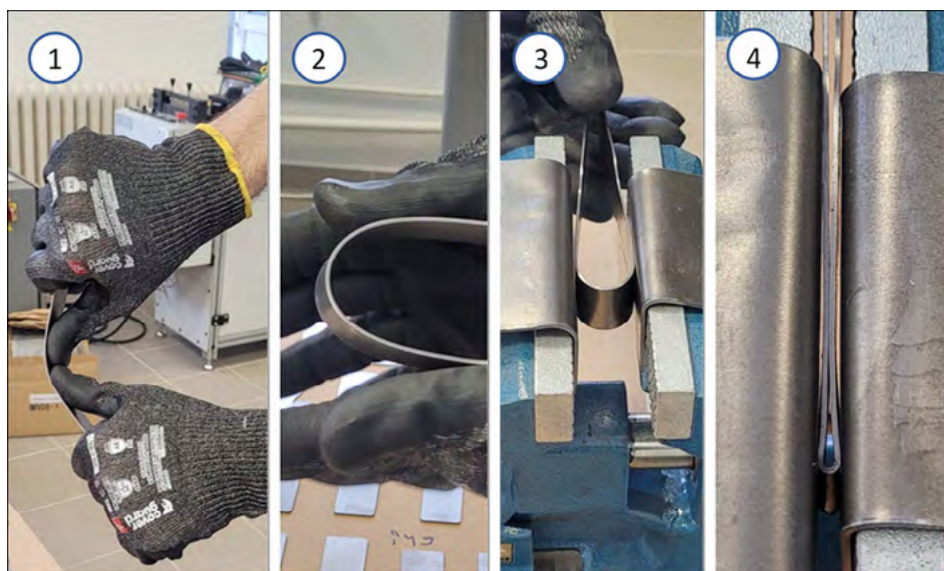
C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	N [%]
0.07	0.43	0.013	0.001	0.046	0.003

A kis mennyiségű karbon mellett alumíniumot tartalmaz, mely képes a nitrogén megkötésére.

Szövetszerkezete túlnyomórészt ferrites, melynek térben középpontos kockarácsában helyezkednek el az öregedés szempontjából legnagyobb szerepet játszó karbon és nitrogén atomok. Ezen kis méretű atomok aránylag mozgékonyak, ezért ipari környezetű tárolás mellett is várható az öregedés lezajlása.

A DC01 szabványos acélfajta, pontos terméktulajdonságait az EN 10130 [3] szabvány tartalmazza, melyet tanulmányozva szembeűnik néhány az öregedéssel összefüggésbe hozható furcsaság. A folyáshatár értékét például csak 8 napig, míg a megadott szakítószilárdsági és nyúlás értékeket egyáltalán nem garantálja a szabvány. Összehasonlítva a fenti adatokat a többi szabványos hidegképlékeny acélfajta terméktulajdonságainak stabilitásával kijelenthető, hogy várhatóan a DC01 minőségben megy végbe a leggyorsabban az öregedés, ami ideálissá teszi az öregedés dinamikájának vizsgálatára.

Az öregedés hatását egy kiforrott technológiát alkalmazó, korszerű gyártóvertikummal rendelkező európai vállalat DC01 minőségű, 1,5 mm vastag, hidegen hengerelt, lágyított és dreszírozott állapotú tekercsből származó mintákon, a gyártást (dresszírozást) követő 3 nap, 9 nap, 2 hét, 1 hónap, 6 hét, 10 hét, 3, 6, 8 és 12 hónap elteltével végrehajtott vizsgálatok eredményei alapján tanulmányoztuk. Az időtávokat a vonatkozó historikus és aktuális termékszabványok szerint határoztuk meg. A hajlítóvizsgálatokat az ASTM E290 [4] ajánlása szerinti, szabványos méretű



1. ábra. Hajlítóvizsgálat („band and flatten” módszer) lépései

(itt ISO 6892–1, –2 típusú (20×80 mm)) szakítópróbatesteken hajtottuk végre, melyeket stancolással és csiszolással készítettük elő vizsgálatra. A próbatesteket a tekercs harmadik menetéből (tekercs lefejtés során a háromszoros külső kerületi távolságból) származó táblák szélessége mentén mért ¼ vonalából hengerlési iránnyal párhuzamosan szorosan egymás felől vágtuk ki stancolással, így az anyag gyártásából származó inhomogenitást igyekeztünk a lehető legkisebb értéken tartani. Az egyes időpontokban 3-3 próbatesten végeztünk a JIS G3141 [5] és az ASTM E 290-14 szabványokban foglalt előírások szerinti hajlítóvizsgálatot. A hajlítást szabad kézzel 180 fokban végeztük el úgy, hogy a hajlított szárok egymásra felfeküdjenek majd a próbatestet satuban összelapítottuk („band and flatten” módszer) (1. ábra). A fent említett szabványok útmutatásai alapján a meghajlított külső ív felületét vizsgáltuk meg. Megfelelő minősítést kapott az a próbatest amelyen hajlítás után szabad szemmel nem volt látható repedés vagy egyéb anyag felszakadás, esetleg kitörés. A vizsgálatok elfogadható színvonalú ismételhetőségét és reprodukálhatóságát azonos vizsgáló személy és állandó mérési hőmérsékelt valamint megvilágítási környezet biztosította.

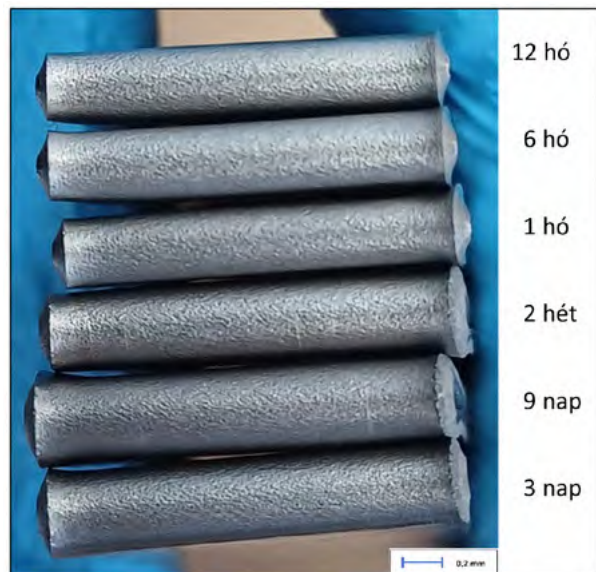
Mielőtt a hajlítóvizsgálat eredményének bemutatásához fognánk, szükséges bizonyítékot szolgáltatni arra vonatkozóan, hogy a vizsgált minták valóban öregedtek, és a később bemutatott változások nem valami más hatás következtében alakultak ki. Az öregedés végbemenetelét egy a hajlítópróbatestekkel együtt kimunkált szakító próbatesten vizsgáltuk, melyet 7,5%-nyi nyúlásig terheltünk, folyáshatárát ($R_{p0,2e}$) feljegyeztük majd 60 percen át tartó 100 °C-os hőkezelésnek vetettük alá. A kezelt próbatestet szakadásig terheltük és feljegyeztük a folyáshatárát ($R_{p0,2u}$) ismét. A szakirodalom [2] az öregedést egy ún. öregedési index (strain aging index, SAI) mérőszámmal jellemzi, amely a kezelés előtti és utáni folyáshatár értékeinek a különbsége:

$$SAI = R_{p0,2u} - R_{p0,2e}$$

Bhagat, Baek és Lee [2] szerzők kiterjedt vizsgálatokat folytattak BH (bake hardening) anyagok SAI értékeinek meghatározására. Cikkükben közölt 26–37 MPa referencia értékekhez képest a mintáinkon 90 MPa értéket mértünk, amely bizonyítja mintáink öregedését.

3. Az általunk javasolt vizsgálati módszer az öregedés kimutatására DC01 minőségű acéllemezen

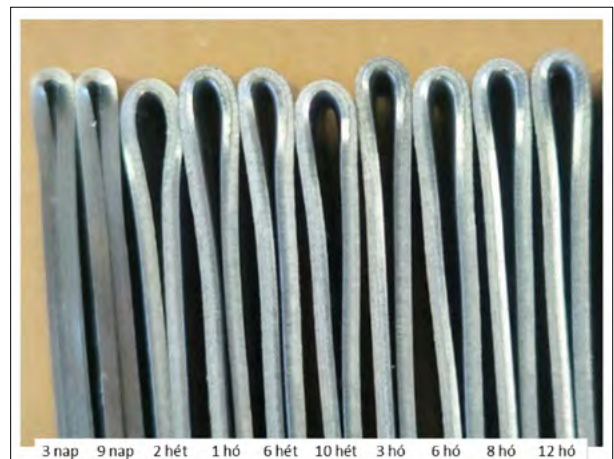
Miután bizonyítást nyert, hogy mintáink valóban öregednek nekifogtunk a hajlítóvizsgálatoknak, melyek végén meglepődve tapasztaltuk, hogy a tesztelt 30 darab próbatest egyikén sem volt felfedezhető repedés a külső hajlított íven (2. ábra), azaz mindegyik meg-



2. ábra. A hajlított próbatestek külső ívéhez tartozó felületről készült makrofotó

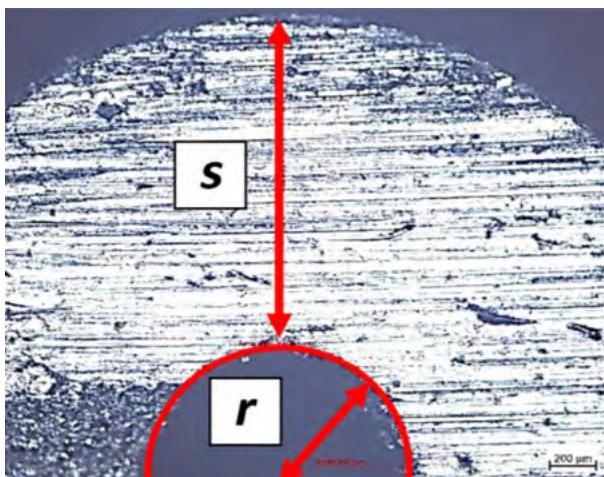
felelő minősítést kapott a fentnevezett szabványok kritériumai alapján.

A szemrevételezés során feltűnt azonban, hogy a 180°-ban visszahajlított szárok kéthetes kortól kezdődően már nem illeszkednek pontosan egymáshoz a hurok alatti részen. Tehát a hajlított rész belső ívének sugara (r) az idő előrehaladásával egyre nagyobbá vált. Ez a jelenség megmaradt a 12 hónapos korig terjedően (3. ábra).

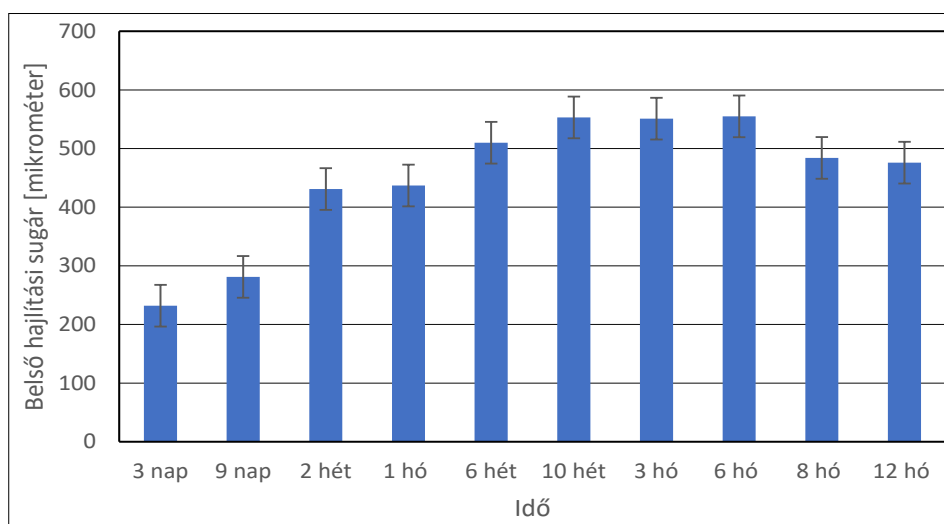


3. ábra. Hajlítóvizsgálati eredmény

Megvizsgáltuk a belső szál sugarát (r), valamint a hajlított rész lemezvastagságát (s) Zeiss Axiovert A1 fénymikroszkóp segítségével (4. ábra). A vizsgálat során megállapítást nyert, hogy elvékonyodás nem történt a próbatestek hajlított ívéen, azonban számszerűen is beigazolódott, hogy a belső szál sugarának mérete nem független a tárolási időtől (5. ábra). Az 5. ábra időpontoként a három próbatest méretének átlag értékét mutatja.



4. ábra. Lemezvastagság (s) és hajlítási belső ív sugarának (r) mérése fénymikroszkópi felvételen



5. ábra. Belső hajlítási ív sugarának értékei az idő függvényében

Az 5. ábrán látható eredmények nagy hasonlóságot mutatnak a komplex öregedési vizsgálatunk során végrehajtott csészehúzóvizsgálatok eredményeivel is. Ugyanebből a gyártásból származó mintalemezekből kimunkált csészévé húzható maximális tárcsaátmérő egy hónapot követően 70 mm-ről 68 mm-re csökkent.

4. Konklúzió

A hajlítóvizsgálat azon technológiai vizsgálatok sorába illeszkedik, amelyek közvetlenül a feldolgozó műveleteket szimulálja ezért az ipari szereplők számára gyakorlati eredményt biztosít. Fontos azonban megjegyezni, hogy a ma ismert hidegképlékeny lemezszabványok nem fogalmazzak meg elég szigorú kritériumokat a hajlítóvizsgálat eredményeire vonatkozóan. Ezért az a javaslatunk, hogy ahhoz, hogy az öregedés kisebb mértékét is megállapíthassuk nem elég csak a külső hajlítási íven jelentkező repedéseket ellenőrizni, vizsgálni kell még a lemezlelvékonyodást, a visszahajlított száruk egymáshoz mért távolságát,

valamint a hajlított belső ív sugarát is. Ehhez nem feltétlenül kell mikroszkópot alkalmazni hiszen kísérleteink bebizonyították, hogy a száruk távolsága, valamint a hurok mérete szabadszemmel is látható módon változik az öregedés hatására. Ez a jelenség nyilvánvaló összefüggésben áll az anyag időben bekövetkező felkeményedésével. A fentiekben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy az általunk javasolt kiegészítéssel a kézi hajlítóvizsgálati eredmények jól tükrözik az öregedés végbemenetelét DC01 minőségű acél lemeztermékeken. Ugyanakkor azt is meg kell jegyezni, hogy a hajlítóvizsgálattal az öregedés előrehaladását csak indikatív módon lehet jelezni. Amennyiben az alakíthatóság leromlásának kezdeti szakaszát is kellő érzékenységgel szeretnénk kimutatni, úgy más, komplexebb vizsgálatokra (pl.

Nakajima-tesztre) van szükség. Ezzel együtt mivel a kézi hajlítóvizsgálat nem igényel speciális berendezést és különösebb szakértettséget sem, ha nincs szükség precíz eredményre, akkor az ipari szereplők sikerrel alkalmazhatják ezt az egyszerű módszert.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton fejezzük ki köszönetünket a Thyssen-krupp Materials Hungary Zrt.-nek a minták biztosításáért, valamint a Csepeli Szerszámedző Kft.-nek a hőkezelés elvégzéséért.

Irodalom

- [1] A. Hrivňák, L. Sobotová (1992): The influence of the deformational ageing and the conditions of stress on the properties of the deep-drawing steel sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 34(1–4), 425–430. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90137-h](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90137-h)
- [2] A. N. Bhagat, S.-J. Baek, H.-C. Lee (2008): A simple method for prediction of shelf life of bake hardening steels. *ISIJ Int.*, 48(12), 1781–1787. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.1781>
- [3] DIN EN 10130 (2007): Cold Rolled Low Carbon Steel Flat Products for Cold Forming. Technical Delivery Conditions. Deutsches Institut für Normung e.V.
- [4] ASTM E290 (2022): Standard Test Methods for Bend Testing of Material Ductility, American Society for Testing and Materials.
- [5] JIS G3141 (2017): Cold Reduced Carbon Steel Sheets and Strip, Japanese Standards Association.

A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből. Földpát, Mg, He, F, Ga, bauxit, foszfát – stratégiai és kritikus ásványi nyersanyag potenciál – globális és hazai körkép

From the Critical Raw Materials Marathon Data Collection. Feldspar, Mg, He, F, Ga, bauxite, phosphate – strategic and critical mineral raw material potential – global and domestic overview

PATAKY CSILLA, BSc-hallgató; RICHMOND KOJO KYEI, MSc-hallgató; FÖLDESSY JÁNOS, professzor emeritusz;
MÁDAI FERENC, egyetemi docens, intézetigazgató

Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet, Miskolc

A cikksorozat utolsó tanulmányában olyan kritikus ásványi nyersanyagok helyzetét tekintjük át, amelyeket az előző cikkekben tárgyalt csoportokba nem lehetett besorolni. Ezek között van jelenleg is termelt anyag (földpát), jól ismert, bár jelenleg nem termelt nyersanyagok – bauxit, fluorit – melléktermékként korábban jelentős mennyiségben termelt fém (gallium), nemesgáz (hélium), illetve fémkinyerésre korábban alkalmatlannak tekintett ásványi anyagok (magnézium). A lényegesen különböző földtani helyzetű, halmazállapotú és alkalmazási területű előfordulásokat külön fejezetekben tekintjük át, fő hangsúllyal a hazai lelőhelyek tulajdonságaira.

Kulcsszavak: stratégiai ásványi nyersanyag, magnézium-, földpát-, hélium-, fluorit-, gallium-, bauxit-, foszfát-előfordulások, ásványvagyron potenciál

In the last review of the article series we present the status of a group of critical mineral raw materials that could not be classified into the groups discussed in the previous articles. These include currently produced materials (feldspar), well-known (although currently not produced) raw materials – bauxite, fluorite – metals produced in significant quantities as by-products (gallium), noble gases (helium), and minerals previously considered unsuitable for metal extraction (magnesium). Materials with significantly different geological settings, states of matter, and areas of application are reviewed in separate chapters, with a main emphasis on the properties of domestic occurrences.

Keywords: strategic raw material, magnesium, feldspar, helium, fluorite, gallium, bauxite, phosphate occurrences potential

Bevezetés

A kritikus ásványi nyersanyagok hazai palettájának utolsó csoportja kerül sorra ebben a tanulmányban, kiegészítve a nyersanyagok EU-beli, illetve világ méretű helyzetének felvillantásával. Az áttekintés pillanatkép. A jelenleg – egyelőre tervek és javaslatok formájában – alakuló Nemzeti Feltérési Terv részeként olyan alapkutatások, felderítések, minősítő értékelések fognak születni, amelyek ezt a képet – remélhetően az előnyös irányba – jelentősen átforgatják majd.

Az áttekintésünk egyúttal figyelem felhívás is, az állami kutatásoktól független iparvállalatok, befektetők felé. Jelezni szeretnénk, hogy ez a generációk óta elhanyagolt szektor igen jelentős gazdasági lehetőségek forrása lehet, egyúttal az ország olyan régióiban is, ahol a szociális leszakadás egyetlen menekülő útja egy helybe érkező jelentős, természeti erőforrást érintő tevékenység – földtani kutatás és bányászat, feldolgozás – lehetne. Az előzetes gazdasági becslések azt mutatják, hogy az előfordulások közül több olyan van, ami jelen állapotában is vállalható, gazdaságos befektetési cél lenne.

Földpát

A földpát a nem fémes ipari ásványok csoportjába tartozó nyersanyag. Információit főként az EU adatlap alapján állítottuk össze [1]. A világon szinte mindenütt termelt, az üvegipar és a kerámia gyártás számára alapvető fontosságú ásványi nyersanyag. Fő szerepe az olvadáspont csökkentése. A világ mintegy 31 Mt össztermeléséből az EU fogyasztása 9,8 Mt/év, bányászati termelése 4,9 millió tonna. A világ három legnagyobb termelője Törökország (32%), India (20%), Kína (8%).

Különféle magmás kőzetek mállásával létrejött üledékekből, üledékes kőzetekből származik. A fő forráskőzetek nefelinszienit, szienit, gránit, a földpát leggyakoribb fajtája albit, nefelin, mikroklin, ortoklász, szanidin.

A termék árakat a helyi piac alakítja, a világon jelentős fogyasztónak számító USA-ban a földpát anyag átlagár 2024-ben 110 USD/tonna, nefelinszienit 200 USD/t [2].

7720 Pécsvárad

Az ország egyetlen előfordulása, ahol földpát ipari méretekben és kitermelésre érdemes minőségben ismert, itt található (*1. ábra*). Földtani kutatása 2006-ban zárult. Jelenleg éves termelési kapacitása 59 000 tonna [3]. Az előfordulás pliocén felső pannoniai korú, keleti 10–15 fokos dőlésű folyóvízi homok, melynek fedőjében agyag és kavics, fekvőjében agyagos homok, majd alsó pannoniai korú márga található. A 30 m vastag jó minőségű homok földpát és földpát pótló tartalma 30–40% (ebből kb 60% mikroklin, 30% albit, 10% nefelin). A 0,1 mm alatti szemcsefrakció 10–30%, vastartalma 1,2–3%. A homokot mosással készítik elő végtermékké. Ennek során a finom frak-



1. ábra. A pécsváradai földpátos homokbánya (Forrás: hu.mineral.eu)

ciót hidrociklonokkal leválasztják, a vastartalmat a szemcse felületekről koptató keverő berendezésekben attritálással lekoptatják. A végterméket szemcseméreti osztályozás után javarészt üvegipari alkalmazásra értékesítik.

Magnézium

Alkáli földfém, a földkéreg nyolcadik leggyakoribb eleme (2,5 súly%). 2011 óta szerepel a kritikus nyersanyagok európai listáján. A fémek között a legkisebb fajsúlyú, nem-toxikus, nem-mágneses, nagy törőszilárdságú. Fontos biológiai elem. A világ magnézium-termelése 2002-ben közelítőleg 419 ezer tonna volt. 2011-re ez az érték majdnem duplájára nőtt.

Magnéziumot ásványi nyersanyagok feldolgozásával magnezitből (MgCO_3), dolomitból és helyenként brucitból ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) állítanak elő, ultrabázitokból, evaporitokból, tengervízből, nagy sótartalmú felszínalatti vizekből [4].

Legfontosabb hordozó nyersanyaga a magnezit. Az ásvány MgO-tartalma 47,8 súly% (52,2% szén-dioxid-tartalommal). A természetes magnezit kőzet az uralkodó magnezit ásvány mellett mindig tartalmaz bizonyos mennyiségű kalcium karbonátot, és egyéb karbonátásványokat, például dolomitot, szideritet. A magnézium másik ipari méretekben kitermelt ásványos hordozója dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ennek MgCO_3 -tartalma 45,65% (egyenértékű 21,7% MgO-val).

Üledékes kőzetként bepárlódó sóstavi és lagúna üledéksorozatokban, a kalcium-karbonát kiválását követően keletkezhet. Az úgynevezett Veitsch típusú magnezittelepek metaüledékes kőzetsorozatokban találhatóak. Mészke és dolomit metasztatikus kiszorítása útján durvakristályos magnezit keletkezik. A létrehozó tényező hidrotermális eredetű, Mg-gazdag fluidum. A kiszorítási folyamat a kőzet közlekedő pórustereiben, repedései, réteglapjai, elválásai mentén terjed. Ultrabázisos kőzetek átalakulási termékeként, illetve telérkitöltésként serpentinisedett ultrabázisos kőzetekből jön létre, ha a kőzetből mállás során infiltrálódó csapadékvíz vagy CO_2 -tartalmú hidrotermális oldatok a Mg-tartalmat mobilizálják. Magas oldottanyag-tartalmú vizek Mg-dús változataiban (keserűvíz) ionos állapotban van jelen. A dolomit kőzetet – főként építőipari nyersanyagként – számos helyen bányásszák. A magnézium dolomitból való előállítására gazdaságos technológiákat elsősorban Kínában alkalmaznak.

A nyilvános hazai ásványvagyon nyilvántartási adattáblázatok nem tartalmaznak külön adatokat magneziumra, magnezitre.

Magnezit-előfordulásaink

9794 Felsőcsatár

A Kőszegi hegységben Felsőcsatáron a korábban bányászott szerpentinben talktelepben magnezitet tartalmazó erek ismertek. A magnezit csak lokális elterjedésű, ezenkívül dolomit és kevés ankerit, kalcit, sziderit is fellelhető.

3735 Alsótelekes, 3756 Perkupa

Perm és triász korú evaporit sorozatokban magnezit-gazdag üledékes közbetelepülésekről van információ, érdemleges mennyiségi, kiterjedési adatok nélkül.

Dolomit-előfordulásaink

2085 Pilisvörösvár

Magyarország legjelentősebb dolomitbányája. Az előfordulás a Dorogi- és a Pilisvörösvári-medencét elválasztó kiemelt helyzetű triász karni földolomit zónába tartozik, az ország legtisztább és legjobb minőségű dolomitja. A kitermelhető ásványvagyon (2010) 28,4 Mt darabos dolomit és 37 Mt dolomitliszt. Termelése 2007-ben 232 ezer tonna volt [5]. A dolomitot az építőipar – például nemesvakolat-gyártás – mellett az üvegipar, a kohászat és a műtrágyagyártás használja fel.

Egyéb jelentősebb dolomit-előfordulásaink: **8043 Iszka**szentgyörgy, **3735 Alsótelekes**, **8082 Gánt**.

Keserűvizek

A keserűvizek Mg- és szulfát-ionokat nagyobb mennyiségben tartalmazó ásványvizek.



2. ábra. A nagyigmándi keserűvíz címkéje (Forrás: <https://hu.museum-digital.org/object/27083>)

2942 Nagyigmánd

A legismertebb Mg-dús keserűvíz felfedezése felszíni talajvíz kutakból 1862-ből datálódik, gyógyvízként termelése 1989-ben fejeződött be. Legelső közölt elemzése szerint a víz 5,5% Mg-tartalmú, a palackozáson közölt kémiai elemzés alapján MgSO_4 -tartalma 2,6%, Na_2SO_4 -tartalma 1,0% (2. ábra). Gyógyvízként történt termelését a víztartó nitrátos szennyeződése miatt hagyták abba. Lehetséges vízhozama, genetikája, nem ismert. MgSO_4 formában gyógyhatású készítményként, talajjavítóként, műtrágyaanyagként alkalmazzák. Ilyen sós vizetből (főként tengervízből) előállítása ipari technológiával megoldott [6]. A magas Mg-szulfát-tartalom a szomszédos község (2898 Kocs) talajvízkútjaiban is jelentkezett.

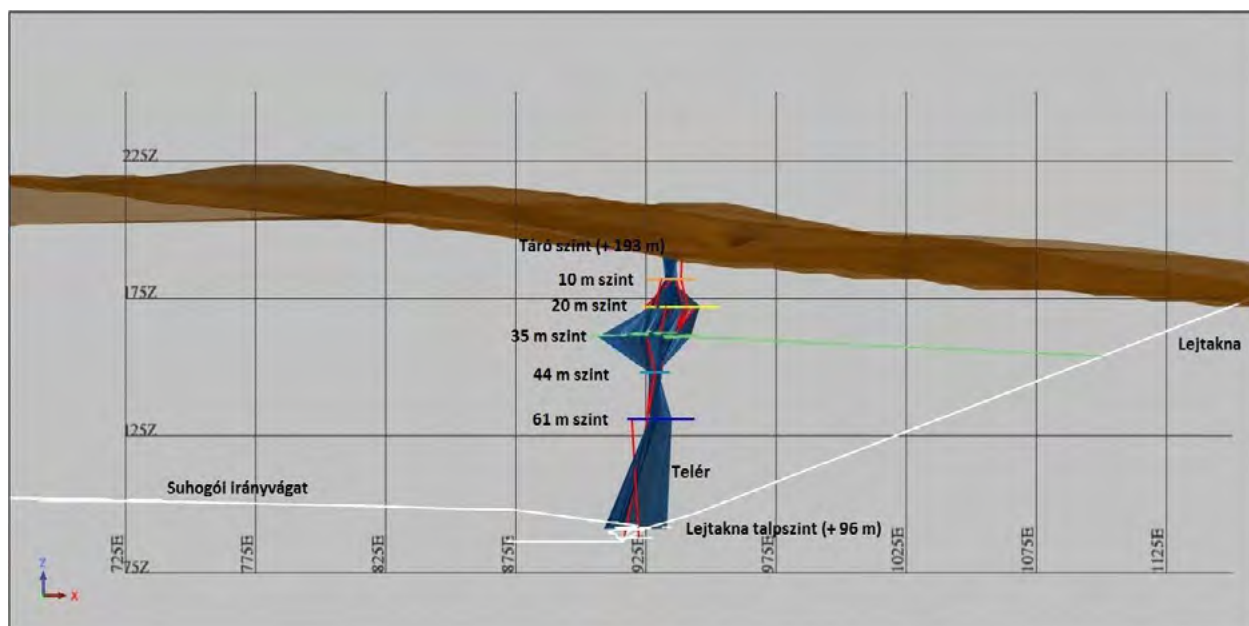
Hélium

A hélium a hidrogén után a második legkönnyebb gáz, és a második leggyakoribb elem az univerzumban.

Kémiaiilag inert, nem mérgező, és az abszolút nulla hőmérséklethez közeli hőmérsékleten folyékony állapotban marad. Csak a közelmúltban kezdte el a globális közösség felismerni stratégiai jelentőségét és a felelősségteljesebb gazdálkodás szükségességét. Főként a földgáztermelés melléktermékeként állítják elő, és ezért rendelkezésre állása a fosszilis tüzelőanyagok termeléséhez kötődik. A globális héliumtermelés 2024-ben meghaladta a 160 millió köbmétert. Katar és az Egyesült Államok együttesen adják a termelés több mint 75%-át. Egyedülálló tulajdonságai miatt pótolhatatlan számos ágazatban, többek között a felfeztetőgyártásban, az űrhajózásban és a védelmi iparban. Használják továbbá a kvantumtechnológiákban is, ahol lehetővé teszi a kvantumadatok stabilizálásához szükséges rendkívül alacsony hőmérséklet elérését. Ezeknek az alkalmazásoknak nincs közvetlen helyettesítője [7].



3. ábra. A hélium egyik legnépszerűbb alkalmazása



4. ábra. Pátka Kőrákáshegy fluorittelér modellje, Surpac (Forrás: Tompa R. kéziratosa)

A természetes hélium hazai előfordulásaival kapcsolatosan kevés nyilvános közlésről van tudomásunk.

8000 Székesfehérvár

A múlt század első felében közölték az első átfogó mintavételek nyomán készült He-koncentrációkat Magyarországról [8]. A legnagyobb értékek a Székesfehérvári fúrás 820 m mélyről, paleozoikumból származó gázmintájában jelentkeztek 1,54% maximális He-koncentrációval 30% metán mellett.

4200 Hajdúszoboszló, 9653 Répcelak, 5520 Szeghalom

Szórványos mérési adatok ismertek az Alföld és a Kisalföld fúrásaiból. Az alföldi kutakban Szeghalomnál 192–310 mg/kg [9], a Kisalföldön Répcelaknál 200–1462 mg/kg közötti volt [10] az összesen mintegy tucatnyi elemzett gázminta He⁴-tartalma.

A legújabb időkben a hazai héliumdúsulások lehetőségének körvonalazására végzett földtani elemző vizsgálatok szerint Hajdúszoboszló már letermelt mezőjének becsült hidrogénvagyona 23 Mm³ volt. Hajdúszoboszló mély zónájának, illetve Répcelak felső szintjeinek He-tartalma meghaladta az 1000 mg/kg-et. Az elemzés a legígéretesebb feltáratlan területként a Szolnoktól K-re NyDNY-KÉK irányban húzódó 20–30 km-es kevertgáz övet tartja [11].

Fluorit

Az EU 2023-as adatösszegzése [12] szerint a fluorit (CaF₂) a kohásban folyósítószerként működik, csökkenti a nyersanyagok olvadáspontját és megkönnyíti a szennyeződések eltávolítását az acél- és alumíniumgyártás során. A vegyiparban a hidrogén-fluorid a

gyógyszerekben, hűtőközegekben, nagy teljesítményű műanyagokban és atomerőművi fűtőelemek feldolgozásában használt fluorozott vegyületek elsődleges prekursoraként szolgál. A globális fluoritpiac 2024-ben körülbelül 2,57 milliárd USD volt, a becsült növekedési ütem 2032-re eléri a 3,41 milliárd USD-t, ami körülbelül 3,6%-os növekedési ütemet jelent. Kína, Mexikó és Dél-Afrika a fő termelők. A termelők és a kereskedők a fluoritot három fő minőségbe sorolják:

- ❑ Floursav-gyártási minőség (≥97% CaF₂): floursav előállítására;
- ❑ Kohászati minőség (60–85% CaF₂): olvadáspont csökkentésre;
- ❑ Kerámiai minőség: üveg, kerámia, zománc gyártására

Magyar előfordulások

8092 Pátka, 8095 Pákozd

A Velencei hegység Pátka környéki három kis bányájában (Pátka Szűzvár, Malom, Pákozd) folyt bányászati termelés 1952 és 1973 között, kezdetben fluorit, majd Pb-, Zn-érc nyersanyagokra. Az egyes üzemek éves kitermelése 2–5 ezer tonna körül változott, az élettartamuk végén a 20 ezer t/év mennyiség körüli volt [13]. Ásványvagyona az állami nyilvántartások szerint nincs.

Az előfordulások adatait – a földtani kutatástól a dúsítás technológiáig bezáróan – egy áttekintő monográfia adja közre. Az összefoglalóból kiderül, hogy a régi üzem 3D-rekonstrukciója és az új földtani modell szerint a fluoritdúsulás a mélység felé nem csökken, hanem nő (4. ábra). Kémiai összetétele kevésbé ismert, a CriticEl elemzési adatok szerint jelentősebb In- és Ag-tartalom is jelentkezhet [14].

Bauxit

A bauxit intenzív laterites mállással képződik alumínium-szilikát kőzetekből. Ásványtanilag Al-hidroxidokból (gibbszit, böhmít, diaszpor), valamint felszíni mállással szemben további stabil fázisokból – vasoxidok és -hidroxidok, kvarc, szilikátok – áll. Tipikus Al_2O_3 -tartalma 40–60%, amely régióként és lelőhely típusonként változik. A világ elsődleges alumíniumérce, és az egyetlen gazdaságilag életképes alumínium-oxid forrás.

Két fő lelőhelytípus létezik:

- ❑ A karsztbauxitok karbonátos térszínen fejlődnek ki, ezek jellemzőek Európában a Földközi-tenger medencéjére, beleértve Görögországot, Franciaországot, a volt Jugoszlávia több országát és Magyarországot is.
- ❑ Laterit-bauxitok trópusi régiókban képződnek, és ezek ma dominánsak a globális bauxittermelésben, beleértve Guineát, Ausztráliát és Brazíliát.

A USGS [2] adatai szerint a bauxitkészlet globális szinten 30 milliárd tonnára becsülhető, és főként Guineában (25%), Ausztráliában (17%), Vietnamban (12%) és Brazíliában (9%) koncentrálódik. Az Európai Unión belül Görögország rendelkezik a legjelentősebb lelőhelyekkel, a becslések szerint ezek teljes készlete körülbelül 250 millió tonna. Az EU kevesebb mint 2 millió tonna/év bauxitot termel (2016–2020 átlag), Görögország adja ennek 93%-át.

A magyarországi bauxitok kutatásának és bányászatának jelentős irodalma van. A földtani kutatásáról szóló utolsó áttekintő összefoglalás 2020-ban jelent meg [15]. Korábban jelentős karsztbauxitlelőhelyekkel rendelkezünk, amelyek zöme a Dunántúli-hegység karsztrendszereihez kapcsolódik. A magyarországi jelenlegi földtani vagyon 124 millió tonna [16].

Fő termelő helyek a Bakonyban és a Vértesben **8454 Nyírád, 8452 Halimba, 8581 Iharkút, 8432 Fenyőfő 8082 Gánt, 8044 Kincsesbánya** voltak. Bauxit termelésünk 2018-ban megszűnt, az utolsó bánya a **8427 Bakonyoszlop II.** volt. Az ország korábban jelentős timföldgyári kapacitással rendelkezett (**8400 Ajka, 2931 Almásfüzitő**), ezek bezártak.

Bár alumíniumtermelésre a jelenleg ismert források elégtelenek, ritkaföldfém-, gallium- és szkandiumtartalmuk [17] kinyerésével együtt gazdasági potenciáljukat érdemes újraértékelni. A még lehetséges kitermeletlen lelőhelyek a Dunántúli Középhegység mezozoós karbonátos sorozataiban várhatóak [18].

Gallium

A gallium, a bauxithoz közvetlenül kapcsolódó kritikus ásványi nyersanyag. Az alumíniumot képes he-

lyettesíteni a hasonló ionrádiusz és töltés miatt oxid- és hidroxidásványokban – különösen a böhmítben és a gibbszitben. Önállóan nincsenek számottevő dúsulásai, telepei, hanem más nyersanyagok feldolgozásának melléktermékeként állítják elő. Elemi állapotban nagyon széles hőmérséklet tartományban, 29–2400 °C között folyékony. Gallium esetében az EU importfüggősége 97%-os. A gallium nélkülözhetetlen elem integrált áramkörökben (70%), LED-világításban (25%) és CIGS fotovoltaiikus rendszerekben (5%). A bauxitokban átlagban 30–80 mg/kg gallium fordul elő. A bauxit mellett a gallium másik forrását a cinkércek jelentik [19]. Világpiaci átlagára (2024) 220 USD/kg [2].

Hazai előfordulások

Magyarország egykor jelentős galliumtermelő volt az 1970-es években, az akkori világtermelési rangsorban a 10. helyen állt, évi 1-2 tonna fém gallium termelésével. A galliumot a bauxitból a timföldgyártás során vonták ki.

Magyarországon az 1970–80-as években végzett színképelemzések – esetleg az eltérő kiértékelési eljárások nyomán – jelentősen magasabb Ga-tartalmaikat mutattak, mint a jelenlegi ICP-OES-, ICP-AES-, ICP-MS-mérések. A mai hazai földtani laboratóriumok a CriticEl program során végzett összemérés eredményei is jelentős hibával terheltek, e téren módszerfejlesztésre van szükség.

8581 Iharkút

317 minta elemzése alapján a Ga_2O_3 -tartalom 22 és 104 mg/kg között volt (16–77 mg/kg Ga) [18].

8454 Nyírád, 8427 Bakonyoszlop

A CriticEl program során végzett modern színképelemzésekben a legmagasabb Ga-koncentrációkat a hazai bauxitmintákban mértük, 4 lelőhelyen, 16 mintából, 44 mg/kg átlagértékkel, 55 mg/kg maximummal.

8092 Lovasberény

A Velencei-hegység hidrotermálisan elváltozott paláiban Li- és Ba-dúsulást kísért 200–300 mg/kg gallium [20].

7691 Pécs

A Mecseki Kőszén Formáció „1–2 rétegtani szintjében” 1237 (!) mintában átlagosan 80 mg/kg, néhány mintában 0,1%-ot elérő Ga-tartalmat találtak. A mecseki feketekőszén területéről 326 kőszénhamu-mintát vizsgáltak, átlagértékük 137 mg/kg [21].

7353 Szászvár

A liász kőszenes összletből vett mintákban a maximális Ga koncentráció az Sz-12 fúrásból vett egyik mintában jelentkezett, 55 mg/kg értékkel [22].

2509 Dorog, 8056 Bakonycsérnye

A fiatalabb kőszének hamujában is mutattak ki Ga-dúsulást [21]: – 76 mg/kg a Dorogi Formációhoz tartozó eocén barnakőszénben, – 133 mg/kg a Csatkai Formációhoz tartozó oligocén barnakőszénben, – 96 mg/kg a bakonycsérnyei eocén barnakőszénben.

8092 Pátka, 2634 Nagybörzsöny

Az ólom-cinkérccek szfaleritjében a következő Ga-tartalmakat közölték [21]: Pátka 1600 mg/kg, >1% (szűzvári dúsító szinpora: 0,1%), Nagybörzsöny, al-táró: 1600 mg/kg,

A CriticEl mintázásaiban [22] a legnagyobb Ga-koncentráció egy szűzvári fluorittelér-mintában fordult elő, 94 mg/kg értékkel.

3244 Parádfürdő

Parádfürdő környéke: 600–4000 mg/kg Ga-tartalom jelentkezett szfaleritben [21].

Foszfát

A foszfátkőzet és az elemi foszfor (P_4) az EU által kritikus nyersanyagnak minősül nagy gazdasági jelentőségük és ellátási kockázatuk miatt. Fő felhasználási területei közé tartoznak a műtrágyák (az EU foszfátkőzet-felhasználásának 86%-a), az állati takarmányok kiegészítői, valamint a speciális vegyi anyagok (pl. égésgát). Világszinten a készletek több mint 70%-a Marokkóban, Kínában és az Egyesült Államokban koncentrálódik. Finnország ad otthont az egyetlen működő európai foszfát bányának (Siilinjärvi), amely 1,6 milliárd tonna, 3,7% P_2O_5 -tartalmú magmás foszfát-ásványagyont tartalmaz.[23].

8245 Pécsely

Az 1950-es években az első áttekintő uránérc kutatás során derítették fel az előfordulást [24]. A triász anizuszi Megyehegyi Dolomit és a felette települő triász ladini brachiopodás mészkő határfelületén alakult ki, néhány tized méter vastagságú tömeges és 1-2 m vastagságú infiltrációs foszforit dúsulás, 22–24%



5. ábra. Üledékes foszforit, Bükk-szentkereszt (Forrás: Criticel 2013)

P_2O_5 -koncentrációval, kísérő fluorittal. A fő foszfortartalmú ásvány F-apatit. A határfelületet későbbi kutatások a Tagyoni Platform kiemelt tengeralfatti blokkjaként értelmezték [25].

8409 Úrkút, Eplény

Foszforit-betelepülések találhatók az úrkúti és az eplényi mangánérc telepekben, melyek szintén kiemelt RFF-tartalmúak (0,5 tömeg%-ig) [17]. Kiterjedésük, vastagságuk, koncentrációjuk nem ismert.

3557 Bükk-szentkereszt

Szintén az 1960-as évek felderítő térképezései során légi U-anómália felszíni ellenőrzésével azonosították bükk-szentkereszt urántartalmú üledékes foszfátot triász tengeri üledékes rétegsorban (5. ábra). A foszforit F-apatitból épült fel. A kőzetben nagy RFF-koncentráció is jelentkezett [17]. Kiterjedése, P-koncentrációja nem ismert.

Bór

2023 óta szerepel a CRM listán. Az EU-ban 100%-os az importfüggőség. A világ legnagyobb bórát ásványvagyoni Törökországban (a globális tartalékok 75–80%-a) és az Egyesült Államokban koncentrálódnak [26]. Néhány termelési fázis előtt álló regionális projekt van Európában, mint a szerbiai Jadar lítium-bórát lelőhelye, de ezek a környezetvédelmi tiltakozások és az engedélyezési akadályok miatt késedelmekkel szembesülnek. [27].

A Kárpát-medence neogén vulkanitjaiban a bór-koncentráció 4,4–90,3 mg/kg között változó, a legnagyobb értéket a Cserhát-hegységben mérték [28]. Datolit (kalcium boroszilikát) ismert **3321 Egerbaktáról** [29] és vonsenit tús kristályai találhatók a cserhádi Zsúnyi-hegy andezitbányájának szanidin-gazdag üregkitöltéseiből [30].

A mélységi formációvizek bórtartalma a rendelkezésre álló adatok [31] alapján.

Néhány kútból és rétegből jelentősebb koncentrációk ismertek: **3131 Sóshartyán** 600 m: 115 mg/kg, **5731 Nyéklpuszta Nypu-6** 314,2 mg/kg (hát-térérték 1–2 mg/kg).

Összefoglalás

Az áttekintésünkben említett 3 fémként azonosítható kémiai elem, 1 nemesgáz és 3 ásványbányászati nyersanyag szerepelt. Az előfordulásokat a szövegben a postai irányítószámukkal kiegészítve listáztuk, és ilyen formában jelenítjük meg a mellékelt térképen (6. ábra). Az előző áttekintések mintáját követve azokat tekintettük említésre méltó dúsulásoknak, amelyekben a kritikus nyers-

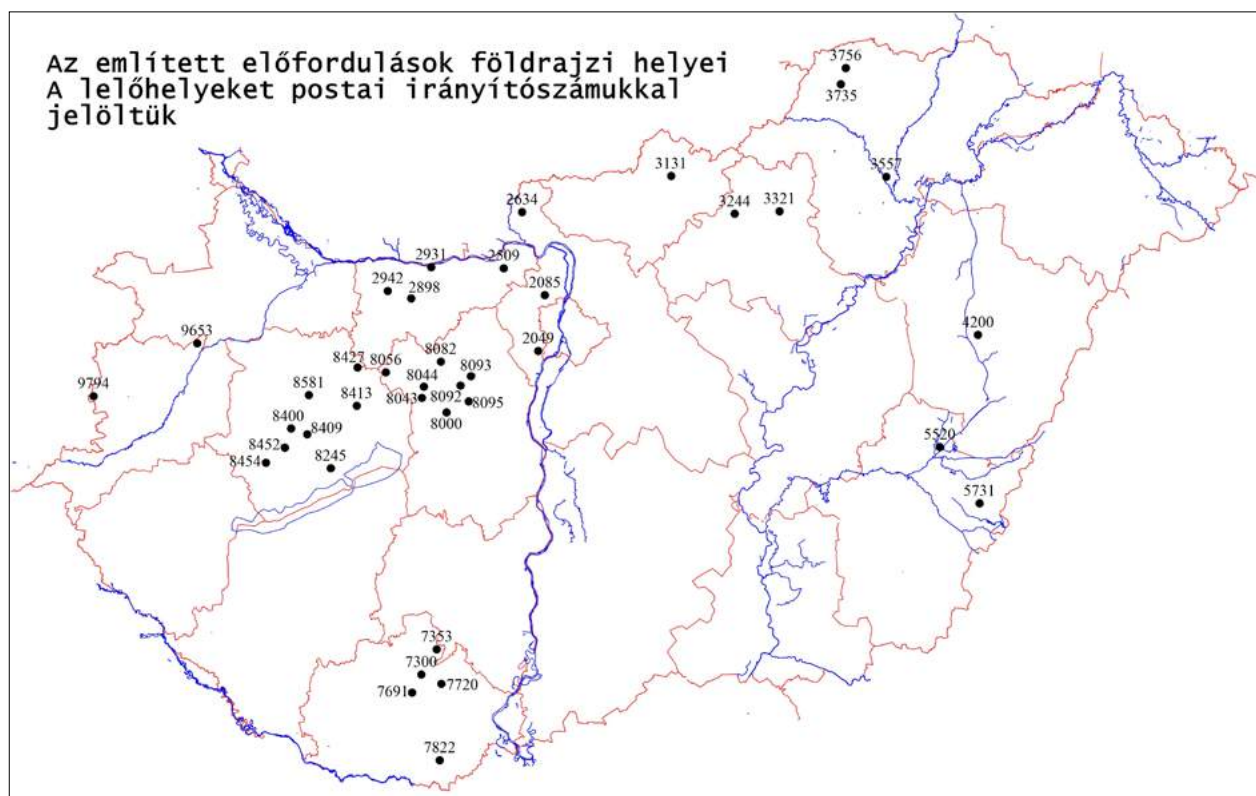
1. táblázat. A tanulmányban szereplő kritikus nyersanyagok piaci árai

Ár		USD/gramm	USD/tonna	Küszöb g/t	Küszöb %
Bauxit	Al ₂ O ₃		30		33
Bór	B ₂ O ₇		560		2
Földpát			44		23
Magnézium	MgCO ₃		895		1
Hélium*	He ₂		14		
Fluorit	CaF ₂		400		3
Gallium	Ga	0,22		45	
https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf https://www.echemi.com/productsInformation/pd20160530143440098-magnesium-ca??? *USD/m ³					

anyag közetben megjelenő koncentrációjának mai piaci értéke a befoglaló közet egy tonnájában eléri vagy meghaladja a 10 USD-t. A koncentrációértékek esetében a maximumokat vettük alapul, az árak esetében a USGS éves jelentésében alkalmazott átlagárakat használtuk. A nyersanyagok hozzávetőleges pillanatnyi áráról az 1. táblázat ad tájékoztatást. Tömegre, a termelés mennyiségére csak hivatkozható közlésben megjelent adatot fogadtunk el.

A terjedelmi korlátok miatt az általános áttekintés rovására inkább a hazai előfordulások néhány fontosabb jellemzőjét soroltuk fel, megadva néhány hivatkozást, amelyek kiindulási pontként szolgálhatnak a

további adatfeldolgozásokhoz. A hét nyersanyagból egy (földpát) ma is aktív termelő, három nyersanyagot korábban is termeltek (bauxit, gallium, fluorit), illetve ma is termelnek, de nem fém kinyerés céljára (dolomit, magnézium). Alig vannak ismert adatok a bór-, hélium- és foszfát-előfordulásainkról. Nem találtunk elegendő adatot arra, hogy ezeknek a felismert lelőhelyeknek a gazdasági értékét akár nagyságrendben is becsülhessük. További adatfeldolgozási és adatgyűjtési munkák szükségesek. Minden újabb lépést annak fényében kell tervezni, hogy a feldolgozott adatok születése (jórészt a 20. század közepe, vége) óta az igények, az információ feldolgozási módszerek a mi-



6. ábra. A tanulmányban említett előfordulások földrajzi helyzete

nősségi követelmények, a feldolgozási technológiák, illetve a külső és belső piacok egyaránt jelentős változásokon mentek át.

Az adatok forrása részben a MÁFI/MGSZ/SZTFH adattárában lévő jelentések, részben folyóiratokból származó és szakkönyvi közlések, részben (főleg a CriticEl program során végzett mintavételekből) csak részlegesen vagy nem közölt vizsgálati jegyzőkönyvek voltak. A munka messze áll még az összes adatforrás felderítésétől és feldolgozásától, csak az írás időpontjában rögzíthető pillanatnyi állapotot mutatja be.

Az áttekintésben szereplő kilenc nyersanyagfajta közül a bauxit, és a földpát esetében ismerünk korábbi ásványvagyonadatokat, a többi hét anyagfajta nem.

Köszönetnyilvánítás

A pécsváradi földpátos homok-előfordulás adatait a Strabag Mineral KÖKA Kft. (Sütő Róbert, Szutor András) bocsátotta rendelkezésünkre. A cikksorozatban szereplő térképek összeállításáért dr. Mikita Viktóriát illeti köszönet.

Hivatkozások

- [1] https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCREEN2_factsheets_FELDSPAR-1.pdf
- [2] <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2025>
- [3] https://hu.mineral.eu/databases/internet/_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=39331627155EEC08C1258AC4003E9796
- [4] https://screen.eu/wp-content/uploads/2024/02/SCREEN2_factsheets_MAGNESIUM_update.pdf
- [5] Zelenka T. (2011): Helyzetkép a hazai nemfemes ásványbányászati (ipari ásványok) nyersanyagokról. BKL Bányászat, 144(3), 20–24. https://epa.oszk.hu/04600/04602/00050/pdf/EPA04602_banyaszat_2011_03.pdf
- [6] https://hu.wikipedia.org/wiki/Igm%C3%A1ndi_keser%C5%B1v%C3%ADz
- [7] https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCREEN2_factsheets_HELIUM.pdf
- [8] Szelényi Tibor, Csajághy Gábor (1941): Magyar földgázok héliumtartalma. M. Kir. Földtani Intézet Évkönyve, 35(4), 65 p.
- [9] Sherwood B. L., O’Nions R. K., Ballentine C. J. (1993): Helium and neon isotope systematics in carbon-dioxid-rich and hydrocarbon-rich reservoirs. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(23), 5279–5290. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90311-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90311-5)
- [10] Palcsu L., Veto I., Futó I., Vodila G., Papp L., Major Z. (2014): In-reservoir mixing of mantle-derived CO₂ and metasedimentary CH₄-N₂ fluids. Noble gas and stable isotope study of two multistacked fields (Pannonian Basin System, W-Hungary). Marine and Petroleum Geology 54, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.013>
- [11] Vető I. (2023): Hélium magyarországi földgázokban. Varga A. (szerk), In: 13. Közvetlen, Geokémiai Vándorgyűlés. Előadások és absztrakt.
- [12] https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCREEN2_factsheets_FLUORSPAR-update.pdf
- [13] Kun B. (1989): 25 éves az Országos Érc- és Ásványbányák. Magyar Elektronikus Könyvtár – MEK-09718. <https://vmek.oszk.hu/09700/09718/index.phtml>
- [14] Molnár J. (2013, szerk.): A Pátka-Szűzvár egykori fluorit- és ércelőfordulásunk újraértékelése. Milagrossa, Miskolc, 159 p.
- [15] Mindszenty A. (2020): A magyarországi bauxitok kutatásának rövid története (1903–2020). Földtani Közlöny, 150(4), 529. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2020.150.4.529>
- [16] <https://sztfh.hu/nyilvantartasok/asvanyvagyon-nyilvantartas/>
- [17] Balassa Cs., Pataky Cs., Tátrai Cs., Antal K., Gyenes I., Szakáll S. (2025): Critical Raw Materials Hungary Data Collection: Rare earth elements indications in Hungary [A Kritikus Nyersanyagok Maraton Adatgyűjteményéből: Ritkaföldfém-indikációk Magyarországon]. Bányászati és Kohászati Lapok 158(1), 26–36. <https://doi.org/10.63457/BKL.158.2025.1.3>
- [18] Szantner F., Knauer J., Mindszenty A. (1986): Bauxit-prognózis. MTA VAB, Veszprém, 472 p.
- [19] https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCREEN2_factsheets_GALLIUM.pdf
- [20] Böjtösné Varrók K. (1966): Wolfrám a Velencei-hegységben. Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1964, pp. 293–300.
- [21] Földváriné Vogl M. (1970): Összefoglaló értékelő jelentés a területi ritkaföldfém-kutatás tájékoztató jellegű kutatási fázisának eredményeiről. M. Áll. Földtani Intézet, Budapest, pp. 5–95.
- [22] Németh N., Hajdú I., Hartai É. (2013): Gallium. In: Less Gy. (szerk), Stratégiai fontosságú ásványi nyersanyagok I. Milagrossa, Miskolc. 209 p.
- [23] https://screen.eu/wp-content/uploads/2024/01/SCREEN2_factsheets_PHOSPHATE-update2.pdf
- [24] Kiss J., Virágh K. (1959): Urántartalmú foszfátos kőzet a balatonfelvidéki (Pécsely) triász összletben. Földtani Közlöny 89, 85–97. https://epa.oszk.hu/01600/01635/00148/pdf/EPA01635_foldtani_kozlony_1959_1_085-097.pdf
- [25] Hargitainé Molnár Zs. (2019): Nyersanyagok és indikációik geológiai és ásványtani vizsgálata, különös tekintettel az Észak-Dunántúlon észlelt urán és ritkaföldfém nyomokra. Doktori értekezés. ELTE Budapest.
- [26] https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCREEN2_factsheets_BORON-update.pdf
- [27] <https://www.vg.hu/nemzetkozi-gazdasag/2025/11/szerbia-litium-banya-felfuggesztes-rio-tinto>
- [28] Gmeling K. (2010): A Kárpát-Pannon térség miocén-kvarter mészkáli vulkáni kőzeteinek bór geokémiai összetétele és kapcsolata a szubdukciós folyamatokkal: prompt-gamma aktivációs analitikai vizsgálatok. PhD-értekezés, ELTE. <https://m2.mtmt.hu/gui2/?mode=browse¶ms=publication;1459663>
- [29] <http://geomania.hu/asvany.php?asvid=275>
- [30] Szakáll S., Fehér B., Kristály F., Kasztovszky Zs., Maróti B. (2018): Vonsenite from Nagylóc-Zsunypusztá, Cserhát-Mts., Hungary. In: Joint 5th Central-European Mineralogical Conference, abstract volume, 121.
- [31] <https://brineris.pwr.edu.pl/>

A Föld felfedezése a tenger alatt

Exploring the Earth under the sea

ID. ŐSZ ÁRPÁD
E-mail: oszarpad46@gmail.com

A tudományos fúróhajók lehetővé teszik a kutatók számára, hogy hozzáférjenek a Föld néhány legnagyobb kihívást jelentő környezetéhez, adatokat és mintákat gyűjtve üledékből, kőzetből, folyadékokból és élőlényekből a tengerfenék alól. A tudományos óceánfúrások terén régóta tartó nemzetközi együttműködés átalakította az emberiség bolygónkról alkotott képét, alapvető kérdéseket vetve fel a Föld dinamikus történetével, folyamataival és szerkezetével kapcsolatban. A tudományos óceánfúrások, mint kutatási technika, térnyerése új eszközök és módszertanok kifejlesztéséhez vezetett, és tartós nemzetközi együttműködéseket elősegített a kutatás, az oktatás és a nyilvánosság bevonása terén.

Kulcsszavak: tenger, mélytenger, óceán, üledék, tengerfenék, expedíció, fúrás, magvevő, magfúró, fúróhajó, mintavétel, felszálló cső, Moho-felület, eredmények, rekordok, tervek

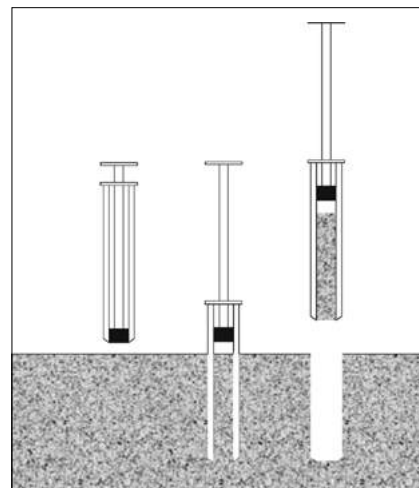
Scientific drill ships allow researchers access to some of Earth's most challenging environments, collecting data and samples of sediment, rock, fluids, and living organisms from below the seafloor. A long-running international collaboration in scientific ocean drilling has transformed human understanding of our planet, addressing fundamental questions about Earth's dynamic history, processes, and structure. The growth of scientific ocean drilling as a research technique has led to the development of new tools and methodologies and has fostered enduring international collaborations in research, education, and public engagement.

Keywords: sea, deep sea, ocean, sediment, seabed, expedition, drilling, corer, coring, drill ship, sampling, riser, Moho surface, results, records, plans

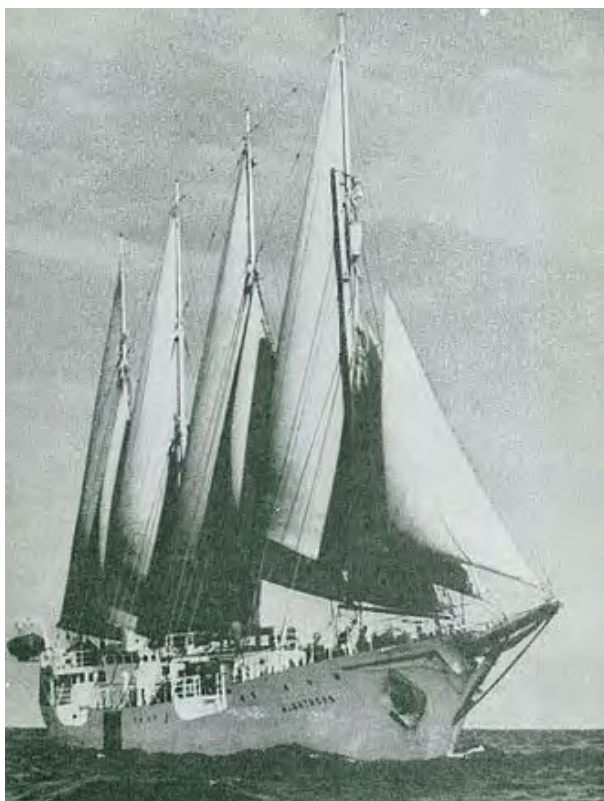
A kezdetek

A tengerből kinyert magminták különösen hasznosak, mivel a szárazföldi üledékekkel ellentétben ezek nagyrészt érintetlenek. Senki nem bolygatta meg azokat ásással, szántással, fúrással vagy csupán rajtuk történő járással. A zavartalan tengeri üledékek tanulmányozásával a szakemberek a legtisztább képet kapják a Föld különböző időszakairól, emellett többet megtudnak a Föld egymással összefüggő és kölcsönhatásban lévő rendszereiről. Ezek az üledékek – amelyek a geológiai idővel lassan felhalmozódtak – mikroszkopikus fossziliákat tartalmaznak, amelyek összetétele az ősi tengeri viszonyokra utal. Korábban a tengerek fenekéről az üledék kinyerésére használt mintavevő eszközök csak körülbelül 2 méter mélyre, azaz néhány ezer évnnyire hatoltak le az üledékbe. Az 1940-es években kifejlesztett dugattyús magvevő (1. ábra) lehetővé tette, hogy hosszabb üledékszakszokat (maximum 18 méter) nyerjenek ki az óceán- és

tengerfenékről. A dugattyús magvevőt először a svéd *Albatross* kutatóhajó világkörüli útja során használták az 1947 és 1948 években. Ennek segítségével a svéd kutatóknak 18 méter hosszú üledékmagokat sikerült



1. ábra. A dugattyús magvétel elve



2. ábra. Az Albatross kiképzőhajó

a felszínre hozni, ami további kétmillió évet jelentett a kutatások időtartamát illetően. Ezzel az expedícióval kezdődött el a Föld felfedezése a tenger alatt, ezzel kezdték el a világ tengereinek alján megőrzött gazdag és változatos bolygótörténet megismerését.

Az Albatross – expedíció egy svéd oceanográfiai expedíció volt, amely 1947. július 4. és 1948. október 3. között 15 hónap alatt körbehajózta a világot, 45 000 tengeri mérföldet (~83 400 kilométer) megtéve. Az expedíció nagyon sikeres volt, nemzetközi figyelmet vonzott, és az oceanográfia története egyik fontos lépésének tekintik. Az expedíciót az újonnan épített Albatross kiképzőhajóval hajtották végre. A 70 méter hosszú és 11 méter széles hajó kombinált motoros és vitorlás hajó volt (2. ábra).

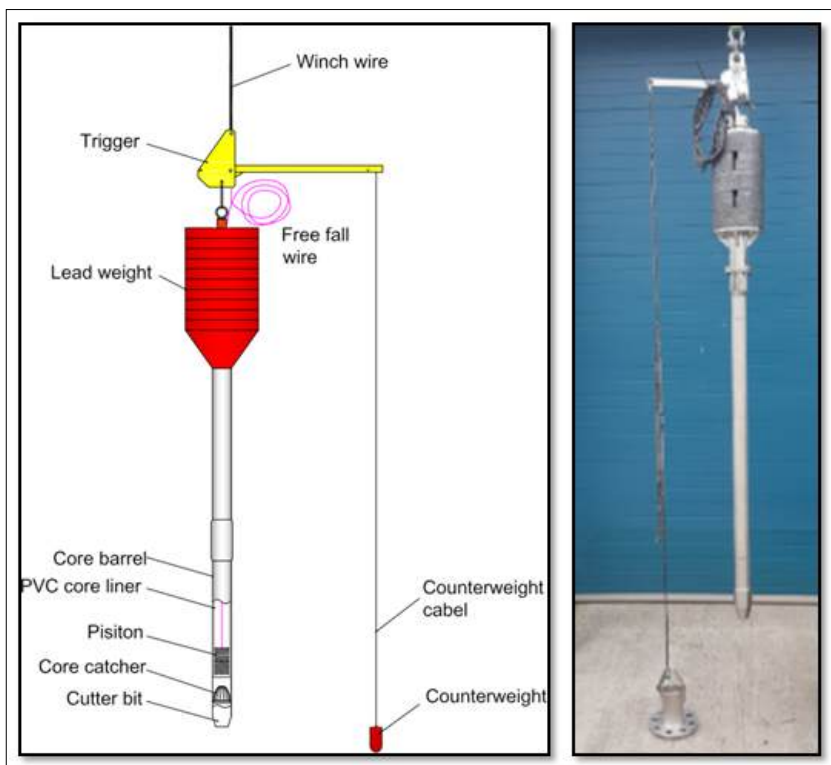
A Boström Line Társaság a leendő hajóstisztek kiképzésére építette, és a hajót a hozzá tartozó légénységgel együtt – szinte ingyen – kölcsönadták az expedíciónak. Az expedíciót kizárólag magánadományokból finanszírozták, a vezetője Hans Pettersson svéd fizikus és oceanográfus volt. Az ex-



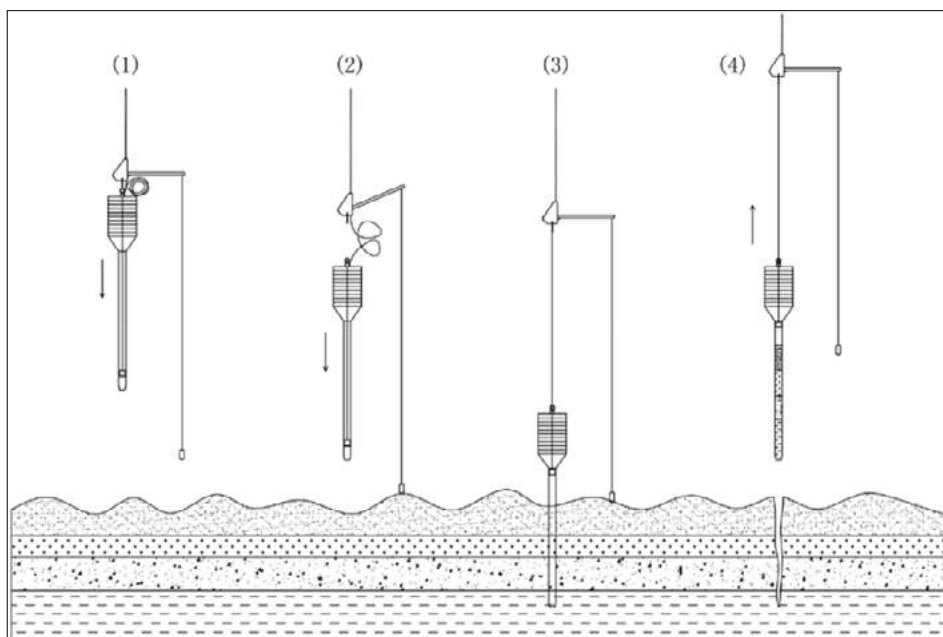
3. ábra. A dugattyús magvevő beépítése az Albatross kiképzőhajóról

pedíció fő feladata az volt, hogy 18 méter hosszú üledékmintákat vegyen az óceán fenekéről. Ezt a Börje Kullunberg oceanográfus által kifejlesztett dugattyús magvevővel végezték el (3. ábra).

Az expedíció elvégezte az üledékvastagság első szeizmikus reflexiós méréseit is vízbe süllyesztett szondák segítségével. Az üledékvizsgálatok eredményei úttörőek voltak, mivel kimutatták, hogy az



4. ábra. Dugattyús magvevő



5. ábra. A dugattyús magvétel folyamata: (1) beépítés, (2) kioldás, (3) magvétel, (4) kiépítés

üledékvastagság a középóceáni hátságoktól távolodva az üledék felhalmozódási idejével együtt nőtt. Ez egyike volt azon bizonyítékoknak, amelyek végül a lemeztektonika elméletének elfogadásához vezettek. Az üledékek mellett az expedíció az óceán biológiáját is vizsgálta. Az első mélytengeri vonóhálós halászat – 7600–7900 méteres mélységben – kimutatta, hogy ezek a mélységek nem a korábban elfogadott holt zónát alkotják [1].

A dugattyús magvevő egy hosszú (maximum 18 méter) erős rozsdamentes acél magcső, amelynek tetején ólomnehezék van (maximum 10 darab, egyenlő 100 kilogrammos), alsó végén kívül vágósaru, belül rugós magszakító (magfogó) van. Az acél magcsőön belül végig átlátszó PVC belső magcső helyezkedik el, amelynek az alján belül tömítéssel ellátott dugattyú van, amely lezárja a belső magcsövet. Ez a dugattyú a szabadeséses dróthuzállal összeköttetésben van az acél magcső tetején lévő kioldószerkezettel.

A kioldószerkezethez csatlakozik a működtető kábel, amelynek a végén található a 30 kilogrammos működtető súly (4. ábra) [2]. A dugattyús magvevő működése a következő: A hajóról egy drótkötéllel engedik le a dugattyús magfűrőt a tengerbe (5. ábra).

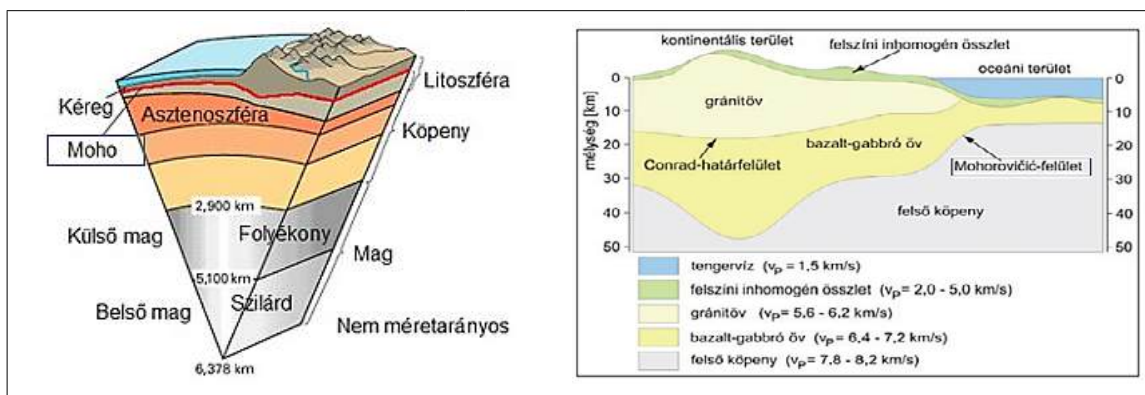
Az 5. ábra részletezése: (1) Amikor a 30 kilogrammos működtető súly eléri a tengerfenéket és nekiütközik annak, a működtető kábel aktiválja a kioldószerkezetet, amely kioldja a magcsövet, (2) és az nagy sebességgel – az ólomnehezék tömegétől függően – befűrődik a tengerfenéken lévő üledékbe. (3) Miután a dugattyú által lezárt belső magcsőben légköri nyomás van, kívül pedig a tengerfenéken lévő nyomás uralkodik, a kialakult nyomáskülönbség (vákuum) elősegíti az üledék benyomulását a belső csőbe. Ez

a folyamat másodpercek alatt játszódik le. Ezután a hajó legénysége a drótkötéllel megemeli a dugattyús magvevőt, a magszakító a belső magcsőbe becsúszott magot elszakítja a tengerfenéken lévő üledéktől és nem engedi kicsúszni, majd felhúzzák a felszínre a dugattyús magvevőt. (4) A felszínen a magcsövet két bakra kifektetik és hidraulikusan vagy mechanikusan működtetett dugattyúrúddal kinyomják a belső csőből a magot

A MOHOLE projekt (MP) (1961–1966)

A Mohorovičić-felület (Moho) a földkérget a földköpenytől elválasztó határfelület, amelynek jellemzője a kőzetek sűrűségében, valamint az azokon keresztülhaladó szeizmikus hullámok sebességében bekövetkező hirtelen változásában van. Az óceánfenék alatt kb. 6 kilométer mélységben helyezkedik el, azonban a kontinensek alatt a felszínhez viszonyított mélysége a 70 kilométert is elérheti. Nevét Andrija Mohorovičić horvát geofizikustól kapta, aki 1909-ben a földrengéshullámok sebességadataiból számította ki és határozta meg a helyzetét (6. ábra).

Két amerikai egyesült államokbeli tudós 1957-ben javasolta az *American Miscellaneous Society*-ben – amely az amerikai földtudósok inkább ismeretterjesztő, mint tudományos társasága – a földkéreg átfúrását. Ennek tanulmányozására egy mélyfúrási bizottságot hoztak létre. 1960-ban ez a felvetés már nemzetközi szervezetet is kapott: Helsinkiben, a Nemzetközi Geodéziai és Geofizikai Unió ülésén Nemzetközi Felső-Köpeny Bizottságot alakítottak 40 állam részvételével. Kidolgozták a MOHOLE óceáni fúrási programot (a MOHOLE egy szójáték, azaz a Mohorovičić = MOHO-felületbe mélyített lyuk, angolul HOLE).



6. ábra. A Mohorovičić-felület

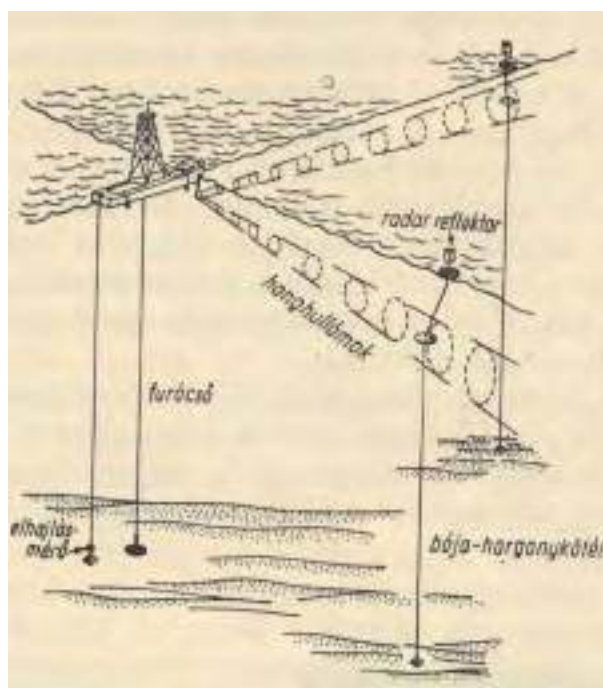


7. ábra. A CUSS I fúróhajó

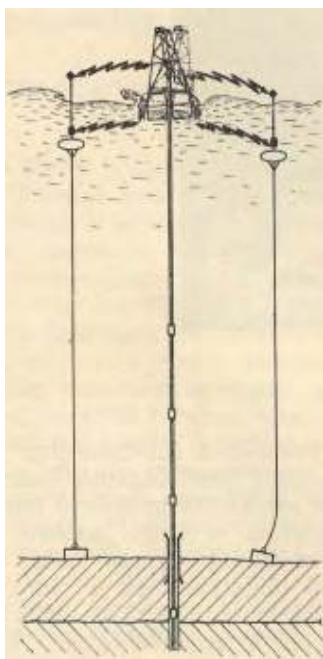
A legelőnyösebb fúrási helynek a Guadelupe-sziget és a mexikói partok közötti terület látszott, éspedig a Gauadelupe-szigettől 74 kilométer távolságra keletre, ahol a Moho-felületig az összes mélység 9–10 kilométer és ebből a tengermélység mintegy 3600–3700 méter. Öt kísérleti fúrást 3570–3760 méter mély tengeren át mélyítették le a tengerfenékre. Az öt fúrás tengerfenékre mélyített összes hossza 745 méter volt, a legmélyebb közülük a tengerfenék szintjétől számított 183 méter talpat ért el. Összességében egyik sem érte el a Moho-felületet. Ezt követően a Hawai-szigetektől 184 kilométerre északnyugatra mélyítették le a 4400 méter mély vízben egy fúrást, azonban ez sem érte el a megcélzott felületet. Az eredetileg 15 millió USD előirányzattal indult projekt költségei azonban 100 millió USD fölé emelkedtek, így 1967-ben a szenátus nem szavazta meg a további munkákhoz kért 19,7 millió USD összeget. A MOHOLE projekt holtpontra jutott.

A kísérleti fúrásokhoz a CUSS I nevű, eredetileg háborús partraszállásra tervezett, a tengeri fúráshoz átalakított hajót használták (7. ábra). (Megjegyzés: A hajó elnevezése az átalakítást finanszírozó Continen-

tal Union, Shell és Superior kőolajtársaságok kezdőbetűiből származik). A CUSS I 79 méter hosszú, 15 méter széles, 4,6 méter merülésű, 300 tonna vízkiszorítású hajó volt, amelynek közepére egy 30 méteres fúrótoronnyal rendelkező 4500 méter mélységkapacitású fúróberendezést szereltek, és 3600 méter vízmélységig tudott dolgozni, valamint a tengerfenékre 180 méterig tudott magot fúrni. A 3600 méter mély vízben át szabadon lévő fúrószárral a fúrás fő problémája a fúróhajó helyben tartá-



8. ábra. A CUSS I fúróhajó radar és szonár (hanglokátor) ernyőkkel vezérelt helyben tartási rendszere



9. ábra. A CUSS I fúróhajó lengési lehetőségei a hajó alatti vezetőkúp és a tengerfenéken lévő vezetőcső kitöltésére útján

azaz a túlságosan nagy hajlítással járó igénybevételnek az elkerülésére – a hajó maximálisan 30 méteres eltávolodását engedték meg a fúrópont felől. Miután 3600 méter mélységben a lehorgonyzás kivihetetlennek látszott, ezért radar és szonár (hanglokátor) készülékekkel vezérelt négy, egyenként 200 LE-s (147 kW) motorral függőleges tengelyen hajtott, bármely irányban forgatható hajópropellerrel oldották meg a helyben tartást (dinamikus pozicionálás). Ezek biztosították a hajó minden irányú érzékeny elmozdulását.

A hajómotorok vezérlésének rögzített pontjait hat radar- és szonár- (hanglokátor-) ernyő képezte (8. ábra). A rendszer az 50 kilométer/óra sebességű szél és 4 méteres hullámszög mellett is 60 méteres körön belül tartotta a hajót. A fúrószár védelmére és a hajó lengési lehetőségeinek biztosítására a forgatóasztal alá egy 10 méter hosszú bevezető kúpot szerkesztettek, a tengerfenéken pedig a vezető (horgonyzó) csőoszlop legfelső szálát kúpos bevezető csővel toldották meg (9. ábra) [3].

Mélytengeri fúrás projekt (Deep Sea Drilling Project, DSDP) (1966–1983)

A tudományos óceáni fúrások következő fázisa a DSDP volt, amely két részből állt. Az első részben (1966–1968) különböző nemzetközi tudományos intézetek, ipari társaságok, országok kormányai és magánszemélyek kötöttek szerződéseket a projekt megvalósítására, létrehozták a Föld Mélyéből Min-



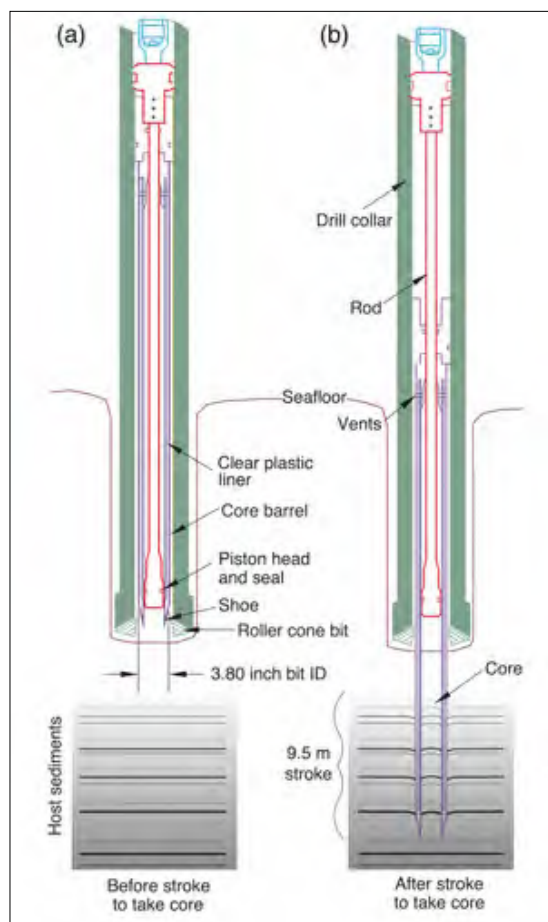
10. ábra. A Glomar Challenger fúróhajó

tavételező Egyesített Oceanográfiai Intézetet (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling, JOIDES), legyártották a *Glomar Challenger* fúróhajót, megteremtették a projekt anyagi hátterét, kijelölték a fúrások helyét és elvégezték a fúrások előtti geofizikai méréseket. A JOIDES székhelye a Kaliforniai Egyetem Scripps Oceanográfiai Intézetében (San Diego) volt, és tanácsadó testülete különböző ország 250 neves tudósából állt. A második szakasz (1968–1983) 96 expedíció 624 helyszínén elvégzett fúrásokból és magfúrásokból állt az Atlanti-óceánon, a Csendes-óceánon, az Indiai-óceánon, a Földközi-tengeren, a Vörös-tengeren és a Déli-sarkvidéken. A legfontosabb felfedezéseket a Dél-Amerika és Afrika közötti óceáni hátság mentén 10 különböző helyen mélyített 17 fúrásból szerezték. A kinyert magok megdönthetetlen bizonyítékot szolgáltatottak a kontinensvándorlásra és a hasadékvonalakban a tengerfenék megújulására. Ez megerősítette Alfred Wegener kontinensvándorlásról szóló elméletét és az egyetlen ősi szárazföld, a Pangea létezését. A magok további bizonyítékokat szolgáltatottak a lemeztektonika elméletének a megerősítésére. A másik felfedezés az óceánfenék fiatalsága volt a Föld geológiai korához képest. Amíg a Föld 4,5 milliárd éves, addig az óceánfenék nem idősebb 200 millió évnél. Összesen 170 043 méter – egyenként 9 méter hosszú és 6,5 centiméter átmérőjű – magot az Amerikai Egyesült Államokban, Németországban és Japánban tárolják. Minden mag egyik felét zárolták a későbbi kutatásokhoz, a másik felét a folyamatban lévő tudományos kutatásokhoz biztosítják. Az összes adat és tudományos eredmény mind papír, mind pedig elektronikus formában elérhető.

1. táblázat. A DSDP fúrási eredményei

Expedíciók száma	96
Kutatott helyszínek száma	624
Összesen megtett út	695 670 km
Legnagyobb vízmélység	7044 m
Teljes fúrási hossz a tengerfenékre	325 548 m
Legmélyebb fúrás a tengerfenékre	1741 m
Maximális behatolás a bazalt kéregbe	1080 m
Magfúrások száma	19 119
Teljes magfúrási hossz	170 043 m
Teljes magnyereség	97 056 m
Teljes magnyereség	57%

A *Glomar Challenger* mélytengeri kutató fúróhajót a Global Marine Inc. (ma Transocean) tervezte, tulajdonolta és üzemeltette, a Livingston Shipbuilding Company (Orange, Texas) gyártotta, és 1968. március 23-án bocsátották vízre (10. ábra). A fúróhajó hossza 122 méter, szélessége 20 méter, magassága 20 méter, vízkiszorítása 10 500 tonna, a fúrótornya 43 méter magas, az utazósebessége 22 kilométer/óra volt, és 90 napig tudott egyfolytában a tengeren tartózkodni.



11. ábra. Hidraulikus dugattyús magvevő és működése: (a) beépítés után és magvétel előtt; (b) magvétel után és kiépítés előtt

A helyben tartását hasonlóan oldották meg, mint az előző fúróhajónál. 1983. novemberében, 15 évnyi tevékenység után a *Glomar Challenger* aktív szolgálata véget ért, majd leselejteztek. A fúróhajó egyes részeit, így a dinamikus helybentartó rendszert, a távirót és a hajtóművet a washingtoni Smithsonian Intézetben tárolják. 1983. augusztus 11-től 1983. november 11-ig elért fúrási eredményeket az 1. táblázat mutatja be.

A magvételt ebben a projektben hidraulikusan működtetett dugattyús magvevővel végezték, amely már alkalmas volt nemcsak puha, hanem a keményebb üledékek mintavételére is.

A hidraulikus dugattyús magvevő (11. ábra) működése a következő: A fúrószárat (fúrócső és súlyosbító) görgős magfúróval beépítik a kívánt mélységig. A vágósaruvall ellátott magcsőszelvényt dróthuzallal beépítik a fúrószáron keresztül a súlyosbító alsó végéig. A 11. ábra részletei: (a) A drótkötelet leoldják és kihúzzák. A fúrószárban lévő folyadékra szivattyúval 160–200 bar nyomást létesítenek (ez 100–125 kN nyomóerőnek felel meg), amely elnyírja a magcsövet rögzítő csapszegeket és a létrejött nyomóerő a 9,5 méter hosszú magcsövet 6 méter/másodperc sebességgel benyomja az üledékbe. (b) A művelet befejezése után a magcsőszelvényt dróthuzallal megfogják és kiépítik. A magcsőből a magot kiszedik, és magcsőszelvényt újból összeállítják. A lyuktalpon lévő görgős magfúróval továbbfúrnak 9,5 métert vagy a következő magvétel mélységéig, és a magvételi műveletet megismétlik addig, amíg szükséges. [4] A görgős magfúró és magcső végén lévő vágósarut a 12. ábra mutatja.



12. ábra. Görgős magfúró és vágósaru

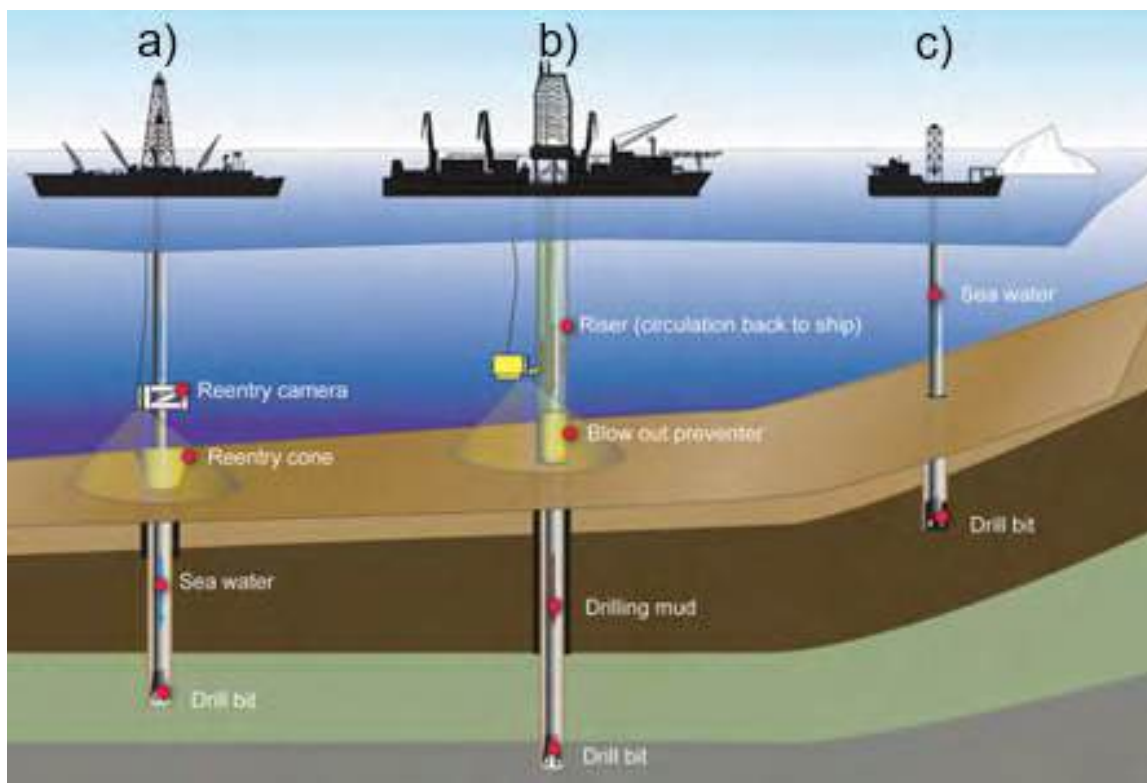
Óceánfúrási program (Ocean Drilling Program, ODP) (1983–2003)

Az Óceánfúrási Program közvetlen utódja a Mélytengeri Fúrási Projektnek, azonban egy célirányosabb és szervezettebb program volt. A programot vezető intézmények az óceánfúrási technológia korszerűsítését és a kutatások bővítését határozták meg. A program finanszírozásának kétharmadát az USA Nemzeti Tudományos Alapítványa, míg egyharmadát a 22 nemzetközi együttműködő feleket összefogó JOIDES biztosította. A fúrási műveleteket a Texas A&M Egyetem (College Station, Texas), a magfúrásokat pedig Columbia Egyetem Lamont-Doherty Földmegfigyelő Intézete (New York) végezte. A program fő feladata volt, hogy alapkutatást végezzen az óceáni medencék történetéről, az óceánfenék alatti földkéreg általános természetéről, az ősi élet eredetéről, a geoveszélyek jelentette kockázatokról, a tektonikus lemezekről és mozgásukról. 111 helyszínen végeztek fúrásokat és magvételt, úgymint az Atlanti-óceán északi részén (beleértve a Norvég-ten-



13. ábra. A JOIDES Resolution kutató fúróhajó

gert, a Labrador-tengert és a Baffin-öblöt), a Földközi-tengeren, a Csendes-óceán keleti részén, a Galápagos-szigeteken, Peru partjainál, a Weddel-tengerben, az Atlanti-óceán déli részén található szubantarktiszi régiókban és az Indiai-óceán egyes területein. Továbbá vizsgálták a Föld mágneses mezejét, a tengerfenéken felhalmozódott gázhidrátokat, a hidrotermális kúrtöket és különböző biológia folyamatokat, elsősorban baktériumpopulációkat.



14. ábra. Fúróhajótípusok: a) felszállócsöves; b) felszállócső nélküli; c) kúrtétesspecifikus (felszálló cső nélküli)

Ebben a programban a *Glomar Challenger* fúróhajót felváltotta a *JOIDES Resolution* kutató fúróhajó (13. ábra). A hajót Az Overseas Drilling Ltd. megrendelésére a Halifax Hajógyár (Új-Skócia, Kanada) készítette. Először 1978-ban bocsátották vízre *Sedco/BP 471* néven, egy szénhidrogénfúró hajóként. Hat évvel később, 1984-ben alakították át tudományos célra és 1985. januárjában az ODP fő kutatóhajójaként kezdett el szolgálni. A *JOIDES Resolution* 2007–2008 év folyamán korszerűsítették, és 2009. februárjában állították ismét aktív szolgálatba laboratóriumi létesítményeinek és szállásrészlegének átfogó felújítását követően. A fúró-kutatóhajó hossza 143,4 méter, szélessége 21,3 méter, fúrótorony magassága 62 méter, vízkiszorítása 10 282 tonna, merülése 6,6 méter, sebessége 21 kilométer/óra volt, 125 fő tartózkodott a fedélzeten (60 fő legénység és 65 kutató) és 75 napig tudott egyfolytában a tengeren tartózkodni. A fúrótorony előtti jobb oldalon volt a hétszintes kutató épület különálló laboratóriumokkal, amelyekben a legkorszerűbb berendezésekkel vizsgálták az üledékek és kőzetek fizikai tulajdonságait, mágnesességét és ősmaradvány tartalmát. Jól felszerelt laboratóriumok álltak rendelkezésre a szervetlen és szerves kémiai elemzésekhez, továbbá különböző röntgenvizsgálatokhoz. A tudományos feladatokat fotólaboratórium, elektronikai javítóműhely, analóg és digitális geofizikai adatbázis, globális helymeghatározó navigációs rendszer, központi számítógépes szerver 50 számítógéppel és kiváló referencia-könyvtár támogatta. A dinamikus helypozicionáló rendszerre képes volt a hajót helyben tartani a hosszú, rövid és ultrarövid hullámhosszon üzemelő vezérléssel. A rendszert 12 db 800 LE-s (596 kW) behúzzható hajtómű, valamint két fő hajócsavar alkotta, amelyeket egyenként 6 db 750 LE-s (559 kW) motor hajtott. A helyben tartó rendszernek a hajót a tengerszint $\pm 2\%$ -án kellett tartania 85 kilométer/óra szélesebségnél, 110 kilométer/óra széllekedéseknél, 4,5 méter

2. táblázat. Az ODP fúrásai eredményei

Expedíciók száma	111
Kutatott helyszínek száma	669
Összesen megtett út	659 306 km
Műveleti napok száma	6591
Fúrt kutak száma	1797
Legmélyebb fúrás a tengerfenékre	2111 m
Legkisebb vízmélység	37,5 m
Legnagyobb vízmélység	5980 m
Magfúrások száma	35 772
Teljes magfúrás hossz	321 000 m
Teljes magnyereség	222 704 m
Teljes magnyereség	69,40%

átlagos és 7,2 méter maximális hullámmagasságnál, valamint 4,6 kilométer/óra felszíni áramlatoknál.

A magvétel itt módosított hidraulikus dugattyús magvevővel végezték. A módosítást azért kellett elvégezni, mert az előző projektben azt tapasztalták, hogy a keményebb üledék vagy kőzet esetén a magcsövet nem tudták teljes hosszában benyomni a rétegbe. Ezért a magcső hosszát megfelezték (4,75 méter) és megnövelték a nyomóerőt. A programban elért fúrásai eredményeket a 2. táblázat szemlélteti.

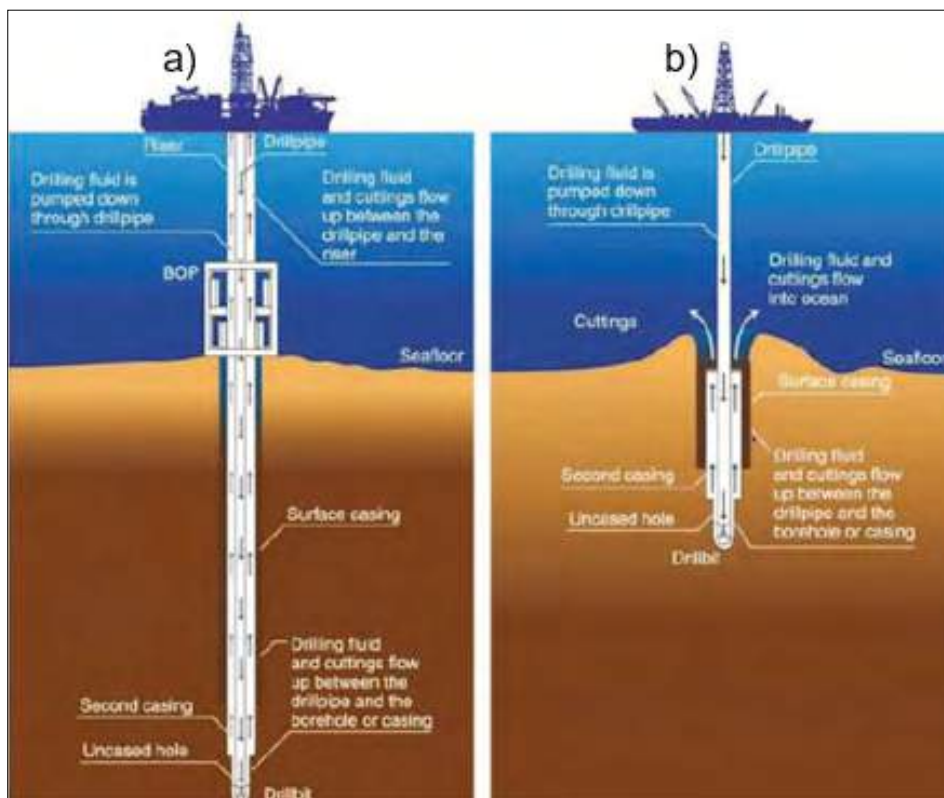
Integrált óceánfúrásai program (Integrated Ocean Drilling Program, IODP1) (2003–2013)

Az Integrált Óceánfúrásai Program a DSDP és az ODP nemzetközi együttműködéseire és tudományos sikereire épített, több tengeri fúróhajót használt, amelyet 26 részt vevő állam finanszírozott. Ez a program abban különbözött az előzőektől, hogy többféle fúrásai technológiát, fúróhajót, tudományos és egyéb közreműködő szervezetet alkalmazott az üledék- és kőzetminták gyűjtésére, valamint a tengerfenékre telepített monitoring műszerek telepítésére. Több száz nemzetközi föld- és óceántudós vett részt önkéntes alapon az IODP 1-ben. A részvétel sokféle formát öltött: fúrásai javaslat benyújtása, 54 expedícióban való részvétel, tanácsadói részvétel, tervezési workshopokon vagy tematikus szimpóziumokon való részvétel. A program központi irányító irodája, az IODP Management International, amely integrált munkatervet koordinált az összes IODP szervezeti partner között. Minden pénzügyi évben éves programtervet készítettek, amely tartalmazta a fúróhajók üzemeltetéséhez szükséges célokat és feladatokat, a tudományos koordinációtól a publikációkig, az adatkezelésig és az ismeretterjesztésig.

Az IODP1 10 éves munkája során a következőket kutatta és vizsgálta meg:

- ❑ a mélytengeri bioszféra és a tengerfenék alatti élővilág;
- ❑ a mozgó kontinensek peremén lévő földrengéskeltő zónák;
- ❑ a tengerfenéken lévő gázhidrátok;
- ❑ az éghajlattan történet, a szélsőséges éghajlatok és a gyors klímaváltozások;
- ❑ a kontinensek szétválásának szerepe a mély üledékes medencék kialakulásában;
- ❑ a vulkáni hasadékok és óceáni fennsíkok kialakulása.

A kitűzött célok eléréséhez három fajta fúróhajót használtak: felszálló cső nélküli (*JOIDES Resolution*), felszálló csöves (*Chikju*) és feladatorientált kisebb méretű fúróhajók (felszálló cső nélküliek). Mi a különbség a felszállócső nélküli és felszállócsöves technológia között? A felszállócső nélküli technoló-



15. ábra. Öblítési technológia: a) felszálló csőves; b) felszálló cső nélkül

gíanál a fúrószár szabadon van a vízben, egy bevezető kamera és egy bevezető tölcser segíti a fúrószerszámot a kezdő bélésűcsőbe újból beletalálni, a fúrási öblítőfolyadék nem jön vissza a felszínre, az a furadékkal együtt a tengerfenéken marad. A felszállócsőves technológiánál a kezdő bélésűcsőben lévő csőfejen kitörésgátló helyezkedik el, a kitörésgátlótól a felszínig felszálló cső van, ezen a zárt rendszeren keresztül a fúrási öblítőfolyadék a felszínig cirkulál, amelyet

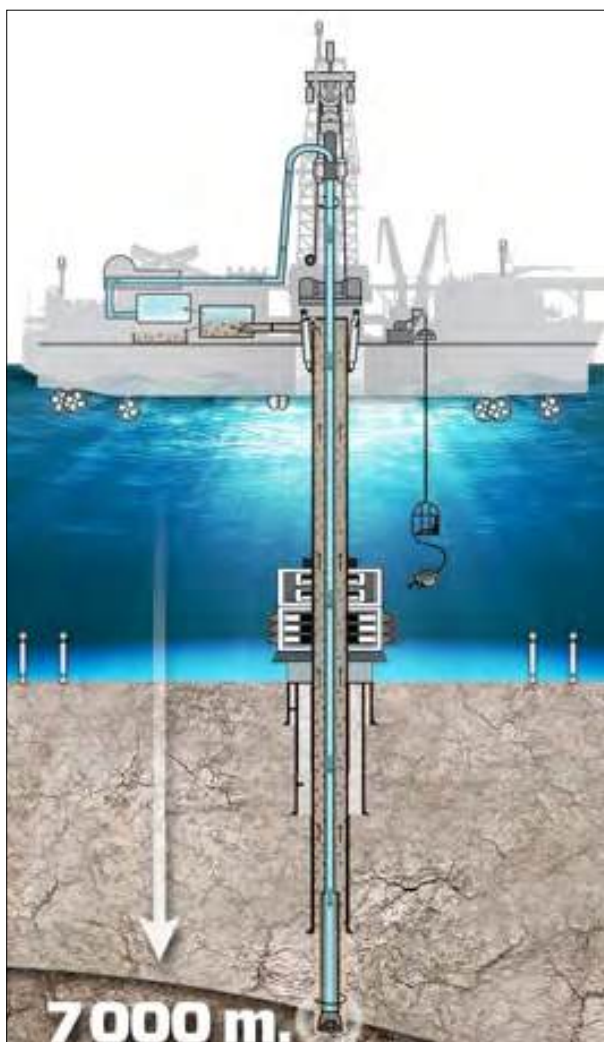
megtisztítják a furadéktól és újból felhasználják, illetve a fúrószárat is ebben a zárt felszálló csőben építik be- és ki (15. ábra) [5].

A JOIDES *Resolution* kutató fúróhajó tovább dolgozott ebben a programban, azonban közben elkészült a *Chikyu* japán tudományos fúróhajó, amelyet kizárólagosan az IODP1 számára építettek (16. ábra). Ezt a fúróhajót a Mitsui Engineering & Shipbuilding építette Nagaszakiban, a Mitsubishi Heavy Industries szerelte fel, és 2005. július 29-én bocsátották vízre.

A hajótest 210 méter hosszú, 38 méter széles, 16,2 méter magas, vízkiszorítása 57 000 tonna, merülése 9,2 méter, utazósebessége 22 kilométer/óra. A hajó közepén helyezték el a fúróberendezést, amelynek 121 méter magas a fúrótornya van, és emelőkapacitása 1000 tonna. Hatótávolsága 27 400 kilométer, a 21 hüvelykes (533,4 mm) felszállócsővel és kitörésgátlóval 2500 méter tenger mélységig tud dolgozni, fúrási mélység kapacitása a tengerszinttől 7000 méter (17., 18. ábra).



16. ábra. A Chikyu tudományos fúróhajó



17. ábra. A Chikyu fúrési rendszere

Egyszerre 200 fő tartózkodhat a fedélzeten, ebből a hajó és a fúróberendezés legénysége 150 fő és 50 fő tudományos személyzet tud dolgozni a különböző laboratóriumokban. A személyzetcsereket helikopter-szállítással oldják meg, a helikopter-leszállóhely akkora, hogy 30 személy szállítására alkalmas helikoptereket is tud fogadni. A legfontosabb újítások közé tartozik a GPS-rendszer (GPS, Global Posi-



18. ábra. Kitörésgátló szerelvény a felszálló csővel

tioning System = Globális műholdas helymeghatározó rendszer) és a hat állítható (3,8 méter átmérőjű), számítógéppel vezérelt helyben tartó hajtómű, amelyek lehetővé teszik a fúróhajó pontos helyben tartását és a stabilizálását a mélyvízi fúrások során. A felszálló cső nélküli kisebb feladatorientált fúróhajókat az északi-sarkvidéki, a tahiti, az ausztráliai és az észak-amerikai sekély magvételi expedíciókhoz használták. A Chikyu tudományos fúróhajót 2011. március 11-én a tōhokui földrengés és az azt követő szökőár megrongálta. A hajót a jokohamai dokkban a Mitsubishi Heavy Industries javította meg, és 2011. júniusában állt vissza szolgálatba. A programban elért fúrési eredményeket a 3. táblázat szemlélteti.

3. táblázat. Az IODPI fúrési eredményei

	JOIDES	Chikyu	Kisebb	Összesen
	Resolution		fúróhajók	
Expedíciók száma	35	14	5	54
Kutatott helyszínek száma	145	38	67	250
Fúrt kutak száma	439	95	115	649
Legmélyebb fúrás a tengerfenékre (m)	1928	3059	755	3059
Legkisebb vízmélység (m)	84,2	885	23	23
Legnagyobb vízmélység (m)	5697	6929	1288	6929
Magfúrások száma	8491	927	2676	12 094
Teljes magnyereség (m)	57 289	4886	4131	66 306

Nemzetközi óceánfelfedező program (International Ocean Discovery Program, IODP2) (2013–2024)

Az IODP1 partnerei folytatták együttműködésüket a Nemzetközi Óceánfelfedező Program (IODP2) keretében 2013. októbere és 2024. szeptembere között. A tudományos kutatás 10 éves időszakot ölelt fel, amelyet négy témakörbe szerveztek:

- ❑ a klíma és az óceánok változásai;
- ❑ a bioszféra határai;
- ❑ a Föld összefüggései;
- ❑ a Föld mozgásai.

A kutatási tervet a Földdel foglalkozó nemzetközi tudományos szervezetek közösen dolgozták ki. Az IODP2 továbbra is több fúróhajót (*JOIDES Resolution*, *Chikyu* és *feladatorientált kisebb méretű fúróhajók*) használt a kutatóexpedíciók során. Ezeket az expedíciókat az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Alapítvány (NSF), a japán Oktatási, Kulturális, Sport, Tudományos és Technológiai Minisztérium (MEXT), az Európai Óceánfelfedező Fúrási Konzorcium (ECORD), a Kínai Népköztársaság Tudományos és Technológiai Minisztérium (MOST), az Ausztrál – Új-Zélandi IODP Konzorcium (ANZIC) és az indiai Földtudományi Minisztérium (MOES) finanszírozta. Ezek a szervezetek együttesen több mint két tucat ország koalícióját képviselték. Az IODP2 finanszírozási modellje abban különbözik az IODP1-től, hogy az NSF, a MEXT és az ECORD mindegyike saját fúróhajót üzemeltetett. A többi nemzetközi partner közvetlenül hozzájárult a fúróhajók üzemeltetési költségeihez, az expedíciókon való tudományos és tanácsadó testületekben való részvételért. A *JOIDES Resolution* kutatóhajót az NSF számára a Texas A&M Egyetemen (TAMU) működő JOIDES Resolution Tudományos Irányító (JRSO) üzemeltette. A *Chikyu* fúróhajót a MEXT számára a japán Tenger-Föld Kutatási és Mérnöki Intézet (MarE3), a *feladatorientált kisebb méretű fúróhajókat* pedig az ECORD Tudományos Irányító (ESO) üzemeltette.

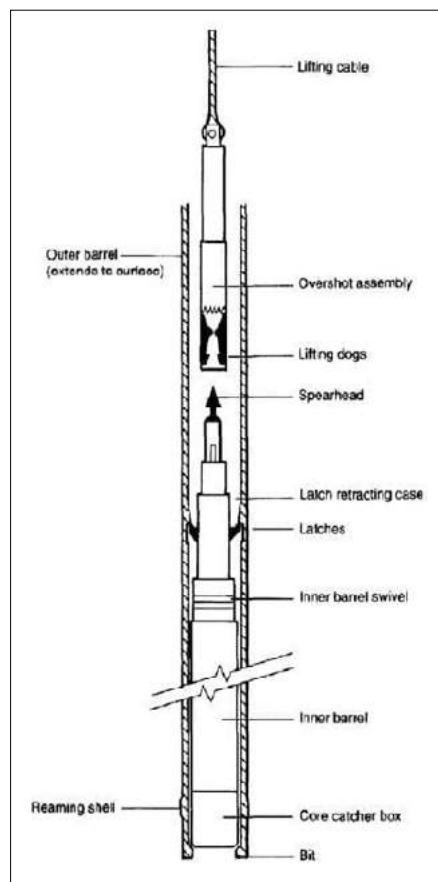
Időközben elkészítették az IODP emblémáját (logóját) is, amelyet minden hivatalos iraton és közleményen használnak (19. ábra).

Az IODP-expedíciók a földtudományi témák széles skáláját vizsgálták, úgymint a múltbeli éghajlati és óceáni viszonyok, a monszunrendszerek, a szeiz-

mikus (földrengést kiváltó) események, a kontinentális kéreg és az óceáni medencék kialakulása, a főbb kihalási események, a kőzetátalakulás szerepe a hidrotermális rendszerek működésében és az élet határai a mély bioszférában. Kiemelkedő eredmény volt, hogy Indiai-gerinc délnyugati részén, ahol a földkéregbe 790 méternyi fúrást végeztek. Mintát vettek a Yucatán-félsziget közelében a tengerben eltemetett Chicxulub becsapódási kráter körül kialakult földgyűrűből. Ez a kráter akkor keletkezett, amikor egy aszteroida 66 millió évvel ezelőtt becsapódott a bolygónkba, elpusztítva a nem madárszerű dinoszauruszokat és a bolygónk életének nagy részét. A gyűjtött minták és az adatok elemzése azt mutatta, hogy az aszteroida becsapódása a Föld mélyéből származó kőzetekből pillanatok alatt hozta létre a földgyűrű magas hegyeit. A földgyűrű feletti üledékek arról is tanúskodtak, hogyan tért vissza az élet a tömeges kihalási esemény után. A tengerfenékre telepített műszerekkel és magmintákon végzett vizsgálatokkal betekintést nyertek a Föld éghajlatába és a szerkezeti mozgások történetébe is. A világ minden tájáról gyűjtött minták vizsgálata megállapította, hogy a széndioxid kibocsátás mértéke ma tízszer nagyobb, mint a paleocén – miocén földtörténet kori hőmérsékleti csúcs idején vagy az elmúlt 66 millió év bármely időszakában.



19. ábra. Az IODP emblémája



20. ábra. Gyorsmagszedő

4. táblázat. Az IODP2 fúrási eredményei

	JOIDES	Chikyu	Kisebb	Összesen
	Resolution		fűrőhajók	
Expedíciók száma	46	5	5	58
Kutatott helyszínek száma	220	8	43	271
Fúrt kutak száma	599	34	115	748
Legmélyebb fúrás a tengerfenékre (m)	1806	1180	1335	1806
Legkisebb vízmélység (m)	87	1939	20	20
Legnagyobb vízmélység (m)	6929	8023	5012	8023
Magfúrások száma	16 226	375	1453	18 054
Teljes magnyereség (m)	93 294	1820	3801	98 915

A magvételhez a hidraulikus dugattyús magvétel mellett bevezették a szénhidrogén-bányászatban már régóta használt gyorsmagszedő (folyamatos/dróthuzalos magfűrő) alkalmazását is (20. ábra) [6]. A dróthuzalos magfűrő egy olyan magfűrési módszer, amely folyamatos üledék- vagy kőzetmintákat vesz nagy mélységekből anélkül, hogy minden egyes mintavétel után ki kellene építeni a teljes fűrőszárat. A gyorsmagszedő egy kettőscsőű magfűrő készülék, amelynek külső köpenycsőve a magfűrővel a fűrőszár végén helyezkedik el, és abba a fűrőszáron át drótkötéllel lebocsátható, és kiemelhető belső magcsővel, ebbe csúszik bele a megfúrt mag. Miután a magot megfúrták, dróthuzallal kihúzzák a belső magcsövet a maggal együtt, amelyet a felszínen kiszednek. Amennyiben folytatják a magfűrést, az üres belső csövet ismét lebocsátják dróthuzallal a külső köpenycsőbe, és megfújják a magot. Ezt a folyamatot addig ismétlik, amíg a magvétel szükséges. Amennyiben úgy döntenek, hogy további teljes szelvényű előfúrás szükséges, akkor a dróthuzallal egy belső fűrőt engednek le, azt rögzítik a köpenycsőben, és már is indulhat a teljes szelvényű fúrás. Amikor eléri a következő magfűrési mélységét, a belső fűrőt dróthuzallal kihúzzák, a belső magcsövet leengedik, és máris kezdődhet az újabb magfűrés. A programban elért fúrési eredményeket a 4. táblázat szemlélteti.

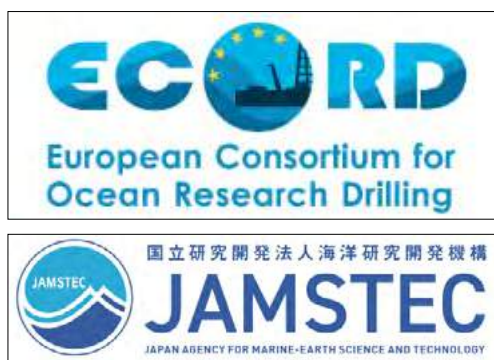
Az NSF 2023 márciusában bejelentette, hogy a növekvő üzemeltetési költségek miatt leállítja a

JOIDES Resolution finanszírozását. A fűrőhajó 2024 júniusában indult utolsó expedíciójára, és a küldetését befejezve 2024. augusztus 2-án Amszterdamban kötött ki. Az NSF és a fűrőhajó tulajdonosa közötti szerződés 2024. szeptember 30-án lejárt, amelyet nem újítottak meg, így JOIDES Resolution az amszterdami kikötőben várja további sorsát.

Nemzetközi óceánfűrési program (International Ocean Drilling Program, IODP3) (2025–2050)

Az IODP2 2024. év végén befejeződött, és közben két évig tartó kemény tárgyalássorozat után az Európai Óceánfelfedező Fűrési Konzorcium (ECORD) és a Japán Tenger-Föld Tudományos és Technológiai Ügynökség (JAMSTEC) (21. ábra) – akik egyedül támogatták a nemzetközi program folytatását – 2024. szeptember 30-án bejelentették, hogy megállapodtak egy közös tudományos óceánfűrési program, az IODP3 (22. ábra) létrehozásában, amely 2025. január 1-jével indul.

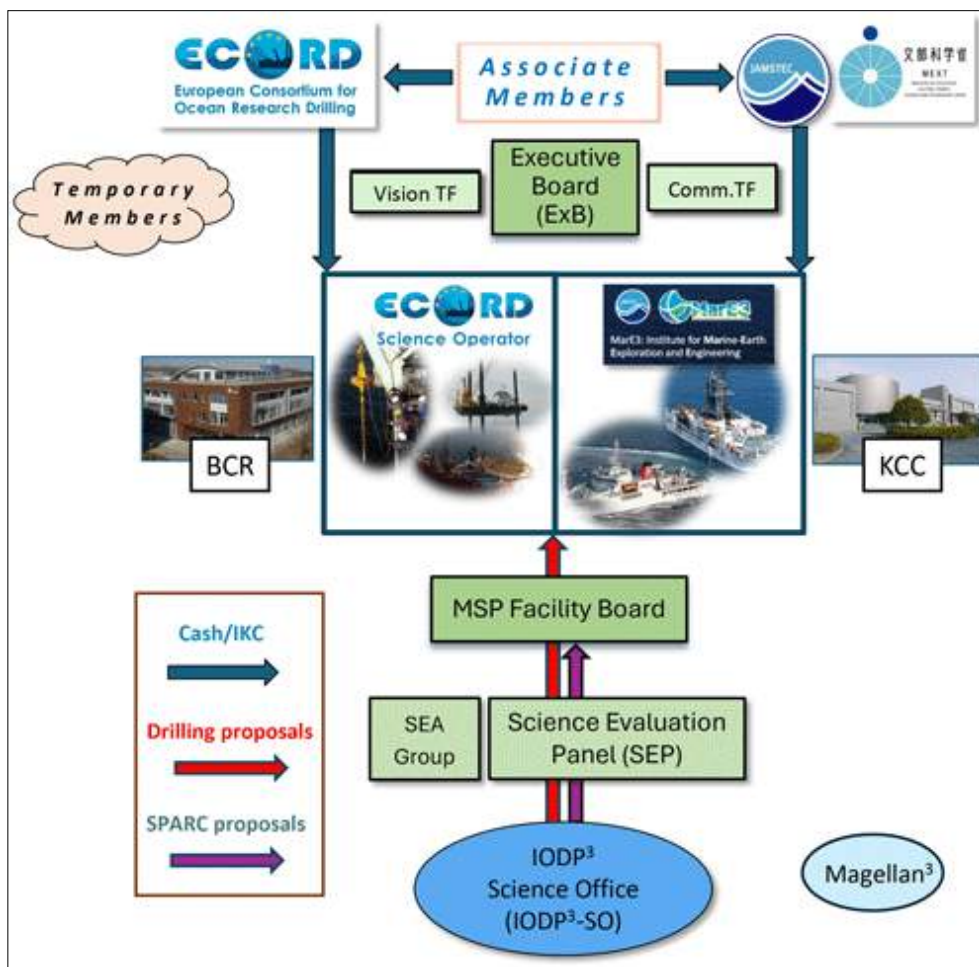
Az IODP3 egy olyan nemzetközi tengerkutatói együttműködés, amely óceánjáró kutató- és fűrőhajók segítségével vizsgálja a Föld történetét és dinamikáját, hogy adatokat szerezzen a tengerfenék üledékeiből és kőzeteiből, továbbá megfigyelje a tengerfenék alatti környezetet. Az ECORD és JAMSTEC által finanszírozott létesítményekre támaszkodik, további partnerek pénzügyi hozzájárulásával. Ezek a partnerek együttesen 17 államot képviselnek, amelyek tudósait a program világóceánokban folytatott kutatóexpedíciókhoz, valamint az óceánfűrési archívumok feldolgozásához választják ki [7].



21. ábra. Az ECORD és JAMSTEC



22. ábra. Az IODP3



23. ábra. Az IODC3 szervezeti felépítése és működése

Az IODP3 irányító testületei az ECORD és a JAMSTEC. A programban részt vevő nemzetközi kutatói közösségek a javasolt tengeri expedíciókat és az óceánfúrási archívumok (SPARC) feldolgozásának javaslatát a Küldetés-specifikus Testületen (MSP) keresztül a Tudományos Irodához (IODP3-SO) nyújtják be. A Tudományos Értékelő Testület (SEP) az összes benyújtott javaslatot nyíltan és átlátható módon értékeli, sorrendbe állítja. A SEP-et a versenyfelhívások útján kiválasztott nemzetközi szakértők alkotják. A Biztonsági és Környezetvédelmi Csoport (SEA) tanácsadó testületként működik, és a tengeri fúróhajókat üzemeltetők számára tanácsokat ad a fúrási helyek általános és sajátos földtani környezetével kapcsolatban felmerülő biztonsági és környezeti kérdésekkel kapcsolatban. A SEP-et és a SEA-t logisztikai támogatással látja el az IODP3-SO, és azok fogják kiszolgálni a program végrehajtási folyamata során alkalmazott fúróhajókat is. A fúróexpedíciókat és az archívumok feldolgozását az MSP Létesítmény Bizottság (MSP FB) ütemezi be azok tudományos fontossága és a rendelkezésre álló erőforrások alapján. A Végrehajtó Bizottság (ExB) felelős a hatékony döntéshozatal biztosításáért és a program felügyeletéért. A Magellan3 (Magellan3) műhelyek célja, hogy

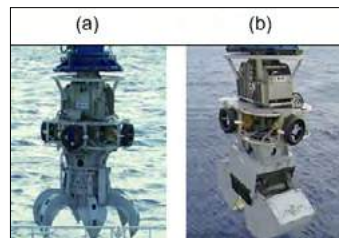
támogassák a programban dolgozó szakemberek és tudósok új és innovatív tudományos javaslatok kidolgozásában, amelyek elősegítik a célkitűzések megvalósítását. Az ExB tevékenységét további két munkacsoport is támogatja: a Vízión Munkacsoport (Vision TF), amelynek feladata a hosszú távú tudományos és finanszírozási stratégia kialakítása és a Kommunikációs Munkacsoport (Comm. TF), amely a program egészére kiterjedő kommunikációs tevékenységért felelős (23. ábra).

Az expedíciók időtartama rugalmas, amelyeket a tudományos igények és a rendelkezésre álló anyagi források határozzák meg. A program magában foglalja a németországi (Bremen) és a japán (Koch) központi adat- és magtárak által nyújtott szolgáltatásokat is.

A program indulásakor a japánok két kutató-fúróhajót biztosítottak, az egyik az előzőekben már ismertetett *Chikyu*, a másik pedig a *Kaimei*. A *Kaimei* kutató-fúróhajót a Mitsubishi Heavy Industries építette a JAMSTEC számára és 2016. március 30-án bocsátották vízre. A hajótest 100,5 méter hosszú, 20,5 méter széles, 6 méter magas, vízkiszorítása 5 747 tonna, merülése 9 méter, utazósebessége 41 kilométer/óra, hatótávolsága 1668 km, hajtás 2×2400 kW villanymotor, 2 db számítógéppel vezérelt helyben tartó hajtóművel



24. ábra. A Kamei kutató-fűrőhajó



25. ábra. Tengerfenék-mintavevő: (a) hatujjas kosár; (b) kagylólóhéj alakú vödör



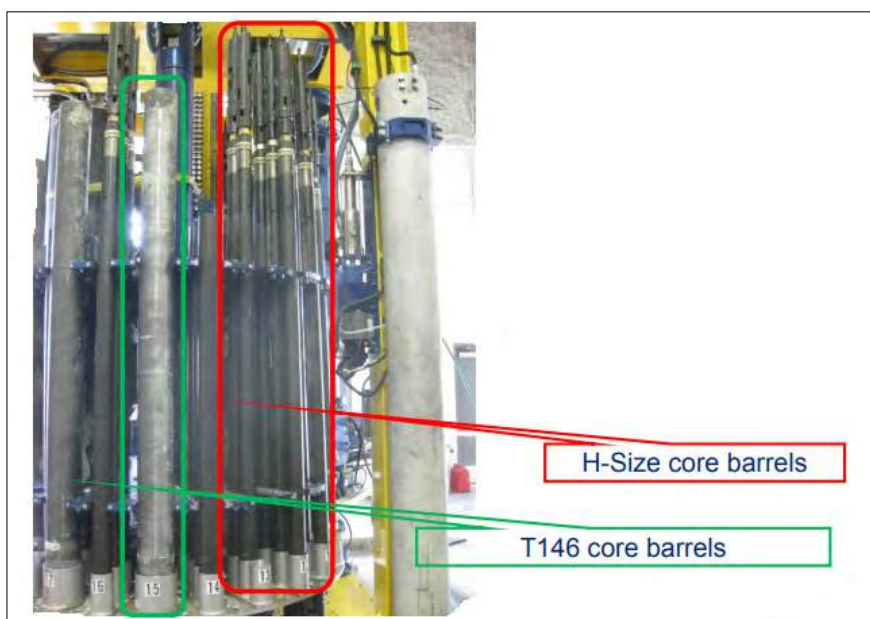
26. ábra. Hidraulikusan működő magvevő készülék



27. ábra. Távirányítású tenger-alatti jármű



28. ábra. Magfűrőrobot



29. ábra. A magfűrőrobot magcsövei

rendelkezik, elhelyezés 65 fő (27 fő hajólegénység és 38 fő kutató) (24. ábra) [8].

Tudományos-műszaki felszereltsége:

□ Három laboratórium:

1. laboratórium: akusztikus berendezések és meteorológiai eszközök, megfigyelő rendszer
2. felszáraz laboratórium: mintafeldolgozás és elemzés
3. nedves laboratórium: mintafeldolgozás és elemzés

□ Kétdimenziós (2D) szeizmikus mérő: egy db műszer 12 000 m méter hosszú mérőkábelrel

□ Háromdimenziós (3D) szeizmikus mérő: négy db műszer, egyenként 3000 m hosszú mérőkábelrel

□ Nagy felbontású háromdimenziós (3D) szeizmikus mérő: 20 db műszer, egyenként 300 m hosszú mérőkábelrel

□ Tengerfenék mintavevő: maximális vízmélység 6000 m, maximális térfogat 1 m³, az egyik hatujjas kosár, a másik kagylóhéj alakú vödör (25. ábra)

□ Tengervíz mintavevő: 12 000 m hosszú drótkötél, 36 palack, egyenként 12 liter térfogatú

□ Hidraulikusan működő magvevő készülék: 12 000 m hosszú drótkötél, magvevő hossza 40 m és átmérője 110 mm (26. ábra)

□ Távirányítású tengeralatti jármű: maximális vízmélység 3000 m, felszerelve kamerákkal, biológiai és kőzetminta gyűjtővel (27. ábra)

□ Magfúrórobot (BMS) (28. ábra):

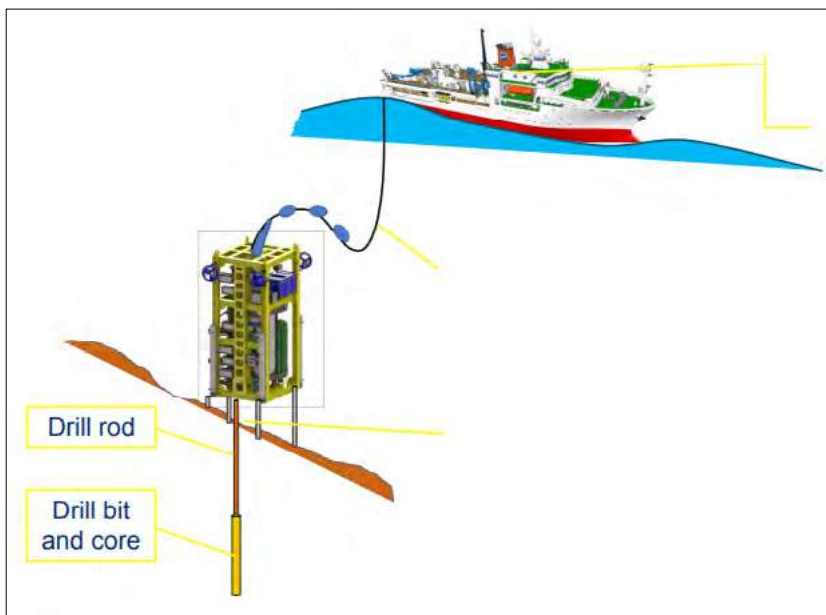
Méretei: 3,2 m × 2,4 m × 5,6 m

Tömege: levegőben 13 tonna, vízben 10 tonna

Maximális vízmélység 3000 m

Magcsövek (29. ábra):

- T146 magcső: átmérő 120 mm, hossz 1,5 m, mennyiség 5 db
- H-méretű magcső: átmérő 63 mm, hossz 1,5 m, mennyiség 40 db
- Nagyátmérőjű magcső: átmérő 450 mm, hossz 1,5 m, mennyiség 2 db



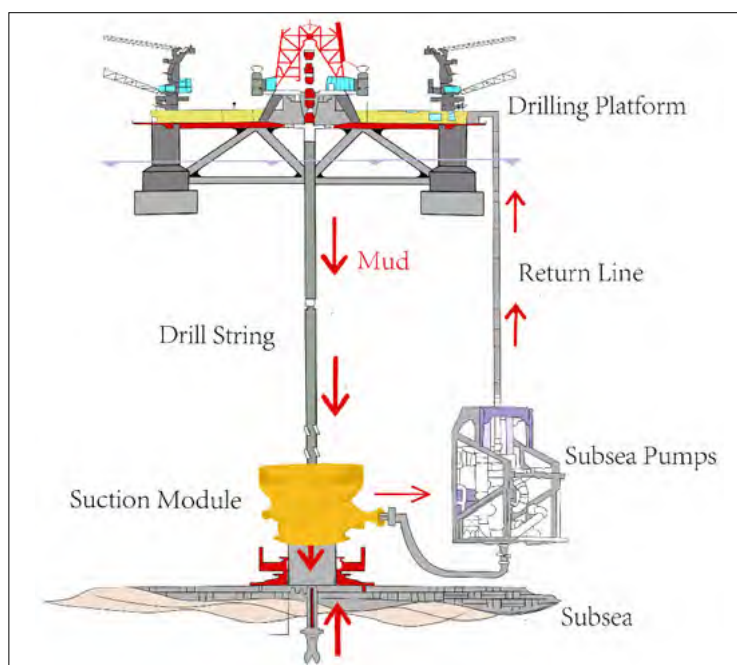
30. ábra. A magfúrórobot működése



31. ábra. A Meng Hsziang mélytengeri kutató-fúróhajó

A magfúrórobotot a Cellula Robotics Ltd. (Kanada, Burnaby) tervezte és gyártotta, és ezen a kutató-fúróhajón alkalmazták először. A magfúrógépet drótkötélrel és elektromos kábelrel építik be a tengerfenékre. Miután a gép stabilan felült a talajon, elektromos vezérléssel a magcsöveket egyenként, egymás után 1,5 méter mélyen benyomják az üledékbe. A mintavételek után a gép automatikusan visszahúzza a magcsövet eredeti helyzetébe. A magfúrások befejezése után a magfúrógépet kiépítik, és a magcsövekből kiveszik a magokat (30. ábra).

Közben Kína 2024. november 17-én bejelentette, hogy elkészült és vízre bocsátották az első hazai tervezésű és gyártású mélytengeri fúróhajót, amelynek a tengerszinttől számított maximális fúrási mélysége 11 000 méter (31. ábra).



32. ábra. Felszálló nélküli öblítési technológia

A Kínai Természeti Erőforrások Minisztériuma megrendelésére a Huangpu Wenchong Shipbuilding építette és a Kínai Földtani Szolgálat üzemelteti. Kína legnagyobb tudományos kutatóhajójaként a *Meng Hsziang* (magyarul *Álom*) 179,8 méter hosszú, 32,8 méter széles, merülése 8 méter, vízkiszorítása 42 600 tonna, hatótávolsága 27 800 kilométer, önálló képessége 120 nap és 180 fő tud egy időben tartózkodni a fedélzeten. A hibrid hajtásrendszer olyan akkumulátorokat tartalmaz, amelyek 15%-os energiamegtakarítást biztosítanak. A fúróberendezés hidraulikus emelőkapacitása 907 tonna, négyfajta fúrási technológiával tud dolgozni (felső meghajtás, lyuktalpi meghajtás, felszállócsőves technológia, felszálló nélküli öblítési technológia), három magvételi móddal rendelkezik (hidraulikus dugattyús magvevő, gyorsmagszedő és magfúrórobot). A hajó 9 korszerű laboratóriummal rendelkezik, többek között geológiai, geokémiai, mikrobiológiai, óceántudományi és fúrási technológiai laboratóriummal. Továbbá a hajón automatizált magminta tároló rendszer is van. Úgy tervezték a hajót, hogy ellen tudjon állni a szélsőséges tájfunoknak is, lehetővé téve a biztonságos fúrási műveleteket. A hajó képes kőolaj- és földgázkutató/feltárási fúrások mélyítésére, tengerfenéki gázhidrát kutatására és próbatermeltetésére, valamint tudományos fúrások elvégzésére is [9].

A felszálló nélküli öblítési technológia aránylag új keletű, a 4000 méternél mélyebb vízmélységeknél használják (32. ábra). A fúrószár szabadon van a vízben, amelyen keresztül nyomják az öblítőiszapot a fúrólyukba. A tengerfenéken lévő fúrólyuk csőfejszerelvényének tetejére szénhidrogénfúrásoknál forgó

kitörésgátlót, földtani fúrásoknál elterelő egységet helyeznek. A fúrólyukból ezek alatt kiáramló öblítőiszapot egy vagy több tengeralatti szivattyú egy vékony flexibilis vezetéken a felszínre nyomja, ezzel biztosítja a folyamatos zárt öblítőkört [10].

A Kínai Természeti Erőforrások Minisztériuma megkezdte a tárgyalásokat az IODP3 Végrehajtó Bizottságával arról, hogy mikor és milyen feltételekkel biztosítaná a *Meng Hsziang* kutató- és fúróhajót a program megvalósításához.

Befejezés

A fent ismertetett programok együttesen a leghosszabb ideje futó és legsikeresebb földtudományi együttműködést képviselik. A világ földtudománnyal foglalkozó szakemberei nagy várakozással figyelik az IODP3 eredményeit, különös tekintettel arra, hogy ki és mikor éri el a Mohorovičić-felületet (a Mohot) és hoz fel belőle magmintát.

Irodalom

- [1] Exploring the Earth Under the Sea. <https://www.iodp.org>, 2025
- [2] Introducing Piston Coring – Scientific Ocean Drilling. Penn State Pressbook, 2025. <https://psu.pb.unizin.org/sciod/chapter/giant-piston-coring/>
- [3] Dr. Alliquander Ödön: A „Mohole”, a földkéreg át-fúrásának terve. Földtani Kutatás 10(2), (1967) 60–66. https://epa.oszk.hu/02700/02732/00058/pdf/EPA02732_foldtani_kutatas_10_2_60-66.pdf
- [4] M. A. Stoms, W. Nugent, D. H. Cameron: Hydraulic Piston Coring – A New Era in Ocean Research. OTC-4622-MS, May 02, 1983. https://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/digital/tnote_04.pdf
- [5] Riser Drilling vs. Riserless Drilling. JAMSTEC, 2025.
- [6] What is wireline coring system. Massenza Drilling Rigs, 2025.
- [7] Hanno Kinkel: The International Ocean Drilling Programme-3 (IODP3). ECORD, May 19, 2025. <https://www.ecord.org/the-international-ocean-drilling-programme-3-iodp-cubed-will-start-on-january-1st-2025/>
- [8] RV Kaimei: State-Of-The-Art Vessel for All-Round Marine Research. JAMSTEC Home, 2025. https://www.jamstec.go.jp/mare3/e/ships/research_vessel/kaimei.html
- [9] Meng Xiang: Large deep-drilling ship to support China's geological exploration efforts. Baird Maritime, 26 November, 2024. <https://www.bairdmaritime.com/topic/mengxiang>
- [10] What is Riserless Mud Recovery (RMR). AGR Subsea Inc., September 9–11, 2010.

A metallográfia selmeci gyökerei

Megemlékezés dr. Schleicher Aladár professzorról

The roots of metallography in Selmec

Commemoration of Professor Dr. Aladár Schleicher

DR. PILISSY LAJOS[†]

2025. október 25-én Budapesten, a Farkasréti temetőben kísérték utolsó útjára dr. Pilissy Lajos gránit-okleveles kohómérnök kandidátust. Rokonok, barátok, tisztelői, a kohász társadalom képviselői, az Országos Magyar Bányászati és Kohászati egyesület vezetői, megannyi tagja, volt kollégák és ismerősök búcsúztatták el az OMBKE legidősebb, száz esztendő is megért tagját. A ravatal mellett az Egyesület nevében dr. Lengyel Károly okleveles kohómérnök, az OMBKE Alapszabály Bizottság vezetője mondott tisztelegő gyászbeszédet. A BKL utolsó, még nyilvánosságot nem kapott publikációjával emlékezik dr. Pilissy Lajosra.

On October 25, 2025, Dr. Lajos Pilissy, a candidate of metallurgical engineering with a granite diploma, was accompanied to his last journey at the Farkasréti cemetery in Budapest. Relatives, friends, admirers, representatives of the metallurgical society, leaders of the National Hungarian Mining and Metallurgical Association, many members, former colleagues and acquaintances bid farewell to the oldest member of the OMBKE, who had lived for over a hundred years. On behalf of the Association, Dr. Károly Lengyel, a certified metallurgical engineer and head of the OMBKE Statutes Committee, gave a eulogy on behalf of the Association. The BKL remembers Dr. Lajos Pilissy with its last, yet unpublished publication.

Eredetileg csak Schleicher professzorról akartam visszaemlékezéseimet megírni, mert feltehetően én vagyok az egyetlen szakember, aki munkakapcsolatban volt vele az 1950-es években a Magyar Szabványügyi Hivatalban. Ugyanis ő volt a fémöntészeti szabványosítási munkabizottság elnöke, én pedig egyik tagja a 10 fős bizottságnak, jórészt öntőtechnikus volt tanítványaimmal.

Az ülés kezdetekor az MSZH Kohászati Osztályának vezetője megjelent egy idősebb úrral. Bemutatta, hogy ő Schleicher Aladár és professzor úrnak szólítandó. Én az ő nevét akkoriban már hallottam, de személyesen nem ismertem. Mi, a bizottság tagjai összenéztünk: ki ő? Azzal én is tisztában voltam, hogy öntő szakember, és az egyesületben sohasem láttuk.

A professzor úr az ülésen aktív volt, jó megállapításokkal. Az ülés végén nehézkesen húzta fel télikabátját, de ugrottam hozzá, segitettem neki. Közben hozzám fordult: Nem kísérem-e el a Körútig, a villamoshoz. Én készséggel igent mondtam. Ballagás közben nem esett túl sok szó, láthatóan fáradt volt, amit ő megerősített, és köszönetet mondott a segítségért. Ez a kíséretetés rendszeressé vált. Így ismertem meg őt.

Kulcsszavak: tudománytörténet, Schleicher, metallográfia

Originally, I only wanted to write my memoirs about Professor Schleicher, because I am probably the only professional who had a working relationship with him in the 1950s at the Hungarian Standards Office. He was the chairman of the metal casting standardization working committee, and I was one of the 10-member committee members, mostly casting technicians with my students.

At the beginning of the meeting, the head of the Metallurgical Department of the Hungarian State University of Technology appeared with an elderly gentleman. He introduced himself as Aladár Schleicher and Professor. I had heard his name at the time, but I did not know him personally. We, the members of the committee, looked at each other: who was he? I was also aware that he was a casting specialist, and we had never seen him in the association.

The professor was active during the meeting, with good observations. At the end of the meeting, he was struggling to put on his winter coat, but I jumped up and helped him. In the meantime, he turned to me: Would you like me to accompany him to the Boulevard, to the tram? I readily said yes. Not much was said during the graduation, he was obviously tired, which he confirmed, and thanked me for the help. This escorting became regular. That's how I got to know him.

Keywords: history of science, Schleicher, metallography

Schleicher Aladár 1880. július 12-én született Zagyvapálfalván, amely már régóta a megyeszékhelyé vált Salgótarján része. Édesanyja Jávor Paula, apja Schleicher Emil, aki kereskedő volt több környékbeli faluban, sőt pékséget is üzemeltetett. Eszerint családja felmenőitől vagy rokonságától nem kaphatott ösztönzést a kohász szakmára, inkább szülővárosa bányász-kohász közösségétől.

Első felesége Goltz Anna, esküvőjük 1915. március 7-én volt Budapesten, de az asszony 1942. december 12-én elhunyt. Schleicher Aladár betartotta a szokásos kegyeleti időt, majd 1943. november 15-én Budapesten újra megházasodott. Második felesége Fauszt Adél Borbála Ida volt. (Házassági anyakönyvi kivonatukban a professzor születési időpontjára 1881 szerepel, azonban ez az évszám téves.)

A fiatal Schleicher gimnáziumi tanulmányait Salgótarjánban és Léván teljesítette. 1899-ben jeles eredménnyel érettségizett.

Még ez évben felvételt nyert a Selmecbányai Bányászati és Erdészeti Akadémia vaskohómérnöki szakára, de hamarosan átjelentkezett a fémkohómérnöki szakra. 1902-ben indexét záradékolták.

1902–1904 között a kötelező kétéves üzemi gyakorlatát az erdélyi Fernazely Fémkohászati Művekben teljesítette. Ezt követően megkapta fémkohómérnöki oklevelét. Ekkor lépett be a selemci központú Bányászati és Kohászati Egyesületbe (OMBKE), amely a végzett szakembereket társadalmi szinten összefogó szervezet volt.

1904–1906 között az Akadémia fémkohómérnöki tanszékén tanársegédként dolgozott Faller Károly professzor mellett. Sok szakmabeli számára ez karriert jelentett volna, ahogy esetlegesen tanszékről tanszékre kerülve, és az akadémia lépcsőfokait járva eljuthatott az akadémiai professzori csúcsra. Megjegyzem, hogy Schleicher Aladár az általa írt könyvben csak háromszor említi meg futólag volt professzorát, Faller Károlyt. Itteni munkásságáról különben semmilyen anyagot nem sikerült fellelni.

Ő magának más életpályát képzelhetett el, amit megtett útja fényesen igazolt. Ugyanis minden következő fázist nagy gonddal tervezett meg. 1906–1910 között a budapesti Állami Főfémjelző és Fémbeváltó Hivatalban dolgozott, ami az akkori Pénzügyminisztériumhoz tartozott. Ezek az évek számára az inkubációs időt jelentették.

Ez a hivatal mindenkor jó kémiai-analitikai laboratóriummal rendelkezett. Schleicher itt végezhetette el a vegyész doktori védés teljesítéséhez megfelelő laboratóriumi munkálatait. Ezenkívül a tudományegyetem kémiai laboratóriumában is dolgozhatott. 1910-ben a budapesti tudományegyetemen megszerezte a vegyészeti doktorátust.

1911-ben a charlottenburgi műegyetemen metallográfiai tanulmányokat folytatott. Az I. világháborúban (1914–1918) a bécsi tüzérségi arzenál anyagvizsgáló laboratóriumát vezette.

Úttörő könyvét nyilván jó egy éves berlini – charlottenburgi – tartózkodása alatt, feltehetően az éjszakába nyúlóan kezdte írni, de ennek megjelentetésére csak a bécsi tüzérségi arzenálban töltött éve alatt, pontosabban 1917-ben gondolhatott. Nem lehetett könnyű feladat Bécsből a budapesti székhelyű OMBKE-ben megjelentetni. A könyv címlapja a következő volt:

A metallográfia alapfogalmai

Irta dr. Schleicher Aladár okl. kohómérnök

A szöveg között nyomott 102 rajzzal és 4 tábla melléklettel

Budapest

Kiadja az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület,
1917

A könyv fő fejezeteinek tartalomjegyzéke:

Bevezetés	A metallográfia elterjedése A metallográfia helyzete, meghatározása és felosztása
I. fejezet	A metallográfia története
II. fejezet	Az ötvözetek előállítása
III. fejezet	A fémes anyagok megszilárdulásánál és lehűlésénél végbemenő folyamatok
IV. fejezet	Fémes anyagok mikroszkópi vizsgálata
V. fejezet	Fémek és ötvözetek sűrűségének és térfogatának változása. Hő okozta kiterjedés
VI. fejezet	A fémek és ötvözeik kémiai és elektro-kémiai viselkedése
VII. fejezet	Gázok oldékonysága fémekben és ötvözetekben
VIII. fejezet	A fémek és ötvözeik villamosság és hővezető képessége
IX. fejezet	A fémek és ötvözeik mágneses tulajdonságai
X. fejezet	Egyéb fizikai tulajdonságok
XI. fejezet	A fémek és ötvözeik szilárdsági tulajdonságai
XII. fejezet	A metallográfia gyakorlati alkalmazása

A szöveget követi négy fényezett papír oldalon az I.–IV. tábla (mikroszkópi felvételek), vagyis fő művének összterjedelme 169 oldal nyomtatott szöveg és 4 tábla.

A megjelenés példányszáma nem lehetett nagy. Egykoron könyvének megszerzése a budapesti mű-

egyetemi és soproni főiskolai hallgatók számára már a '20-as években is problémát jelentett, ezért művének legtöbb részét a *Bányászati és Kohászati Lapok* 1915, 1916 és 1917-es évfolyamaiban is megjelentette.

Megjegyzem, hogy egész szakmai életem során szerettem volna megszerezni Schleicher Aladár könyvének egy példányát, de ez sohasem sikerült. Végül dr. Dúl Jenő professzor barátom juttatta el hozzám e könyv egy példányát, kölcsönként. Baráti segítségéért ehelyütt is hálás köszönetet mondok.

Évtizedeken keresztül ez a könyv volt az egyetlen magyar nyelvű anyag, amely alapján Schleicher professzor az előadásait tartotta, míg tanítványai ez alapján tanultak és vizsgáztak. A később akadémikussá vált tanítványai, Verő József és Geleji Sándor is nála tanultak. Verő professzor úgy köszönte meg Schleicher Aladár munkásságát, hogy neki ajánlotta az első saját „Általános metallográfia” c. könyvét.

1918-ban Schleicher a Főfémjelző és Fémbevaltó Hivatal vezetőjeként kilépett az állami szolgálatból, és magánmérnöki tanácsadó irodát nyitott.

1919-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen (Műegyetem) a metallográfia tárgyköréből elnyerte a magántanári címet, amelyet az egyetem rendkívüli tanári címre emelt.

1919-ben a Műegyetem vegyészmérnök hallgatóinak kötelező tantárgyként metallográfiát oktatott.

1923–28 között az időközben Selmezbányáról Sopronba menekült Bányászati és Erdészeti Akadémia kohómérnök hallgatóinak két tantárgyat adott elő, metallográfiát és fémtechnológiát, valamint évenkénti ismétlődéssel vizsgáztatott is. Szerződése értelmében ugyancsak ellátta a jövőben Sopronban szervezendő Fémtechnológiai Tanszék szervezését is. Mindezt óriási lelkesedéssel végezte. Amikor már e tanszék létesítésének konkrét lehetősége is látszott, a főiskolai tanács felajánlotta neki a jövőbeli tanszékvezetői állást, azzal a feltétellel, hogy majdan le is kell költöznie Sopronba. Azt azonban Schleicher nem fogadta el, azzal az indokkal, hogy jól működő budapesti magánmérnöki irodáját nem kívánja feladni. Hűségét bizonyítja, hogy hallgatóit továbbra is levizsgáztatta.

De miért hagyta el Schleicher az akadémiát? Azért, mert ebben az időben a felvidéki fémkohók termelése jelentősen lecsökkent, sőt alkalomadtán megszűnt. Erre példaként megemlítem a tajói antimonkohót. Schleicher rövid ideig itt is dolgozott. Viszont a '60-as évek egyik telén – hála nejem beszercebányai hivatali kapcsolatainak – már senki sem tudott arról, hogy itt fél évszázaddal korábban működött egy antimonkohó.

A kimutatás szerint Schleicher végzésekor, kívülre 1904-ben négyen kaptak fémkohómérnöki diplomát. Volt azonban olyan év is, amikor senki sem kapott fémkohászati oklevelet. Ugyanakkor a vaskohászat-

ból diplomázók száma a magyar vaskohóipar növekedésének köszönhetően nőtt. Ezt a tényt Schleicher valószínűleg ismerte, és ez erősítette távozását az akadémiáról. Ezt ma pályaelhagyásnak nevezzük.

1936–1950-ig a Budapesti Műegyetemen a vegyészmérnök-hallgatóknak a metallográfia tantárgyat adta elő.

1952-ben megjelent egy kormányrendelet és ennek nyomán a szaklapokban egy felhívás, hogy azok az egyetemi előadók, akik külön védelem nélkül, eddigi munkásságuk alapján tudományos fokozatot szeretnének kapni, erre vonatkozó pályázatukat adják be. A pályázatokat a Tudományos Akadémia megfelelő szervei elbírálják, és az illetőt írásban értesítik a döntésükről.

Ez alapján több közismert személy megkapta a „műszaki tudományok kandidátusa” fokozatot. Csak megemlítve néhány nevet: Jakóby László, Vécsey Béla, Visnyovszky László stb. Schleicher Aladár az MTA (nagy)doktori fokozatát kapta meg.

Még hátra van Schleicher professzornak az utolsó tervezett szakmai tevékenységének ismertetése, amely nem más, mint a szakmai (kohászati) történetírás. Ebbe a csoportba 14 dolgozata tartozik. Ez a munkássága az, amelyet minden életrajzírója kiemel. Ezzel a fejezettel 1952-ben kezdett foglalkozni, amikor megkapta az Akadémiától az MTA doktori címet. Ennek birtokában az MTA VI. Műszaki Osztály vezetője felkérte az osztály folyóiratainak, nevezetesen a VI. osztály két kiadványának szerkesztésére, ezek a *Műszaki Osztály Közleményei*, valamint ennek az osztálynak idegen nyelven írt publikációja, az *Acta Technica*. Ez azonban nem volt elegendő, mert Geleji akadémikus megbízta az Akadémiai kiadó kiadásában megjelenő „Vaskohászati Enciklopédia” köteteinek szerkesztésével is. Ezzel erősen túlterhelte az idősödő Schleichert, aki ekkor szerkesztőként kénytelen volt beköltözni az akadémiára. Ekkor alakult ki az egyéb osztályok dolgozóival a kapcsolata. Feltehetően a belső indítékaitól függetlenül kezdett el foglalkozni szakmájának hazai történetével.

Ezután egymást követték szakmatörténeti publikációi nagyrészt az akadémiai lapokban, de a *Kohászati Lapok*ban is, és ekkor kezdett publikálni a Kohászati Történeti Bizottságnak (KTB) is. Ennek a testületnek szabályozott formája nem is volt, különböző szakmabelieknek (kohászat történetével foglalkozók, hivatásos történészek, kohómérnökök stb.) szerveződése volt. Korán felmerült egyrészt a szakmai ásatások szükségessége, valamint a hazai, de főleg a külföldi levéltárakban való kutatómunka (Selmezbánya, Kassa, Rozsnyó, Pozsony, Prága, Bécs és általában Ausztria). Mindezekben a helyeken logikai, azaz történeti sorrendben kellett utazni, megszállni stb. Ehhez pénz, inkább sok pénz kellett volna, ami

hol volt, hol nem. Mindehhez a változó emberállomány gyarapodása is. E független testületnek íratlan belső szabályai szerint valamilyen egyesülethez közeledni megengedhetetlen volt, holott a nagyvállalatok az egyesületnek voltak jogi tagjai, ha úgy tesszük, fenntartói. Ez oda vezetett, hogy a KTB-nek fel kellett adni függetlenségét, és becsatlakoznia pl. az OMBKE-be. Erre végül is 1957 decemberében került sor az OMBKE székházában. A munka folytatásához ez volt az egyetlen út, hogy a KTB-nek állandósult pénzügyi ellátmánya legyen. Az egyesületbe való belépéshez szükség volt arra, hogy a bizottságnak szabályozott formában választott testülete legyen, valamint rögzített működési szabályzata. Az ülésen a résztvevők elnöknek megválasztották dr. Schleicher Aladár fémkohómérnököt, míg titkárrá a testület régóta vezetőjét, Kiszely Gyulát, aki még ezen az ülésen ismertette KTB szabályzatát, programját.

Az idős Schleicher professzor lelkesen kapcsolódott be az itteni újszerű munkába, ezek közül számára a legfontosabb volt a kislódi vashámor történetének felkutatása, amit jelez az a tény is, hogy a témáról cikksorozata jelent meg. Több évig dolgozott a selmeci Bányászati Múzeum levéltárában, majd Pozsonyban, sőt Bécsben is a Staatsarchivban, ahol szívélyesen fogadták. Mint mindig, ez a munka is további utakat nyitott meg, mint pl. a Felső-Ausztriai Archív, sőt a schaffhauseni múzeum felkeresését is. Mindenesetre Schleicher professzornak kiváló nyelvbéli adottságai voltak, ugyanis korábban évekig dolgozott a bécsi tüzéségi arzenálban, ahol meg kellett terveznie – mint európai híró metallográfusnak – a metallográfiai, sőt feltehetően mellette a kémiai laboratóriumot is. Az itt készített fotókat hazatérve a miskolci egyetemnek ajándékozta. Életrajzírói kihangsúlyozzák, hogy szakmánk nyugati kapcsolatainak ő volt a kiépítője.

A korsodó professzor kb. 2 év aktív munkája után visszavonult. Szerepét a KTB szervezője, Kiszely Gyula vette át.

Még két tevékenységéről kell megemlékezni, amelyekről csak Verő professzor ír. Mindekkettő az energetikai tanácsadói munkájával függ össze. Az egyik az Óbudai Gázgyár munkájának fejlesztése, ami évekig tartott, a másik a Lisse–Budapest olajvezeték kiépítése, ennek ellenőrzése egészen a szakmai átadásig.

Schleicher Aladár a második világháború alatt és után már nem volt a régi. Elszálltak felette az évek, megöregedett. 1961 egyik napján telefonon egy kérés jutott el hozzá a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetem rektorától, hogy egy meghatározott napon legyen szíves a miskolci rektori tanácssteremben megjelenni. Az esemény Schleicher számára meglepetés volt, mert az egyetem tanácsulése egyhangú határozatot hozott arról, hogy a miskolci egyetem életében, mint az ősi Alma Mater fémkohómérnökét, az MTA

doktorát rendkívülién gazdag szakmai életútjára való tekintettel akarja a tiszteletbeli doktori címmel kitüntetni. Ez a legmagasabb tudományos kitüntetés, amit valamely egyetem adományozhat, és az a kitüntetés, amit a Miskolci Egyetem is adományozhat, általában életmű alapon.

A kitüntetés okmányát dr. Zambó János rektor, akadémikus, tanszékvezető egyetemi tanár adta át, a jelenlévők ovációjától kísérve, a könnyeivel küzdő Schleicher professzornak. Az ünnepi aktust a rektori tanácssteremben fogadás követte. A Miskolci Egyetem életében ez volt az első ilyen kitüntetés átadása.

Schleicher nem sokáig élvezhette ezt a magas elismerést, mert a szerkesztői munkával agyonterhelve éppen a „Vaskohászati Enciklopédia Vas- és Acélöntészet” II. kötetével foglalkozva kiejtette kezéből a tollat, majd egy-két nappal később, 1962. szeptember 28-án, 81 évesen otthonában elhunyt. Az MTA VI. Műszaki Osztályának vezetője ezt követően szinte minden méltatása nélkül, a szerkesztői munkálatok folytatására dr. Terplán Zénó egyetemi tanárt kérte fel.

Ezután az események gyorsan követték egymást. A temetési szertartás a Farkasréti temető ravatalozójában történt.

Viszonylag kevesen jelentek meg, ugyanis a hajdani tanítványainak és munkatársainak jórésze már a túlvilágon volt. A ravatalozó közelében lévő családi sírba hantolták el, az 1-1-231/232. számú sírhelyen. Sírját hamarosan, nyilván az Akadémia javaslatára védetté nyilvánították.



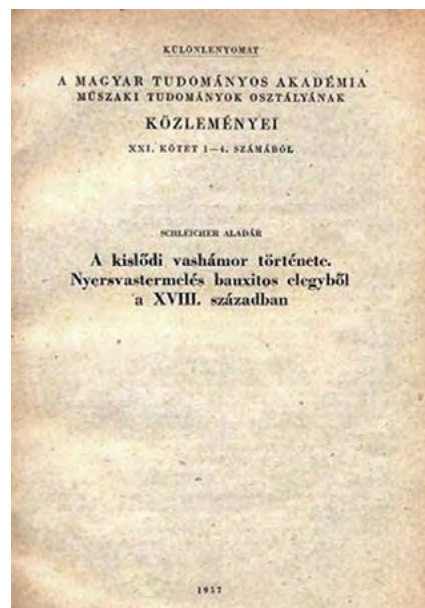
Dr. Schleicher Aladár 1961-ben



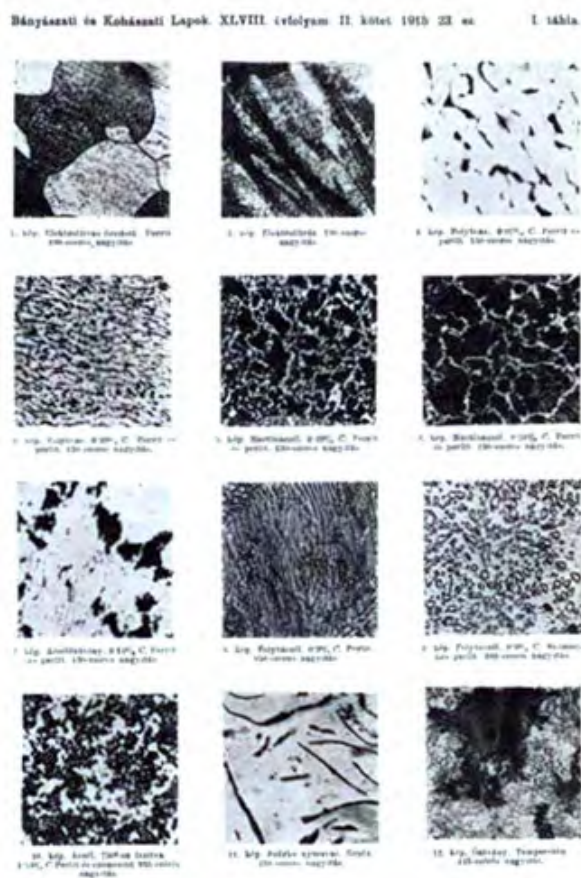
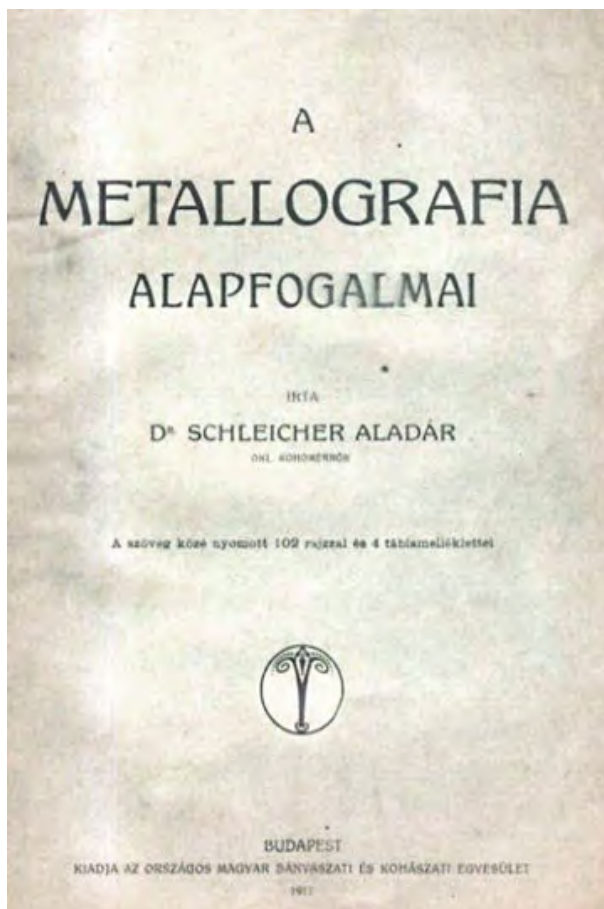
Dr. Schleicher Aladár és Kiszely Gyula, a Kohászati Történeti Bizottság elnöke és titkára

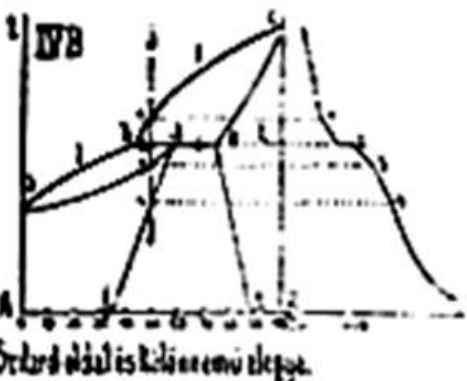
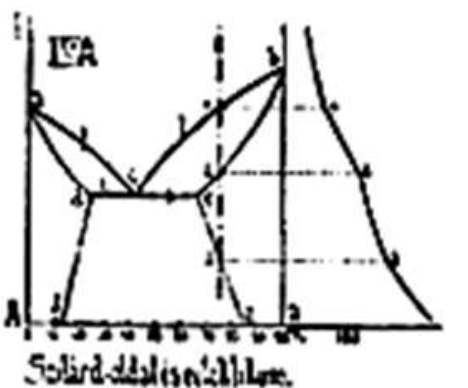
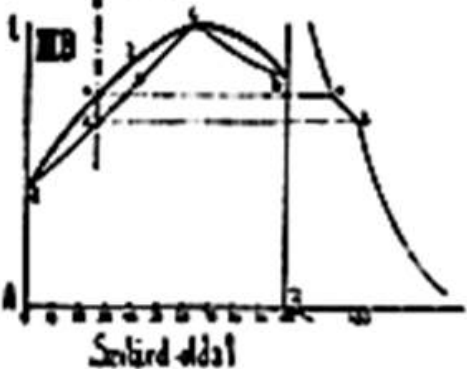
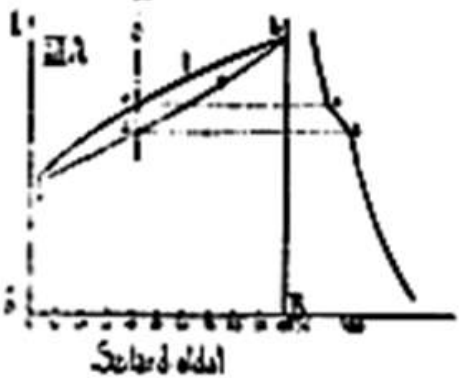
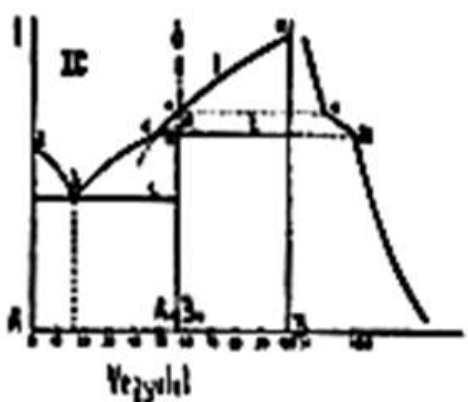
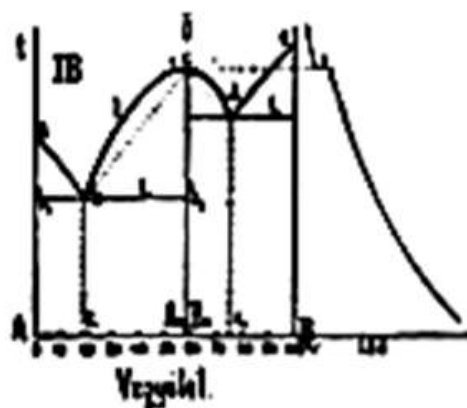
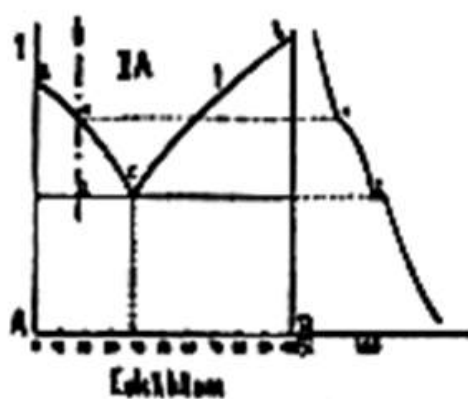
TISZTELETTEL AJÁNLOM KÖNYVEMET
ELSŐ OKTATÓMNAK A METALLOGRAFIÁBAN,
A METALLOGRAFIAI IRODALOM HAZAI ÜTTÖRŐJÉNEK
SCHLEICHER ALADÁRNAK
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORÁNAK

Verő József Schleicher Aladárnak ajánlotta „Általános metallográfia” c. könyvének első kiadását



Részletek „A metallográfia alapjai” c. könyvből (BKL 1915)





10. rajz. Egyenestől (állapotváltozást) diagrammok főalakjai.

csökken a δ eutektikus pont eléréseig. Végül δ , δ , jelöli t_e hőmérsékletet, melyen A és A_{δ} ötvözeiteinek eutektikus kristályosodása véget ér. Hasonló módon taglalhatjuk a másik csoport, vagyis a B tiszta fém és az A_{δ} vegyület ötvözeiteinek diagrammját. E kettő egymással az e eutektikumot alkotja, mely t_e hőmérsékleten kristályosodik. Az IB diagrammot — a mondottak alapján — úgy is tekinthetjük, mint a diagramm ezen két önálló részének egyesítését. Az IA és IB diagramm ezek szerint tehát csupán abban különbözik egymástól, hogy az IB diagrammban az ab és de olvadási görbe közé, — melyek a két elemi alkotórész megszilárdulását tüntetik fel, — a vegyület megszilárdulását feltüntető bcd olvadási görbét kell közébeiktatnunk. A vegyület termikus viselkedése egyébként olyan, mint bármelyik elemi alkotórészé. Ezt a tiszta vegyület lehűlési görbéje mutatja, mely ugyanolyan alakú, mint valamelyik elemi alkotórészé, tiszta fémé. (L. az IB rajz jobb oldalát.) A vegyület jelenlétét a diagrammból mégis megállapíthatjuk, a megszilárdulását jelképező bcd olvadási görbe jelenlétéből. A vegyület az alkotórészeknél másban különbözik. A vegyület olvadáspontja, vagyis a folyékony elegy és a vegyület kristályának egyensúlyi hőmérséklete nevezetesen nem csökken a két alkotórész kis mennyiségének hozzáadása következtében, hanem csak nagyobb mennyiség hozzáadása folytán. Ennek következtében a vegyület olvadási görbéje sem mutat hirtelen esést, vagyis c -nél sohasem lesz hegyes csúcs (mint a hogyan a bcd szakadozottan húzott vonal mutatja), hanem az olvadási görbének többé vagy kevésbé belapult maximuma. Ha tehát valamely diagrammban ilyen maximum fordul elő, úgy az vegyület jelenlétére mutat.

A vegyület összetételét — a mondottak szerint — az olvadási görbe maximumának helyzetéből állapítjuk meg. A vegyület képletét a diagrammból egyszerű leolvasás útján megállapíthatjuk, ha a két alkotórész koncentrációját nem súlyszázalékban, hanem molekula- vagy atomszázalékban fejezzük ki. A fagyáspontcsökkenés törvényének ismertetésénél (51. old.) láttuk, hogy a fémek egymásában egyatomosan oldódnak. A fémek molekulaszúlya tehát atomszújukkal helyettesíthető. A molekulák helyett ennél fogva atomokat veszünk, mert az összetétel kifejezésére atomszázalékot egyszerűen használunk. Ha tehát valamely ötvözet összetételét atomszázalékban fejezzük ki, jelenti, hogy a diagramm megfelelő abszcisszája a két alkotórész valamelyikéből az atomok számát az ötvözet 100 atomjában adja meg.*

Ha a dolgot szigorúan vesszük, másképpen kell mondanunk. Az ötvözetekben előforduló vegyületek azilárd fázisának összetétele ugyanis sokszor igen tág határok között változik. Általánosságban mondhatjuk, hogy valamely vegyület folyékony vagy azilárd fázisának koncentrációja változó; ezért a koncentrációt magát nem mindig használhatjuk valamely meghatározott vegyület összetételének kifejezésére. A vegyület összetételét tehát a

* Ha valamely ötvözetben az A atomszúja A fémről a súlyszázalék, B fémről pedig, melynek atomszúja B , b súlyszázalék van, akkor az ötvözetben a két fém viszonyát atomszázalékban (x és y) következőképpen kapjuk

$$x = \frac{100a}{a + b\left(\frac{A}{B}\right)} \quad \text{és} \quad y = \frac{100b\left(\frac{A}{B}\right)}{a + b\left(\frac{A}{B}\right)}$$

Vicsezt az atomszázalékból a súlyszázalékre (a és b) való átírást a következő képletekkel végezhetjük

$$a = \frac{100x}{x + y\left(\frac{B}{A}\right)} \quad \text{és} \quad b = \frac{100y\left(\frac{B}{A}\right)}{x + y\left(\frac{B}{A}\right)}$$

Mivel a számítás hosszadalmas, rendszerint csak néhány ötvözet tartalmát számítottuk ki, míg a többi helyét grafikus interpolálás útján keressük ki. Grafikus úton való átalakítással különben az egész számítás elkerülhetjük. (L. Jänecke: Ober Gewicht- und Molekül- oder Atomprozent in Zwei- und Dreistoffsystemen. Metallurgie 9 [1912] 320; továbbá, Pirani: Atomprozent und Gewichtprozent, Intern. Zeitschr. f. Metallurg. 4 [1913] 297. és Jänecke: U. o. 5 [1913] 61. Végül, Hoffmann: Über die Darstellung und Umwandlung von Atomprozenten usw. Metallurgie 9 [1912] 133.)

Dr. h. c. Schleicher Aladár professzor dolgozatai az általam ismert cikkei alapján

A Schleicher professzor munkásságáról összeállított irodalomjegyzéket – lehetőleg időrendi sorrendben – az alábbi részekre bontottam:

aránylag rövid vegyészeti; – terjedelmes metallográfia és anyagvizsgálat; – ugyancsak terjedelmes szakmatörténet (kohászat); – végül németül megjelent publikációk.

Vegyészet

- ❑ A cyansav hydrolytos bomlásáról és erősségéről. Doktori értekezés. Athenaeum nyomda Bp. 1910. 30 oldal
- ❑ A cyansav hydrolytos bomlásáról és erősségéről. BKL 1910. 2. kötet, 14. sz., 65–81. p.
- ❑ Néhány fémszulfid magatartása káliumcyanid oldataiban. BKL 1908. 1. szám, 65–71. p.
- ❑ Karbon vagy szén? BKL Öntöde 1952. 7. sz. 167–168. p.
- ❑ Karbon vagy szén? BKL 1952. 12. sz., 286–288. p.

Metallográfia, anyagvizsgálat

- ❑ Oxigénnel való vágás az öntőacélműben BKL 1912. 2. kötet, 464–465. p.
- ❑ A fémek kristályos szövete. Természettudományi Közlöny (a továbbiakban TTK) 1915. 619–620. p.
- ❑ A metallográfia alapfogalmai I–IV. BKL 1915. 2. kötet, 1–9. 43–53., 80–91., 113–121., 156–164., 185–194., 241–252., 271–281., 427–438. p.
- ❑ A metallográfia alapfogalmai V–X. BKL 1916. 1. kötet, 191–200., 291–302., 323–334., 355–363. p.
- ❑ A metallográfia alapfogalmai XI–XII. BKL 1917. 2. kötet, 686–694., 809–830., 839–853. p.
- ❑ Króm-nikkel acélok vizsgálata, különös tekintettel a lövegek anyagával szemben támasztott igényekre. Magyar Mérnök és Építész Egylet Közlönye (MMÉEK) 1931. 51–52. sz., 335–340. p.
- ❑ Vízvezetési cső anyagának megválasztásáról az MMÉEK-ben tartott előadássorozat és vita tanulsága alapján. MMÉEK 1912. 33–34. sz., 185–188. p.
- ❑ Kísérleti tanulmányok a kadmium-réz-antimon hármas ötvözetével, I. rész, Magyar Chemiai Folyóirat (MChF) 1913. 8. füzet, 119–125. p.

- ❑ Kísérleti tanulmányok a kadmium-réz-antimon hármas ötvözetével, II. rész, Magyar Chemiai Folyóirat (MChF) 1913. 9. füzet, 137–142. p.
- ❑ Kísérleti vizsgálatok a kadmium és ón ötvözetével. MChF 1914. 6. füzet, 81–88. p.
- ❑ Az arany és arzén ötvözetek MChF 1914. 7. füzet, 107–111. p.
- ❑ Réz meg higany elegyeivel végzett elektromos ellenállásmérés. MChF 1914. 10. füzet, 145–149. p.
- ❑ A fémek anyagok vizsgálatának újabb módszerei. PPK 1914. 3–4. pótfüzet, 113–132. p.
- ❑ A mai hadviselés néhány fontos anyaga. TTK 1914. 661–664. p.
- ❑ A metallográfia fejlődéséről és irányairól. BKL 1961. 1. kötet, 246–251. p.
- ❑ A földgáz felhasználása a fémek autogén hegesztésére és vágására. Vegyészeti Lapok 1914. 132–134. p.
- ❑ A metallográfia alapfogalmai. Anyagvizsgálók Közlönye 1916. 274–276. p.

Szakmai (kohászat) történet

- ❑ A sárgarézt késő-középkori feldolgozása és a dróthúzás kezdete Magyarországon. MTA-MTO Közleményei 1952. 1–4. sz. 367–370. p.
- ❑ Adatok a Börzsöny hegység ércelőfordulásainak történetéhez. MTA-MTO Közleményei 1952. 1–4. sz., 415–423. p.
- ❑ Vashenger öntése lángkemencéből. BKL Öntöde 1953. 2. sz. 45–49. p.
- ❑ Schleicher Aladár – Horváth Zoltán: Fémkohászati folyamatok termodinamikai számítása. MTA-MTO Közleményei 1954. 1–4. sz. 421–422. p.
- ❑ Az LD-acél 3 éve. Könyvismertetés. MTA-MTO Közleményei 1954. 417. p.
- ❑ Az 1883. évben épült és 1952-ben újjáépített újmassai nagyolvasztó. MTA-MTO Közleményei 1954. 1–4. sz. 408–411. p.
- ❑ A kislódi vashámor története IV. rész. Nyersvas termelés bauxitból a 15. századból. MTA-MTO Közleményei 1954. 395–411. p.
- ❑ Nagyolvasztó és a hozzá tartozó fűvógép terve 1816-ból. MTA-MTO Közleményei 1958. 94–97. p.
- ❑ Római kori kemencék és leletek Tokodról. BKL Kohászat 1960. 341–358. p.
- ❑ Adatok a kohászat magyarországi történetéhez VII. rész. MTA-MTO Közleményei 1961. 1–4. sz. 407–416. p.
- ❑ A kislódi vashámor története. Nyersvas gyártás bauxitból a VII. századból. Történeti Szemle IV. 1. sz. MTA-MTO Közleményei 1961. 1. sz. 4–9. p.
- ❑ A kislódi vashámor története 1960. 1–4. sz. 393–405. p.

- ❑ A kislódi vaskohóban nyersvas előállítás. Történelmi Szemle IV. sz. MTA-MTO Közleményeiben 1961. I–IV. szám. 429. p.
- ❑ Adatok a kohászat magyarországi történetéhez VIII. rész. A kislódi vashámor története II. rész. MTA-MTO Közleményei 1962. 1–4. sz. 393–405. p.
- ❑ Adatok a kohászat történetéhez VIII. Magyarország, mint az úgynevezett amalgámozás, mint egy magyar eljárás. Kohászati Történeti Bizottság 10. közleménye.

Német nyelvű dolgozatok

- ❑ Untersuchungen über das Rosten. Társ szerző: W. Scholte. Stahl und Eisen 1908. 50–58. p.
- ❑ Untersuchungen über das Rosten des Eisens. Zeitschrift für Elektrochemie 1909. 799–780. p.
- ❑ Unterschiede in der Getreide einer Eisenbestandteilen. Metallurgie 1909. 189–190., 281–284. p.
- ❑ Über die Schnellformation von Bleiakкумуляtoren mit Lösungen von Schwefelsäure und Perchlorat. Zeitschrift für Elektrochemie 1911. 554–556. p.
- ❑ Elektrische Widerstandsmessungen an Gemischungen von Kupfer und Quecksilber. Zeitschrift für Elektrochemie 1912. 998–1000. p.
- ❑ Experimentische Untersuchungen am System Cd-Sn. Internationale Zeitschrift für Metallografie 1912. 876–889. p.

- ❑ Studien am Ternären System Kupfer-Kadmium-Antimon. Internationale Zeitschrift für Metallografie 1913. 102–126. p.
- ❑ Über die Legierungen des Goldes mit Arsen. Internationale Zeitschrift für Metallografie 1914. 18–22. p.
- ❑ Resistometrische Studien an einigen Eisen-Nickel Legierungen. Társ szerző: W. Guertler. Zeitschrift für Elektrochemie 1914. 237–239. p.
- ❑ Eisen-Nickel Legierungen. Társ szerző: W. Guertler. Internationale Zeitschrift für Metallografie 1915. 111. p.

Schleicher-cikkek irodalma

- [1] Árkos Frigyes: Schleicher Aladár 80 éves. BKL Kohászati Lapok 1962, 7. sz. 289. p.
- [2] Verő József: Megemlékezés dr. Schleicher Aladár születésének 100. évfordulójáról. BKL Kohászat, 1981, 8. szám, 353–354. p.
- [3] Magyar életrajzi lexikon. (főszerk.: Kenyeres Ágnes) IV. kötet 1978–1991. (A–Z) Akadémiai Kiadó 1994. Bp.
- [4] Markó László (főszerk.): Új magyar életrajzi lexikon V. kötet (P–S) Magyar Könyvklub 2004. Bp.
- [5] Csáky Károly: Híres selmecbányai tanárok. Lilium Aurum (a Szlovák Köztársaság Kulturális Minisztérium támogatásával) Dunaszerdahely, 2003.



Selmecbánya ma (Fotó: szorvany.info)

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 poszter tiszavirág életű műfaj, egy-egy konferencián, vándorgyűlésen jelenik meg, és 1-2 napos élet után a mindennapokba „süllyedve” a legtöbbször elfelejtődik, viszonylag kevés érik közülük tovább folyóiratcikké, könyvfejezetté. Viszont pillanatképet ad a 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 szinten (BSc, MSc, PhD) tanuló hazai és külföldi diákok korábban konferenciákon, vándorgyűléseken szereplő olyan posztjeit, amelyek témája fokozottan érdekelheti az olvasókat.

A mostani és következő BKL-számokban, egy-egy posztet 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 bírnak 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 is developed 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.

After providing information about the authors and their research groups, a brief summary and comment is given 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.

A stroncium geokémiai viselkedése a rudabányai érces komplexum képződményeiben

Geochemical behavior of strontium in the formations of the Rudabánya ore complex

FODOR PÉTER¹, KASÓ ATTILA IFJ.², KRISTÁLY FERENC¹, FÖLDESSY JÁNOS¹

¹Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Miskolc

²Rotaqua Kft., Kővágószőlős

2023-ban a poszter a XXXVI. Országos Tudományos Diákköri Konferencián különdíjat nyert

A stroncium alkáliföldfém az EU kritikus ásványi nyersanyagok listáján szereplő elem. Üveggyártási adalék, sugárvédelem bevonatok, festégyártás a fő alkalmazási területei. Iparilag jelentős ásványai a stroncianit (Sr-karbonát) és cölesztin (Sr-szulfát).

Rudabánya a hazai legnagyobb ismert vasérc-elfordulásunk, egyúttal Pb-, Zn-, Ag-, Ba-dúsulásuk révén 2007 óta nyersanyagkutatói programok színhelye. A jelenleg futó kutatás az üledékes réteggövető, illetve utólagos töréskitöltő baritdúsulásokra irányul, melyek mennyisége és koncentrációja ipari termelés alapját jelentő önálló ásványvagyónként vált ismertté. Az 1980-as években ebből a nyersanyagból már dúsítási kísérletek és bányászati próbatermelés történt.

Az üledékes barit feltételezhetően alsó triász korú, szubmarin exhalációs eredetű. Az utólagos repedés-
kitöltő változat a triász képződmények felgyűrődését
is eredményező szerkezeti mozgásokat követő törés-
zónákban, a törészónát kitöltő breccsa kötőanyagaként
vált ki hidrotermális oldatokból rézdúsulással kísérvé.
Az oxidációs zónában a réz mobilizálódik (malachit,
azurit, kovellin, termésréz és egyéb másodlagos réz-
ásványok kiválásával kísérten), de a stronciumtartalom
a felszíni szilánkmintákban a primér zónában mérthez
képest nem mutat jelentős változást.

A stroncium feldúsulása a legutolsó, WDXRF kémiai vizsgálatok szerint egyértelműen a Ba felszaporodásához kapcsolódik. 61 elemzés alapján a két elem korrelációja szoros, $R = 0,92$ együttthatóval, 0,24% maximális Sr-tartalommal (58,6% Ba-koncentráció mellett, ami közel 100% barittartalomnak felel meg). Az ugyanezekből a mintákból végzett Ca-, Mg-elemzésekkel a stroncium gyenge negatív korrelációt mutat ($R = -0,71$ és $-0,67$).

Ez valószínűtlenné teszi, hogy a stroncium karbonáthoz kapcsolt dúsulása Rudabányán jelentős lenne.

Az önálló cölesztin ásványfázis megjelenését Rudabányán jó felismerhetősége ellenére eddig nem észlelték. Mivel a barit és a cölesztin azonos kristályszerkezetű, feltételezhető a Sr beépülése a barit szerkezetébe.

Nincs még elegendő adat ahhoz, hogy a két különböző eredetű (üledékes és érkitöltő) baritváltozathoz kapcsolódó stroncium eloszlási értékekre megbízható becslést adhassunk. Az elkészült 61 db elemzést a réztartalom alapján is leválogattuk. Az eddig ismert földtani jellegek alapján az alsó triász réteggövető ércesedésekhez nem kapcsolódik rézdúsulás, míg az utólagos hidrotermális baritdúsulások rézércesedéshez kapcsolódnak. A két populációt 100 ppm Cu alatti és feletti csoportként szétválogatva a két csoportban egyöntetűen a barittal párhuzamosan dúsul a stroncium, $R = 0,91$ és $R = 0,93$ korrelációs együtthatókkal. Ezt a kapcsolatot viszont a felszínközeli oxidációs övben lezajlott rézmobilizációs folyamatai megzavarhatják. Az előzetes adatok szerint a deszcendens oldatvándorlás (malachit, azurit, kovellin, termésrész és egyéb másodlagos rézászványok kiválásával kísért) folyamán a stronciumtartalom a felszíni szilánkmintákban a primér zónában mérthez képest nem mutat jelentős változást.

Mivel a barit feltételezhetően rövid-, ill. középtávon itt termelt ipari nyersanyaggá válhat, a vele együtt dúsuló stroncium bizonyos vegyipari alkalmazások esetében kinyerhető melléktermékké válnak. Jövőbeli feladatot jelent a különböző ásvány-előkészítési eljárások termékeinek stronciumvizsgálata, mivel ez az ipari kivonás és hasznosítás módszereinek kifejlesztéséhez vezethet.



Szerzői életrajzok

KONDÁS BÉLA 1999-ben szerzett gépész-, majd 2002-ben kohómérnöki oklevelet a Miskolci Egyetemen. 2009-től a Thyssenkrupp Materials Hungary Zrt. (ex-Ferroglobus) minőségügyi vezetője. 2020 és 2024 között a Thyssenkrupp Materials Services Kelet-Európai üzletági minőségügyi vezetője. Az OMBKE Vaskohászati Szakosztályának vezetőségi tagja. A magyarországi kohászat érdekében kifejtett fejlesztő- és oktatómunkáját 2019-ben a Miskolci Egyetem szenátusa címzetes egyetemi docensi címmel, 2022-ben az Energiaügyi Miniszter Szent Borbála kitüntetéssel ismerte el. A Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola doktorandusza. Kutatási területe a mai modern technológiával előállított lágyacél lemezek öregedési dinamikájának megismerése, valamint az öregedésből fakadó káresetek csökkentési eszközeinek kifejlesztése.

DR. MERTINGER VALÉRIA 1990-ben a Miskolci Egyetem Kohómérnöki Karán, a fémalakító szakon, fém-tani ágazaton, 1994-ben pedig a Kossuth Lajos Tudomány Egyetemen mérnök-fizikus szakon szerzett oklevelet. PhD-fokozatát 1994-ben szerezte a Miskolci Egyetemen. Az Anyag- és Vegyészmérnöki Kar egyetemi tanára, a Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet igazgatója, a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola vezetője. 2018 óta az MTA doktora címmel rendelkezik. Főbb kutatási területei: kristályosodás, martenzites átalakulások alakemlékező ötvözetekben és TWIP/TRIP acélokban, maradé feszültség meghatározása röntgendiffrakciós módszerrel, textúravizsgálatok, alumíniumötvözetek fém-tani folyamatainak vizsgálata.

ID. ŐSZ ÁRPÁD aranyokleveles olajmérnök, menedzser szakmérnök. 1969-ben szerzett olajmérnöki diplomát Miskolcon, a Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karán, majd 1993-ban menedzser szakmérnöki diplomát a Veszprémi Egyetemen. 1969-től 2015-ben történt nyugdíjazásáig – 46 éven keresztül – a kőolaj- és földgázbányászat területén fűrészi-, lyukbefejezési- és kútjavítási tevékenységgel, azok tervezésével, irányításával és ellenőrzésével foglalkozott a Kőolajkutató Vállalatnál és a MOL Nyrt.-nél. Dolgozott az Egyesült Arab Emírátsokban (Abu Dhabi) és Irakban (Kurdisztán). Az OMBKE tiszteleti tagja és a MMK aranygyűrűs mérnöke.

DR. PILISSY LAJOS (Érsekcsanád, 1925–2025) gyémánt-, vas-, rubin- és legutóbb, 2024 júniusában, 75 éves diplomájának évfordulóján gránitokleveles kohómérnök, a magyar kohászat kiemelkedő alakja. 1949. október 24-én szerzett kohómérnöki oklevelet a Nehézipari Műszaki Egyetem Bánya- és Kohómérnöki Karán (Miskolc). Karrierje a kohászat területén teljesedett ki, többek között a Vasipari Kutató Intézetben dolgozott nyugdíjasként. Egyetemi docensként adott elő a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) gépészmérnöki karán öntészetet, a Miskolci Egyetemen fémöntészetet, a Műszaki és Gazdasági Akadémián pedig tüzeléstant és színesfémtechnológiát tanított címzetes egyetemi docensként. Mintegy 32 szakkönyv és számos szakkikk szerzője vagy társszerzője (például a „A fémek és az ember” című könyvnek 1952-ben). Kandidátusi fokozattal is rendelkezett.

További szerzők:

Pataky Csilla BSc-hallgató,
Richmond Kojo Kyei MSc-hallgató,
Földessy János professzor emeritusz
Mádai Ferenc egy. docens, intézetigazgató
TEKH Szakkollégium, Miskolci Egyetem

Kócsák Éva,
Roósz András,
Rónaföldi Arnold,
Veres Zsolt,
Miskolci Egyetem. Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézet, Miskolc
HUN-REN Magyar Kutatási Hálózat, Budapest

Az OMBKE hivatalos Facebook- és LinkedIn-oldala

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület
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

A STRONCIUM GEOKÉMIAI VISELKEDÉSE A RUDABÁNYAI ÉRCES KOMPLEXUM KÉPZŐDMÉNYEIBEN



FODOR Péter¹, KASÓ Attila ifj.², KRISTÁLY Ferenc¹, FÖLDESSY János¹

¹Miskolci Egyetem, ²Rotaqua Kft., (fodor.peter1@student.uni-miskolc.hu)



Bevezetés, a földtani környezet

A stroncium a periódusos rendszer 38. eleme, földkéregbeli átlaga 450ppm. 2020 óta szerepel az Európai Unió kritikus nyersanyagainak listáján, hozzáférhetősége kritikus fontosságú. Természetes formában háromféle ásványként gyakori, cölesztin (SrSO_4) és stroncianit (SrCO_3) formájában, illetve baritban ($\text{Ba}, \text{Sr}(\text{SO}_4)$) elem-helyettesítéssel. A stroncium legfontosabb felhasználási területe az üveggyártás, pirotechnikai eszközök és mágnesek gyártásához történő alkalmazása.

Rudabányán régóta ismertek a vasérc testekhez közel kialakult barit dúsulások. elemzések kiterjedtek a vizsgált minták stroncium tartalmára is.



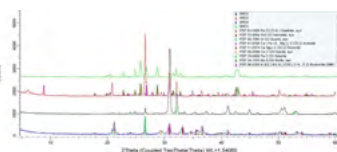
Azokban a mintákban, amelyekben Sr és Ba elemzési adata rendelkezésre áll, szoros korreláció látható a két elem között. Így a barit kitermelése esetén a hozzá kapcsolódó melléktermékként kinyerhető stroncium tartalomnak közvetlen gazdasági jelentősége lehet.

Vizsgálati módszerek

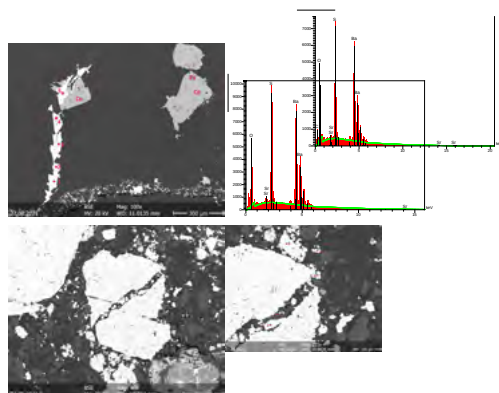
- Pásztázó elektronmikroszkópia és energiadiszipatív röntgenspektrometria (SEM+EDS)**
Jeol JXA 8600 Superprobe, W-katód, SE (morfológia) és BSE (kémia) detektor, szemcse, polírozott csiszolat, EDS det., WDS det.-k, felbontás ~0,05 μm
- Röntgen-pordiffrakció (XRD)**
Bruker D8 Advance, Cu-K α , por, vágott és tömbi roncsolásmentes, azonosítás, mennyiségi ö., szerkezet fin.
- Hullámhossz-diszipatív röntgenfluoreszcens spektrometria (WD-XRF)**
Rigaku SuperMini200, Rh sugárforrás, WDS, 1-4 g por, pellet vagy „üveglap”, Vákuumozható, nemesgáz öblítés, F-U, kalibráció szerint

Ásványtani összetétel (XRD)

Az XRD mérések alapján a szövetszerkezeti (genetikai) barit típusoknak megfelelően különböző összetételek jelennek meg. A legnagyobb dúsulások esetében kvarc, kevés Fe, Pb és Zn karbonátok kísérik, míg a karbonátos testekben döntően ankerit és dolomit, kisebb mértékben sziderit a befogadó anyaga.



Elektronmikroszkópos jellemzés

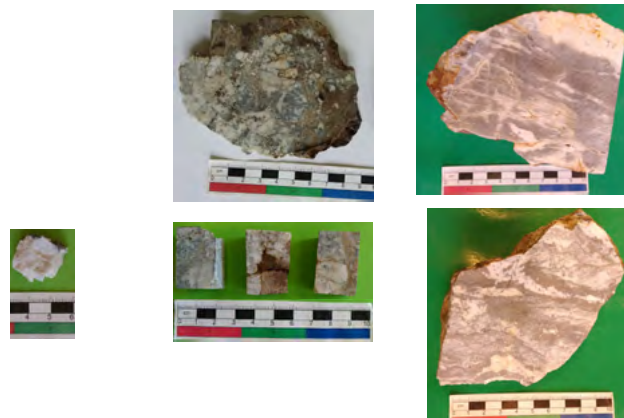


A baritos közettípusok

- Barit az alsó-triász korú rétegalkotó szingenetikus Pb-Zn-Cu és Fe ércesedésben:** A „krémpát” típusú sziderittel együtt feltételezhetően a bányaterület legkorábbi ércesedése. Kísérői a Pb-Zn szulfidok, a befogadó karbonátos márga kőzetanyaga kvarc, filloszilikátok és dolomit.
- Barit a szilikátos hematitos vasércben és krémpát dúsulásokhoz kapcsolatban:** A vasérc üledékes módon keletkezett, a krémpát dúsulások a Bódvaszilasi Homokkő Formáció kőzeteiben fordulnak elő. Később barit és a sziderit dúsulások keletkeztek az üregekben utólagos kitöltésként.
- Barit metasztatikus pátvasércben:** A pátvasérc anyaga metasztatizált kampili és alsó-anizuszi dolomit és mészkő. A barit a második leggyakoribb ásvány a pátvasérces komplexumban, szórt, hintett csomók, lencsék formájában.
- Baritos pátsgégy:** A pátvasérct tartalmazó kőzetek repedéshálózatában hidrotermális oldatból kivált ásvány együttest baritos pátsgégynek nevezték el. Ebben jellemzően durvakristályos táblás kifejlődésű a barit.
- Barit barnavasércben:** A vasérctelep összetört és a trópusi éghajlat felgyorsította az ércképződést. A barit a pátvasércből átöröklődött csomókban, foltokban található.

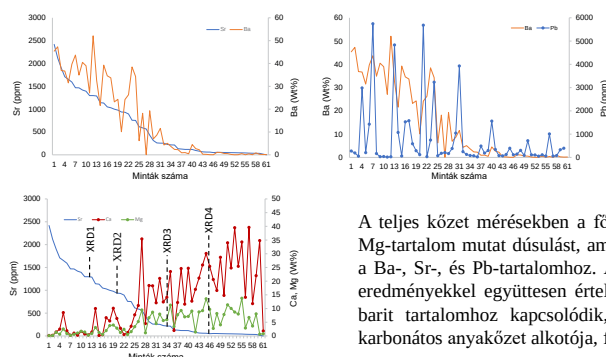


Szövetszerkezeti típusok



Geokémiai értelmezés

A Sr dúsulását és különböző típusú mintákban való eloszlását az XRF mérések alapján elemezzük. A csökkenő Sr-tartalom jól korrelál a csökkenő Ba-tartalommal.



A teljes kőzet mérésekben a főelemek közül a Ca- és Mg-tartalom mutat dúsulást, amely fordítottan aránylik a Ba-, Sr-, és Pb-tartalomhoz. Az XRD és SEM+EDS eredményekkel együttesen értelmezve a Sr dúsulása a barit tartalomhoz kapcsolódik, míg a Ca és Mg a karbonátos anyakőzet alkotója, főleg kalcit

Következtetések

A vizsgálatok alapján a Sr dúsulása a barithoz kötődik, legnagyobb mértékben a korai, szulfidokkal szingenetikus, exhalatív típusban. A későbbi barit generációkban fokozatosan csökken.