

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola**

**A nagyolvasztó falazatának hűtési intenzitása,
tapadványkialakulási folyamata és az áramló gáz
metallurgiai kihasználása között fennálló összefüggés-
rendszer feltárása**

PhD értekezés tézisei

Móger Róbert
okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:
Dr. Farkas Ottó
Professor Emeritus



Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Metallurgiai és Öntészeti Intézet

Miskolc

2014

I. Bevezetés, célkitűzés

Az értekezés címében megfogalmazott kutatási feladat a nagyolvasztóban lejátszódó, kölcsönös hatásokban megjelenő, rendkívül összetett és bonyolult folyamatrendszer egy olyan részének a behatóbb feltárását tűzte ki célul, mely a nyersvasgyártás üzemi, energetikai és ökológiai viszonyaira egyaránt hatást gyakorol, de annak ismerete, azaz szakirodalmi háttere napjainkban még nem kielégítő.

A helyzet nyilvánvaló magyarázata az, hogy a témakörben szereplő tapadványképződési folyamat szabad szemmel vagy nem, vagy csak kivételes esetekben utólag (kohóleállítás és falazatbontás) vizsgálható. A létrejött tapadványok helyzete, mérete és morfológiája legfeljebb közvetve valószínűsíthető és ezért a metallurgiai és hőátadási folyamatokra vonatkozó konkrét hatásuknak a meghatározása nagyon kiterjedt üzemi vizsgálatokat igényel. Mindezeket túl a nagyolvasztók kampányideje napjainkban 15-20 év, amelyet követően lehet csak alapos vizsgálatnak kitenni a létrejött tapadványokat, azaz nincs túlságosan sok lehetőség arra, hogy ezeket behatóbban tanulmányozhassuk.

A kutatási célkitűzés teljesítése természetesen nem nélkülözheti a tapadványképződési folyamatok behatóbb feltárását és ezen ismeretek birtokában, a tapadványok kialakulásának megakadályozását, vagy csökkentését szolgáló korszerű, újabb metallurgiai felismerések rögzítését és rendszerezését sem.

A téma aktualitását pedig az adja, hogy a világ vasércigényének növekedésével egyre nagyobb a jelentősége a depónián tárolt különböző vaskohászati porok, iszapok illetve kevésbé „tiszta”, szennyezőelemeket is nagy mennyiségben tartalmazó vasérccek felhasználásának. Mindezen „alanyagokban” a többszöröse a különböző tapadványképző elemek (Na, K, Zn) mennyisége, mint a korábban említett „tiszta” vasérccekben. Azaz az elkövetkező években a nagyolvasztók egyre nagyobb mennyiségű tapadványképző elem bevitelével lesznek kénytelenek működni.

A választott téma kidolgozásának és a szükséges üzemi vizsgálatok nagyolvasztói bázisát az ISD DUNAFERR Dunai Vasmű Zrt. Nagyolvasztóműve, azon belül annak II.sz. nagyolvasztója, a kapcsolódó laboratóriumi hátteret pedig a Miskolci Egyetem és az ISD DUNAFERR Zrt. vonatkozó laboratóriumi biztosították.

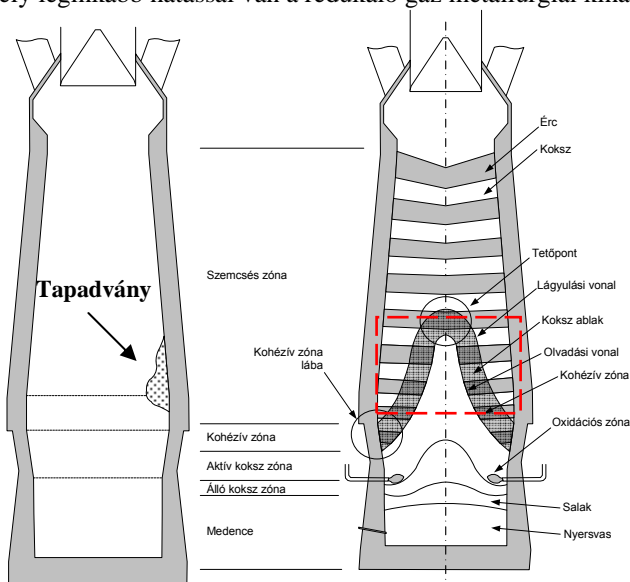
A témakörben elvégzett nagyszámú mérés és vizsgálat létjogosultságát és szükségességét, a fent elmondottak (nem kielégítő részletességű szakirodalmi háttér, a nagyolvasztói viszonyok bonyolultsága, a tapadványok vizsgálatának nehézsége), egyértelművé teszik.

Az alábbiakban az értekezésem címében szereplő háromféle szempontrendszer szerinti tagolásban rendszerezem az elvégzett kutatómunka legfontosabb vizsgálatait, eredményeit. A nagyolvasztó sajátosságából adódóan mind a vizsgálatok, mind az eredmények egymástól nem tekinthetők függetlenek, azokra számos paraméter hat. Éppen ezért a megfelelő pontosság érdekében nagymennyiségű adat feldolgozására volt szükség az értekezésem elkészítéséhez.

II. A redukáló gáz metallurgiai kihasználásának vizsgálata

A nagyolvasztóba bekerülő Na-, K- és Zn-tartalmú vegyületek károsan befolyásolják a nagyolvasztó élettartamát azáltal, hogy reakcióba lépnek a falazatot alkotó vegyületekkel, valamint, hogy részt vesznek az ún. tapadványréteg kohó falazatán történő kialakításában (1. ábra). A tapadványok változatos mérettel, morfológiával és elhelyezkedéssel rendelkezhetnek.

Kutatásom során elsőként a nagyolvasztó azon releváns magassági zónáját határoztam meg, mely leginkább hatással van a redukáló gáz metallurgiai kihasználására.



1. ábra A nagyolvasztói tapadvány bemutatása, valamint a nagyolvasztó működés szempontjából legfontosabb részei

Az elfogadható alapelv szerint, a kialakuló tapadványréteggel helyenként megvastagodott aknafalazat külső - páncélzat felé eső - rétege alapvetően kisebb hőmérsékletű, mint a tapadványmentes falazaté. Azaz azonos hűtővízárám-jellemzők (beáramló hűtővíz-tömegáram, -hőmérséklet) esetén a tapadványréteget hordozó aknafal-felület hűtésével távozó hűtővízhőmérséklet-növekedésének mértéke annál kisebb, minél vastagabb - tehát radiális irányban minél kiterjedtebb - a képződött tapadvány.

Az elvégzett különféle (hűtővízzel elvont hőmennyiség ill. differenciálynomás) mérések arra utalnak, hogy tapadványképződés szempontjából a kohézív zóna szolidusz hőmérsékleteinek helyét jelző „harangfelület”, illetőleg függőleges met-

szetében a „haranggörbe” magassága által meghatározott akna-alsó tartomány rendelkezik kiemelkedő jelentőséggel (**1. ábra** megjelölt területe).

Kutatásom során gázáramlás szempontjából (gázkihasználás és gáz-permeabilitás) két markánsan különböző időszak adatait (2012.09.07-17. ill. 2012.10.13-23.) elemeztem. Az előbbi időszakot „gázáramlási szempontból kedvezőnek” (gázkihasználás $\eta_{CO} > 42\%$ és gáz-permeabilitás $P_e > 0,85$), míg az utóbbit „gázáramlási szempontból kedvezőtlen időszaknak” ($\eta_{CO} < 38\%$ és gáz-permeabilitás $P_e < 0,75$) tekintetem.

Megvizsgáltam mindkét időszakban a hűtőlap- és falazat-hőmérsékletek átlagértékeit és szórását, melyet az **1. táblázatban** foglaltam össze.

1. táblázat A „kedvező gázáramlási időszak” és a „kedvezőtlen gázáramlási időszak” hűtőlap- és falazat-hőmérsékletek átlagos értékei és azok szórása

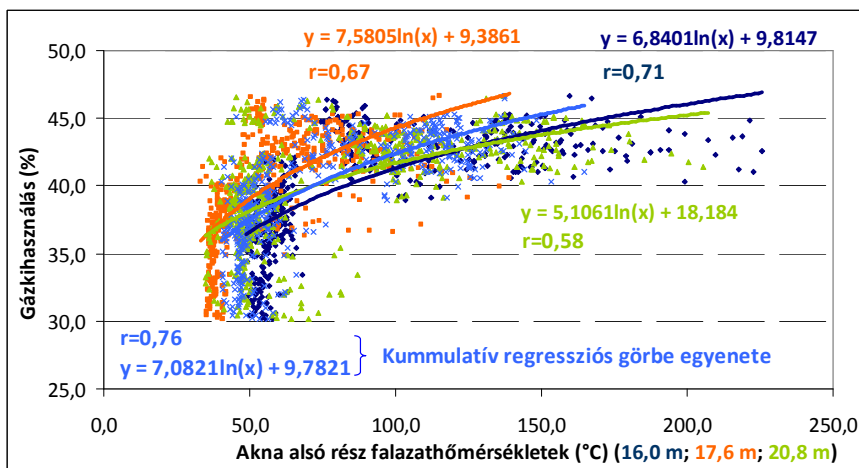
Mérési hely		1		2		3		4		5		6	
		Kedvező	Kedvezőtlen	Kedvező	Kedvezőtlen	Kedvező	Kedvezőtlen	Kedvező	Kedvezőtlen	Kedvező	Kedvezőtlen	Kedvező	Kedvezőtlen
Hűtőlap 17,9 m	Átlag			50,5	25,8	52,6	27,4	45,8	24,5	36,5	24,3	44,0	26,3
	Szórás			15,6	1,6	15,8	1,1	17,4	1,0	6,8	2,1	16,1	0,8
Falazat 16,0 m	Átlag	121,2	72,1			152,1	44,6	85,7	55,2				
	Szórás	44,5	7,9			88,1	3,5	22,8	9,4				
Falazat 17,6 m	Átlag	65,5	34,6	72,6	33,2			118,2	83,3	62,5	31,3	58,5	36,7
	Szórás	36,9	3,4	29,2	3,9			61,9	53,4	24,1	4,4	16,1	3,5
Falazat 20,8 m	Átlag	138,8	71,1	54,6	39,4			93,0	43,3			143,9	49,1
	Szórás	62,2	25,8	7,8	9,5			36,3	10,3			64,5	11,5
Falazat 24,0 m	Átlag	132,4	158,1	124,9	55,5			126,9	66,0	164,7	57,1	124,6	59,7
	Szórás	41,1	98,6	25,7	36,3			30,3	54,3	37,3	15,7	45,2	31,0
Falazat 27,3 m	Átlag	111,5	133,6	40,6	48,4	87,9	78,0	182,9	124,9	46,9	32,4	37,5	49,0
	Szórás	56,7	112,5	5,2	21,6	28,9	19,2	99,5	101,2	13,8	5,4	4,0	12,2
Falazat 31,0	Átlag	196,0	177,6			162,9	311,5	140,5	230,8	165,3	122,7	54,4	58,0
	Szórás		81,0	113,7		74,1	140,3	40,3	79,6	72,5	46,3	12,2	17,0

A fenti táblázat áttanulmányozása alapján látható, hogy a „kedvező gázáramlási időszak” átlagos falazat- és hűtőlap-hőmérsékletek a nagyolvasztó akna alsó részén (16,0-17,9 m-ig) és az akna középső részén (20,8 m) egyértelműen magasabb értékeket mutatnak. A nagyolvasztó magasabb részén (24,0 m; 27,3 m; 31,0 m) a falazat-hőmérsékletek jóval kiegyensúlyozottabbak a két időszak összehasonlításában, ugyanakkor az szembevetendő, hogy a falazathőmérséklet-szórás értékei jelentősen nagyobbak a gázáramlási szempontból „kedvezőtlen időszakban”.

A redukáló gáz CO-tartalmával lejátszódó indirekt vasoxid redukció legkedvezőbb hőmérséklet-tartományát (850-950 °C) magába foglaló zóna (a vizsgált nagyolvasztó esetében: 16,0; 17,6 és 20,8 m) 4,8 m magas aknatartományára vonatkoztatott mérési adatok regressziós analízisének eredményei azt mutatják, hogy az akna-falazat hőmérsékletek és a gázkihasználás között megfelelően erős korrelációs kapcsolatok működnek (**2. ábra**).

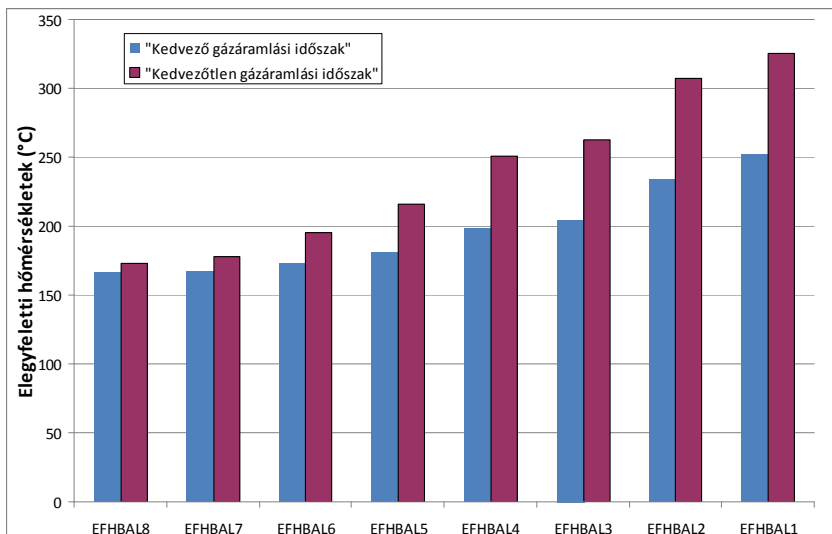
Az akna térségében süllyedő anyagáram irányába haladva a tapadvány(ok) kialakulásának hatása a gázkihasználásra egyértelműbb, mint a felsőbb zónákban, aminek oka minden bizonnyal a gázáramlási viszonyoknak, az akna alsó térségében kialakult speciális módozatában rejlik. Ugyanis az akna egyre mélyülő tartományában – a kohézív zóna megjelenésének következtében – a felső (szilárd) zónákban még kör keresztmetszetű áramlási felülete, egyre kisebb szélességű körgyűrűvé válva, lecsökkenő áramlási felületet hoz létre. Következésképpen valamely adott és azo-

nos nagyságú tapadvány a leszűkült áramlási keresztmetszetnek nagyobb hányadát zárja el és ennek arányában megnövekedett gázsebességet, s így kisebb tartózkodási időt generálva, a gázkihasználás csökkentésére határozottabb hatást fejt ki.



2. ábra Az akna-alsórész falazathőmérsékletek és a gázkihasználás kapcsolata

Megvizsgáltam a két különböző gázáramlási időszak elegyfelszín feletti hőmérsékleteinek az alakulását, melyet a 3. ábrán összegeztem.



3. ábra Az elegyfelszín feletti hőmérsékletek átlaga a különböző gázáramlási időszakokban

Megállapítottam, hogy az akna térségében bekövetkező bármiféle olyan változás, ami a redukáló gáz áramlási irányában változást idéz elő (pl. tapadványleválás), az a kohó torok részén is az elegyszint feletti hőmérsékletek megváltozását (a gázáramlási irányok módosulását) eredményezi. Mindezek figyelembevételével, a tapadvánnyal terhelt falazatú időszakban - a tapadványok gázáramlási irányt és sebességet módosító hatása miatt - az elegyszint feletti hőmérsékletek - különösen a kohó tengelye mentén - nagyobbak, mint a tapadványmentes falazatú időszak esetében.

Az aknafalon képződött tapadvány a gázáramot tehát lényegében a Venturi-cső elvének megfelelően működteti, azaz az eredeti Bernoulli-képletből levezethetően, a kiinduló gázáramsebesség (v_1) és áramlási keresztmetszet (q_1) szorzata egyenlő a szűkített keresztmetszet (q_2) és az ott kialakult gázáramsebesség (v_2) szorzatával, vagyis

$$q_1 \cdot v_1 = q_2 \cdot v_2$$

Ebből következik, hogy

$$v_2 = \frac{q_1}{q_2} \cdot v_1,$$

azaz tapadványkialakulás tartományában leszűkült áramlási keresztmetszet magasságának térségében a gázáramsebesség, az eredeti és a leszűkült áramlási keresztmetszet hányadosával növelt mértékben nagyobb lesz.

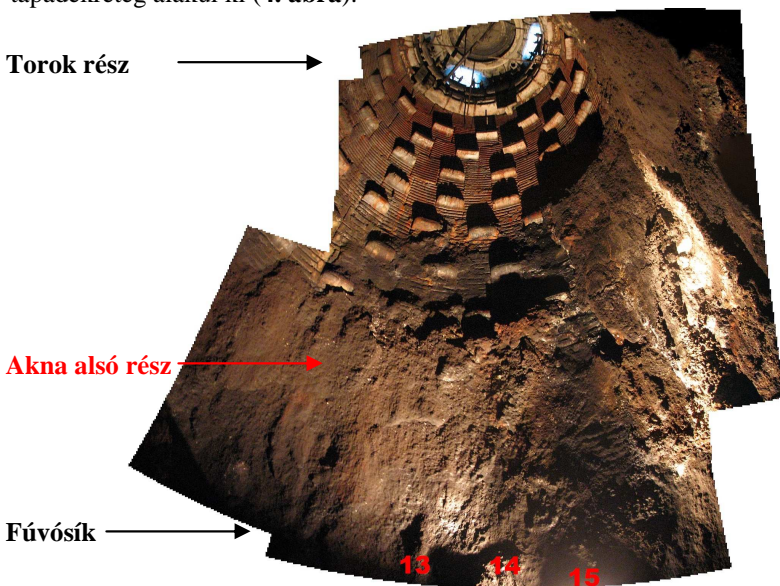
Mindez megerősíti a **2. ábrán** bemutatott összefüggést az akna-alsórész hőmérsékletek és a gázkihasználás között.

III. A tapadványképződési folyamatok vizsgálata

A nagyolvasztói tapadványképződési folyamatok részletes vizsgálatához elengedhetetlen, hogy ismerjük a tapadványképződésben résztvevő kémiai elemeket, ásványfázisokat, azok nagyolvasztóban történő elhelyezkedését. A tapadványminta vizsgálata, a minta kivétele egy működő nagyolvasztó esetében komoly nehézségekbe ütközhet, azonban egy leállított kohónál könnyebben kivitelezhető.

A fentieknek megfelelően az ISD DUNAFERR Zrt. átépítésre leállított I.sz. nagyolvasztójából tapadványmintát vettem, amely a beadagolt alapanyagok azonos részaránya és összetétele révén, erős korrelációt kell, hogy mutasson a vizsgált II.sz. nagyolvasztóéval. Ezen kívül vizsgálatot végeztem arra vonatkozólag, hogy a nagyolvasztó mely magassági zónáiban található nagyobb kiterjedésű és rétegvastagságú tapadvány.

Az elvégzett vizuális vizsgálatok eredményeként az állapítható meg, hogy a kutatási témám szempontjából leginkább fontos magassági zónában, az akna alsó részén kiterjedt és vastag tapadványréteg, míg az akna középső részén vékonyabb tapadékréteg alakul ki (4. ábra).



4. ábra Az ISD DUNAFERR Zrt. átépítésre leállított I.sz. nagyolvasztójának falazata a leállást követően (13-15. fúvóformák között)

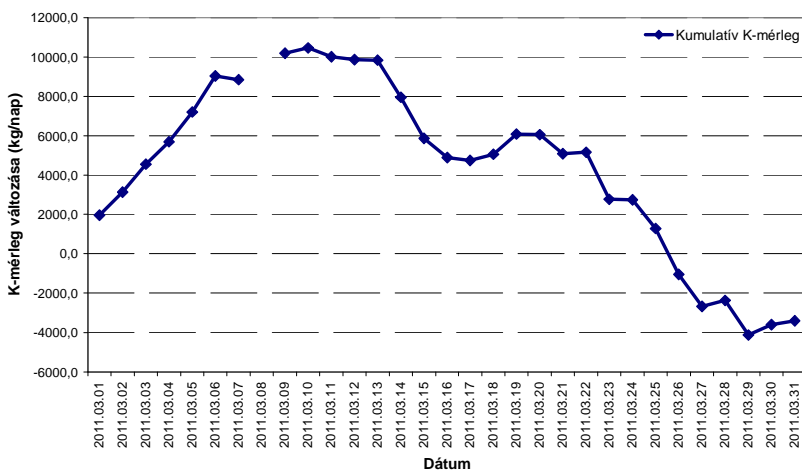
Az akna alsó részén található tapadványból mintavételre került sor, melyből részletes kémiai- és ásványfázis-vizsgálatokat végeztem annak megállapítására, hogy a tapadványképződési folyamat, a vizsgált nagyolvasztó működési körülményei között, milyen formában megy végbe

A tapadványvizsgálat eredményeiből megállapítottam, hogy a tapadványok réteges felépítésűek, ami abból adódik, hogy nem egyszerre, egy időben történik a falazaton történő megtapadásuk, hanem több egymást követő folyamat eredményeként. A tapadványminták egyes rétegei a különböző ásványfázisok megjelenésével tipizálhatók, bennük a tapadványképző elemek (Na, K, Zn) megtalálhatók, de csak mint katalizátorok vesznek részt a tapadványképzésben.

A tapadványmintákból kivett mintadarabon a tapadvány hővezetési tényezőjének mérésére került sor, annak érdekében, hogy a hűtési modellszámítás alapján, a nagyolvasztó adott magassági szintjén a tapadványréteg vastagságát meg tudjam határozni. Ez a mérés elengedhetetlen volt abból a szempontból is, hogy a nagyolvasztói tapadványréteg vastagsága és a gázkihasználás közötti releváns kapcsolatot bemutassam.

A nagyolvasztói tapadványképződést akadályozó lehetőségek feltárása érdekében, vizsgálataimat a tapadványképző elemekre kiterjedő anyagmérleggel folytattam.

A fent említett szennyezők mérlegeinek elkészítéséhez átfogó kísérleti program indítását kezdeményeztem, melynek keretében a bementi oldalon az alapanyagokat és a salakképzőt, míg a kimeneti oldalon a kohósalak, a szállópor és a nedves porleválasztás termékét vizsgáltuk. Ezzel összefüggésben 208 db anyagminta kivételére, anyagvizsgálatára került sor a be és kimeneti oldalon összesen.



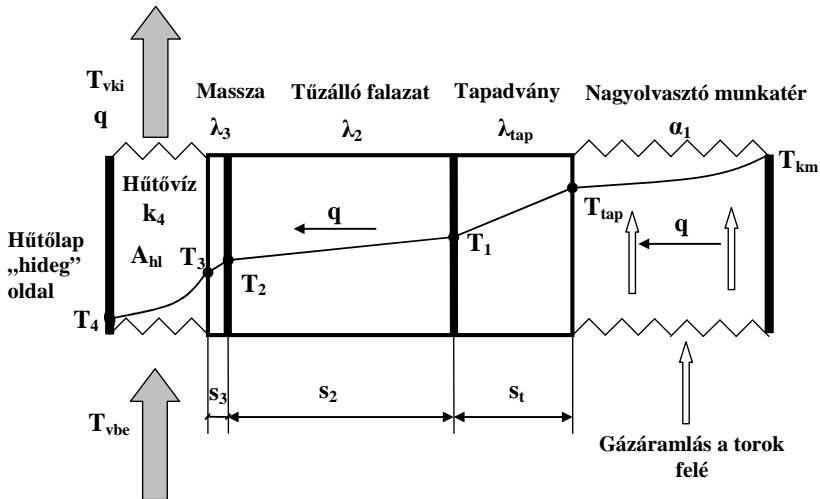
5. ábra A nagyolvasztó káliummérlegének kumulatív ábrázolása

A napi káliummérlegek kumulatív módon történő vizsgálatából (**5. ábra**) egyértelműen látható, hogy a vizsgálati időszak végére a mért értékek alapján a káliumkihozatal nagyobb mértékű volt, mint a bevitel. Ennek megfelelően a káliummérleg tárgyalásakor figyelembe kell venni, hogy annak eredményei feltehetően magukban hordozzák a tapadványképződés és –leépülés K-forgalmának értékeit is, és ezáltal alkalmasakká válnak a tapadványképződési mechanizmus nyomon követésére.

IV. A nagyolvasztó tűzálló falazat hűtési intenzitásának vizsgálata

Kutatási témám céljainak elérése érdekében nagyolvasztó akna rész hűtési modelljét dolgoztam ki (**6. ábra**), melyet a hőátadási folyamatokkal kapcsolatos számításoknál használtam fel.

A kidolgozott hűtési modell figyelembe veszi a nagyolvasztó munkatér és a tűzálló falazat közötti hőátadási folyamatot, valamint a különböző tűzálló falazat komponenseket. A modellben lehetőség van a különböző hőátviteli tényezővel rendelkező hűtőlapok vizsgálatára is.



6. ábra A nagyolvasztó hűtési modellje beépített hűtőszerelvény esetén

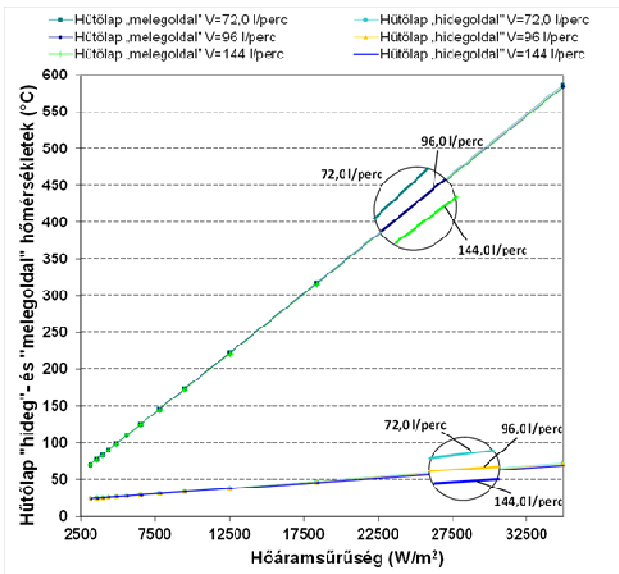
A hőátadási modellen feltüntetett jelölések értelmezése:

- T_{km} - a nagyolvasztó-munkatér hőmérséklete a vizsgált hűtőlap környezetében
- T_{tap} - a tapadványréteg nagyolvasztó munkatér irányába eső felületi hőmérséklete
- T_1 - a samott tűzálló falazatnak a tapadvány irányában eső felületi hőmérséklete
- T_2 - a vizsgált hűtőlap hűtőbordái között elhelyezkedő samott tűzálló falazat irányába eső felületi hőmérséklete
- T_3 - a vizsgált hűtőlap „melegoldali” hőmérséklete
- T_4 - a vizsgált hűtőlap „hidegoldali” hőmérséklete
- T_{vbe} - a vizsgált hűtőlapba belépő hűtővíz hőmérséklete
- T_{vki} - a vizsgált hűtőlapból távozó hűtővíz hőmérséklete
- S_1 - a samott tűzálló falazat rétegvastagsága

- S_2 - a samott tűzálló falazat rétegvastagsága
- S_3 - a samott tűzálló falazat és a vizsgált hűtőlap közötti massa rétegvastagsága
- α_1 - a hőátadási tényező a nagyolvasztó munkaterében
- λ_2 - a samott tűzálló falazat hővezetési tényezője
- λ_3 - a samott tűzálló falazat és a vizsgált hűtőlap közötti massa hővezetési tényezője
- k_4 - a vizsgált hűtőlap hőátviteli tényezője (konstrukciós alapadat)
- A_{hl} - a hűtőlap felülete
- q - hőáramsűrűség

A hőátadási modellszámításhoz szükséges adatokat speciálisan - az akna alsó részén található 10/17 sz. hűtőlapra - kiépített mérési rendszerrel és szakirodalmi adatok felhasználásával határoztam meg.

A kutatási feladatnak megfelelően különböző mértékű hűtővíz-térfogatáramra modellszámítás végeztem, annak érdekében, hogy a hűtővíz intenzitás hatását vizsgáljam a tapadványképződési folyamatokra (7. ábra). Megállapítottam, hogy azonos hőáram-sűrűségek mellett sem a hűtőlapok „meleg”- sem a „hidegoldalán” jelentős mértékű hőmérséklet eltérések nem mutatkoznak. (A hűtőlap „melegoldal”, a hűtőlap nagyolvasztói munkatér irányába mutató, míg a „hidegoldal” a kohópáncél irányába eső oldala).



7. ábra A nagyolvasztó akna alsó részének hűtési modellel számított hűtőlap „meleg”- és „hidegoldali” hőmérsékleti értékek különböző hőáram-sűrűségek és hűtővíz-térfogatáramok mellett

A falazaton, (hűtőlapon) bekövetkező tapadványképződési folyamatot - többek között - a hűtőlap „melegoldal” hőmérsékleti viszonyai határozzák meg. Mivel a fentiekből az a következtetés vonható le, hogy a hűtővíz-térfogatáram változtatása csupán kismértékben befolyásolja a hűtőlapok „hideg”- és „melegoldalának” hőmérsékletét, így a tapadványképződési folyamatban betöltött szerepe is csekély mértékű.

A nagyolvasztó akna alsó részére az általam kidolgozott hőátadási modell felhasználásával, kizárólag mért paraméterek segítségével (hűtőlap „hidegoldal” hőmérséklete, hűtővíz-térfogatáram, hűtővíz belépő és -kilépő hőmérséklet) meghatároztam a nagyolvasztó akna alsó részén elhelyezkedő hűtőlapokon kialakuló tapadványréteg vastagságát. A kétféle módszer szerint számított - példaként feltüntetett - tapadványréteg vastagság értékeket az **2-3. táblázat** mutatja be.

2. táblázat A hűtőlap „hidegoldali” mért hőmérsékletek alapján a hőátadási modell segítségével meghatározott tapadvány vastagságok

Hűtőlap „hidegoldal” hőmérsékletek (°C)	Tapadvány vastagsága (mm)
24,0	424,4
33,0	143,6
43,0	43,1
52,0	14,6
77,5	0,7

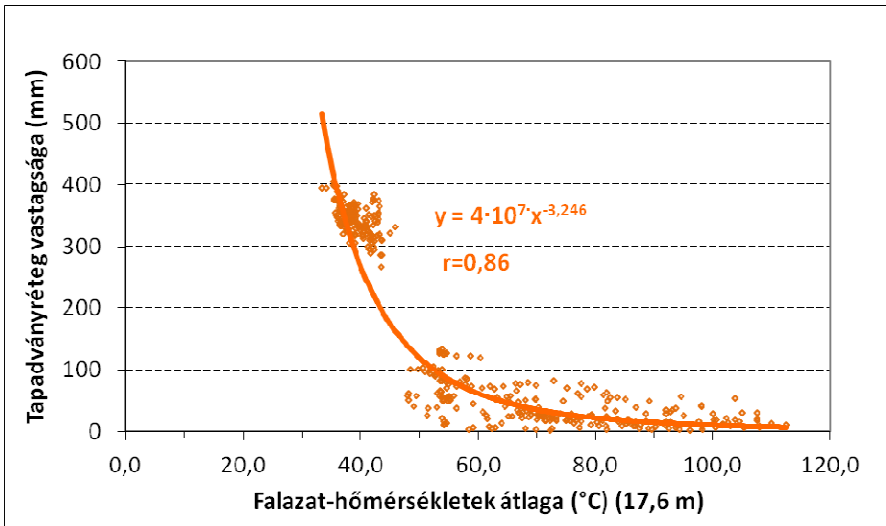
3. táblázat A hűtőlap hűtővizének mért jellemzői alapján (mennyiség, belépő és távozó hőmérséklet) hőátadási szimulációval meghatározott tapadványvastagságok

Hűtővíz hőmérséklet különbsége (°C)	Tapadvány vastagsága (mm)
0,7	482,8
2,0	172,1
4,1	32,5
5,5	10,7
9,0	0,7

A **2-3. táblázat** a különböző módszerrel, de ugyanazon mérési és szimulációs peremfeltételek mellett meghatározott tapadvány vastagságot mutatják. Az eredmények összehasonlítása azt mutatja, hogy mindkét módszer alkalmas eszköz lehet a tapadványok vastagságának meghatározására.

Megvizsgáltam a hűtőlap(ok) „hidegoldal” hőmérsékleteinek, és az azonos szinten (17,9 és 17,6 m) mért falazat-hőmérsékletek közötti korrelációs összefüggést, amely igen szoros ($r=0,88$) kapcsolatot mutat. Korábban - a hűtési modell alapján -

a hűtőlap(ok) „hidegoldal” hőmérsékletekből számított tapadványréteg vastagságot a vonatkozó falazat-hőmérsékletekkel együtt vizsgálva a **8. ábrán** látható összefüggést kaptam.



8. ábra Az akna alsó rész (≈ 18 m) falazat-hőmérsékletek és az ott létrejött tapadványvastagság összefüggése

A fenti ábra két pontserege a vizgálatra kiválasztott két periódust (kedvezőtlen és kedvező gázáramlási időszakok) jellemzik.

Így a rendelkezésre álló és egyszerűbben mérhető, vagy legmegbízhatóbb bázisértékeket biztosító paraméterek (hűtőlap- vagy falazat-hőmérséklet) megválasztásával (esetleg ellenőrzés végett mindkettő figyelembevételével) nyomon követhető a tapadványképződés, ill. –leválás folyamata.

IV. Új tudományos eredmények

A doktori kutatómunka alábbi tézisekben megfogalmazott eredményeinek egyik bázisinformációja és egyben a nagyolvasztói vizsgálatok során használt magassági tartomány kijelölésének helyességét bizonyítja, az átépítésre leállított és kitisztított (ISD DUNAFERRR I.sz.) nagyolvasztóban végzett vizuális vizsgálatnak az alábbi megállapítása. E szerint **jelentős mértékű tapadvány az akna alsó részén és a szénphában helyezkedik el, míg az akna középső részén csak kismértékű, a felsőbb tartományban pedig lényegében nincs tapadványképződés** (III. fejezet, 4. ábra).

1. *A nagyolvasztó akna alsó részéből származó tapadványmintákon elvégzett kémiai elemzések, valamint ásványtani vizsgálatok a tapadványok réteges felépítését bizonyítják. A szövettani elemzések pedig kimutatták, hogy azokban Ca-szilikátos és magnezioferrit szemcsékkel, továbbá wüstites kompakt vasszemcsékkel, valamint Ca-ferrátos szemcsékkel jellemezhető tipikus szövetek helyezkednek el, gyakorta átmeneteket alkotó, vegyes felépítésben, jelezve a tapadványképződés időben elhúzódó, szakaszokra bontható folyamatát.*
2. *A tapadványképződés szempontjából kiemelkedő jelentőségű nagyolvasztó-tartományban - azaz a kohézív zóna lábátának a szolidusz hőmérsékletet jelző harangfelülete és az akna alsó része által határolt nagyolvasztó-zónában (a vizsgált nagyolvasztóban 16,0, 17,6 és 20,8 m) - a gázkihasználás (η_{CO}) a falazat-hőmérséklet (T_{fal}) emelkedésével növekszik, az alábbi matematikai formulák szerint (II. fejezet, 2. ábra):*

$$(16,0 \text{ m magasságban}) \quad \eta_{CO} = 6,8401 \cdot \ln T_{fal} + 9,8147 ; \% \quad r = 0,71$$

$$(17,6 \text{ m magasságban}) \quad \eta_{CO} = 7,5805 \cdot \ln T_{fal} + 9,3861 ; \% \quad r = 0,67$$

$$(20,8 \text{ m magasságban}) \quad \eta_{CO} = 5,1061 \cdot \ln T_{fal} + 18,184 ; \% \quad r = 0,58$$

A szoros eredményeket produkáló három függvény adatmezéjének kumulatív és ezzel általános érvényűnek tekinthető függvényegyenlete a következő:

$$\eta_{CO} = 7,0821 \cdot \ln T_{fal} + 9,7821 ; \% \quad r = 0,76$$

3. *A nagyolvasztó akna-alsó rész falazatának és az azonos szinten beépített hűtőlapok „hidegoldali” hőmérsékletei (T_{fab} T_{hl}) azonos irányú változásainak felismert összefüggés-rendszerét, a falazat-hőmérsékletek meghatározására, vagy ellenőrzésére alkalmas*

$$T_{fal} = 1,3181 \cdot T_{hl}^{1,0514} \quad r = 0,88$$

matematikai függvény fejezi ki.

4. A tapadványréteg vastagságának (s_t ; mm) meghatározására a vizsgálat az akna-alsórész hűtőlapjának „hidegoldali” hőmérséklete (T_{hl} ; °C) függvényében az

$$s_t = 7633,3 \cdot e^{-0,1204 \cdot T_{hl}} ; \text{mm} \quad r = 0,90$$

az akna-alsórész falazat-hőmérsékletének (T_{fa} ; °C) függvényében az

$$s_t = 4 \cdot 10^7 \cdot T_{fa}^{-3,246} ; \text{mm} \quad r = 0,86$$

a hűtővíz-hőmérséklet (T_{em} ; °C) emelkedési mértékének növekedése függvényében pedig az

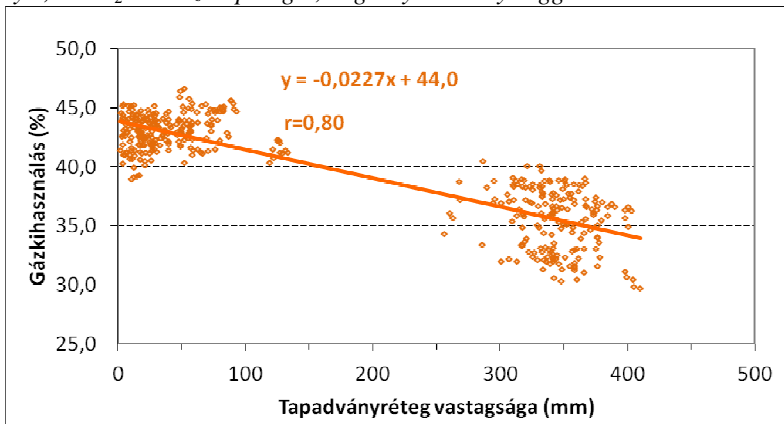
$$s_t = 841,41 \cdot e^{-0,7934 \cdot T_{em}} ; \text{mm} \quad r = 0,88$$

matematikai formulát eredményezett, mint a meghatározás kizárólagos, nem invazív lehetőségét.

5. A tapadványréteg vastagságának (s_t ; mm) növekedése jelentősen csökkenti a gázkihasználás (η_{CO} ; %) mértékét, a vizsgálatok egyik eredményeként meghatározott

$$\eta_{CO} = -0,0227 \cdot s_t + 44,001 ; \% \quad r = 0,80$$

matematikai formula szerint, melynek megfelelően a tapadványréteg vastagságának minden 10 mm-es növekedése a CO-kihasztást 0,227 %-kal csökkenti, következésképpen a fajlagos kokszfogyasztást 1,6 kg/t nyv., a CO₂-emissiót pedig 5,2 kg/t nyv. mennyiséggel növeli.



6. *Az aknafalazat alsó részén lejátszódó tapadványképződési folyamat a hűtővíz-térfogatáram lehetséges mértékű változtatásával gyakorlatilag nem szabályozható, minthogy azonos hőáramsűrűségek mellett, a hűtőlappalnak sem a „melegoldali” sem a „hidegoldali” hőmérsékletei nem változnak számottevően, és a közöttük lévő különbség is csak a konstans hőáramsűrűség fenntartásához szükséges, csekély mértékben csökken (IV. fejezet, 7. ábra).*
7. *Az elegyfelszín felett radiálisan mért gázhőmérsékleteknek a nagyobb CO-kihasználásra, illetve kisebb tapadványterhelésre vonatkozó értékei kisebbek, mint a kisebb CO-kihasználáshoz, azaz nagyobb tapadványképződéshez tartozó gázáram hőmérsékletei. Jelezve ezzel, hogy a kedvezőbb gázkihasználás mellett – ugyanazon kinetikai hatás következtében – a gáz hőhasznosulása is nagyobb mértékű, megerősítve egyben a CO-kihasználásra vonatkozó eredmények helyességét (II. fejezet, 3. ábra).*
8. *A tapadványképzést támogató K-, Na- és Zn-elemek időegységre (pl. 1 hónapra) meghatározott anyagmérleg-egyenlete annak függvényében pozitív vagy negatív irányban eltér az egyenlőségtől, hogy milyen mértékben képződik vagy válik le tapadvány a nagyolvasztóban. A jelzett elemek számottevő mértékű távozása salakkal (főleg K és Na), illetőleg torokgázzal (Zn) tapadványleépülésre, bennmaradása pedig tapadványképződésre utal, ami az elemek mennyiségének kumulatív ábrázolása alapján nyomon követhető (III. fejezet, 5. ábra).*

V. Az értekezés tudományos eredményeinek jelentősége és hasznosításuk lehetőségei

A tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények újszerű információkkal bővítik a nyersvasgyártás tapadványképződéssel és annak gázkihasználással kapcsolatos ismereteit.

Kutatásom során, mind vizuális, mind statisztikai vizsgálatok segítségével egyértelműen bebizonyítottam, hogy a nagyolvasztó akna alsó részén elhelyezkedő tapadványréteg vastagságának kiemelkedő jelentősége van a gázkihasználásra. Minél kisebb a tapadványréteg vastagsága, annál nagyobb lesz a gázkihasználás mértéke. Mindez főként a tapadványréteg okozta keresztmetszet szűkülés gázsebességet növelő hatásának tulajdonítható, amelyet a nagyolvasztói anyagoszlop felett mért gázhőmérséklet értékek is bizonyítanak (1., 2., 5., 10., 11. tézis). A tapadványréteg vastagságának megállapítására vonatkozólag különféle nem invazív módszereket dolgoztam ki, melyek újszerű megoldásnak értékelhetők (3-4. tézis) és hozzájárulnak a tapadványképződés kezdeti lépéseinek mielőbbi felismeréséhez, illetve a megakadályozásához szükséges technológiai beavatkozások időbeni érvényre juttatásához.

Ezek az ismeretek hasznosnak bizonyulhatnak minden nagyolvasztót üzemeltető vállalatnál, ahol tapadványképződéssel kapcsolatos problémák lépnek fel. Az ipar számára kiemelt jelentőséggel bír a gazdaságosság, az önköltség. Ennek egyik fontos befolyásoló paramétere - a nyersvasgyártás területén - a fajlagos tüzelőanyag felhasználás, melyet nagymértékben meghatároz a gázkihasználás mértéke. Minél nagyobb mértékben használjuk ki a redukáló gáz metallurgiai energiáját, annál kisebb lesz a fajlagos tüzelőanyag felhasználás mértéke. Természetesen környezetvédelmi szempontból is alapvető fontosságú a gázkihasználás mértéke, mivel a nagyobb fajlagos kokszfelhasználás esetén a fajlagosan kibocsátott CO₂ is nőni fog. Tehát a kutatási eredményeim mind gazdaságossági, mind környezetvédelmi szempontból kiemelkedő jelentőségű lehet a kohászat számára.

A nagyolvasztói falazaton elhelyezkedő tapadványokból kivett minták kémiai és ásványfázis vizsgálata egyértelműen bebizonyította, hogy a tapadványok többnyire réteges felépítésűek, melyekben jól meghatározható struktúrák követik egymást. Ilyen típusú vizsgálatokat hazai nagyolvasztókból származó tapadványmintákon eddig még nem végeztek el (6-7. tézis).

A nagyolvasztók hűtési intenzitásának vizsgálatához kifejlesztett hőátadási modell segítségével megállapítottam, hogy a tapadványképződést a hűtővíz hőmérsékletének változtatásával lényegében nem szabályozható (8-9. tézis). A modell felállítása elengedhetetlen volt a tapadványréteg vastagságra vonatkozó összefüggés felállítására. A hőátadási modellben a különféle tűzálló anyagok típusa és hűtőlapp konstrukciók változtathatók, így lényegében minden hűtőlappal felszerelt nagyolvasztónál alkalmazható.

A tapadványképző elemekre elkészített pontos anyagmérleg kumulatív ábrázolásával a nagyolvasztó üzemeltetők hasznos információkhoz jutnak az üzemeltetésre vonatkozólag, melyek elősegítik a nagyolvasztó egyenletes működtetését (*12. tézis*).

A fenti eredmények jelentősen gazdagítják az egyetemi oktatás tananyagát is.

VI. Summary

Investigation for the aggregation effect of the Blast Furnace lining cooling intensity, accretion forming process and the metallurgical efficiency of the upward BF gas.

The alkali and zinc, which are charged into the blast furnace with burden, have several harmful effects; but above of all, they take part in the blast furnace accretion forming process. There are many opinions for accretion creation mechanisms. However, the effect of accretion for gas flowing and CO-efficiency are not well known.

The dissertation investigates the impact of blast furnace lining cooling intensity and accretion created on the shaft wall for BF gas metallurgical efficiency. The investigations with regard to CO-efficiency were carried out at BF2 in ISD DUNAFERR Co. Ltd. under different conditions for the extent of accretion on the shaft wall.

For analysis, a heat transfer model was created that can be adopted for defining the cooling stove “cold-side” temperature in the view of accretion heat conductivity. Based on lining temperatures, the thickness of the accretion layer on the shaft can be determined. The accretion samples were taken from BF1, which was shut down for relining.

BF shaft’s stove cooling water measuring system was installed at the down part of the stack, for collecting temperature and volume data of cooling water, in order to investigate the effect of cooling water volume for accretion creation. Regarding the heat transfer model and the data collected from stove cooling water; it can be said that the cooling water volume did not have a significant effect on the lining temperature. This means that accretion formation is not controlled with the modification of the stove cooling water volume.

Examinations were covered for the connection between BF gas CO-efficiency and accretion layer thickness. More than 6000 items of data were collected as the BF database under the blast furnace two - significant different - test periods. Having made statistical analyses (factor analysis and Spearman rank correlation) with the collected data; the results demonstrate that the solidus curve of cohesive zone and its perpendicular projection for lining creates a shaft zone volume that has significant effect for BF gas CO-efficiency. In the case where accretion is formed in this zone, it significantly reduces the BF gas CO-efficiency. A 10 mm increase of accretion thickness causes a 0,23 % reduction of BF gas CO-efficiency. The main reason is, firstly, the indirect reduction with CO takes place in the nominated zone and secondly, because of the cohesive zone, the cross-section in this zone is tighter; thus, the accretion formed reduces further the free cross-section. That is why the BF gas velocity increases, therefore, because of the time factor, the CO-efficiency decreases.

Because of the above mentioned, the control of accretion forming is important basically for the BF operators in view of the energetic and environmental aspects.

Accretion samples taken from BF1 were analysed with X-ray powder diffractometry, SEM and XRF. The results show that the accretion was formed layer by layer. The texture analysis of accretion shows that typical textures (Ca-silicate with Mg-ferrite grains, wustite with compact Fe grains and Ca-ferrite) which are varied one after the other.

VII. Az értekezés témakörében és ahhoz kapcsolódóan megjelent publikációk

Cikkek folyóiratokban:

1. *Móger Róbert, Titz Imre, Cseh Ferenc* 2010.03.
Az I.sz. kohó torokzáró berendezésének cseréje az ISD Dunaferr Zrt. Nagyolvasztóművénel.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.1, 2010.
pp. 3-6.
2. *Móger Róbert, Cseh Ferenc, Titz Imre* 2010.06.
A Nagyolvasztómű történeti áttekintése (1954-2009).
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.2, 2010.
pp. 55-61
3. *Móger Róbert, Rokszin Zoltán* 2012.03.
A kohói tapadványképző elemek hatása a nyersvasgyártási folyamatokra, valamint lehetséges eltávolításuk a nagyolvasztóból a megfelelő minőségű nyersvas fenntartása mellett.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.1, 2012.
pp. 32-40.
4. *Móger Róbert, Pallósi József* 2012.06.
Az Európai Bizottság Szén- és Acélipari Kutatási Alapjának tevékenysége.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.2, 2012.
pp. 98-103
5. *Móger Róbert, Titz Imre, Cseh Ferenc* 2012.09.
A nagyolvasztói fúvóformák élettartam-növelése (ExTuL) projekt kezdeti lépései.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.3, 2012.
pp. 152-155.
6. *Móger Róbert, Rokszin Zoltán* 2012.11.
A kohókba jutó kén, alkáliák és a cink eltávolításának metallurgiai lehetőségei.
Bányászati és Kohászati Lapok. 145. évfolyam. No.5, 2012.
pp. 1-7.
7. *Farkas Ottó, Móger Róbert, Cseh Ferenc, Titz Imre* 2012.12.
A nagyolvasztói fúvóforma-eróziós folyamatok oksági összefüggései.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.4, 2012.
pp. 211-215

8. *Móger Róbert, Tardy Pál* 2012.12.
Acélipari porok és iszapok hasznosítása.
 ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.4, 2012.
 pp. 216-222
9. *Farkas Ottó, Móger Róbert* 2013.06.
Vasmetallurgia alapjai.
 Elektronikus tankönyv.
10. *Farkas Ottó, Móger Róbert* 2013.07.
A nagyolvasztói fúvóforma-eróziós folyamatok fémtani vonatkozásai.
 ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.2, 2013.
 pp. 70-76.
11. *Móger Róbert, Cseh Ferenc, Titz Imre, Gönczi Pál* 2013.09.
A nagyolvasztói fúvóformák élettartam-növelése (ExTuL- projekt). (Beszámoló a projekt felénél).
 ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.3. 2013.
 pp. 115-122.
12. *Farkas Ottó, Móger Róbert, Csepeli Zsolt, Magyar Zsuzsanna* 2013.10.
A nagyolvasztói fúvóforma-eróziós folyamatok körülményeinek vizsgálata.
 Bányászati és Kohászati Lapok. 146. évfolyam. No.3, 2013.
 pp. 1-7.
13. *Ottó Farkas, Róbert Móger* 2013.11.
Metallographic aspects of Blast Furnace tuyere erosion processes.
 Steel Research, Vol. 84, No. 11, 2013. pp. 1171-1178.
14. *Móger Róbert* 2013.12.
Átépítésre leállított nagyolvasztóban a kialakult tapadványok vizsgálata.
 Bányászati és Kohászati Lapok. 146. évfolyam. No. 5-6, 2013 pp.6-12.
15. *Móger Róbert* *Megjelenés alatt*
A nagyolvasztó akna részében elhelyezkedő tapadványok hatása a gázkihasználásra.
 ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.1. 2014.