

Szegkohósító kísérletek – nyersvasgyártás kicsi bucakohóban, metallurgiai folyamatok és a felszenülés magyarázata

Thiele Ádám – a Bucavasgyúrő
2023.05.02.

1. Bevezetés

Az elmúlt kb. 20 évben elvégzett próbakohósításaim során, attól kezdve, hogy sikerült vasércből vasat előállítani, munkám fókuszába az került, hogyan lehetne befolyásolni a kapott vasanyag kémiai összetételét. Természetesen a kapott vasanyag mennyisége, azaz a vaskihozatal is mindig lényeges kérdés volt, a vasanyag minősége (első sorban a sok rosszminőségű, első sorban nagy foszfortartalmú somogyi gypvasércek kohósításainak kiábrándító eredményei, a sokszor kovácsolhatatlanul nagy szennyezőtartalmú, használhatatlan vasanyagok miatt) talán még fontosabb volt. Bár először a foszfor okozta technológiai problémával szembesültem és a vasbuca foszfortartalmának befolyásolására kerestem majd találtam is ilyen-olyan megoldásokat (pl. ld. ezt a posztot: [1]), újabban (kb. 5 éve, mióta lehetőségem van a gypvasércekhez képest sokkal jobb minőségű, szennyezőket nem, vagy csak kis mennyiségben tartalmazó a Mátrában, a Bükkben és a Zemplénben talált konkrécios-, hidrotermális- és vaskalapérceket is kohósítani) került a látókörömbbe a vasbuca széntartalmának befolyásolása.

A vasbuca széntartalmának befolyásolása lényegesen egyszerűbb problémának tűnik, mint a foszfor-kérdés, ugyanis a vasbuca széntartalmának módosítási lehetőségeihez elegendő lenne a bucaaskohászat metallurgiai viszonyait a Fe-O-C hármas rendszerre vonatkozóan értelmezni (a foszfor és más szennyezők, pl. arzén és réz, ehhez bonyolódnak hozzá negyedik, ötödikként), ill. alaposan megérteni. Számos olyan kísérletet végeztem el konkrécios és vaskalapércekkel (Göncről és Rudabányáról gyűjtött vasércekkel), amelynek célja az volt, hogy a kapott vasbuca széntartalmát befolyásoljam, azaz kedvem szerint lágyvasat vagy acélt tudjak az adott ércből előállítani (pl. ld. ezt a posztot: [2]). A kísérletek eredményeinek kiértékelését nagyban megnehezítette azonban, hogy felismertem, a vasbuca, így a belőle kikovácsolt vastömbben a maratással láthatóvá tett széneloszlás rendkívül heterogén. Emiatt hiába tesszük láthatóvá a vastömb akár négy oldalán is a széneloszlást, a felület nem biztos, hogy az reprezentálja a teljes térfogatot. Később rájöttem arra, amit régiek is megtettek, amit a pl. az acélt tartalmazó régi pengék metallográfiai vizsgálata során gyakran látni lehet, hogy a nemcsak a salakzárványosság csökkentése, de a széntartalom homogenizálása is lehetséges a kapott vastömb többszöri hajtogatásával, kovácshegesztésével, bár ez meglehetősen munka és időigényes. A homogenizált vastömbön pedig a célszerűbb keménységet mérni (pl. Hrc), mintsem maratni, és inkább a keménységből széntartalmat becsülni. Bár ennek ellenére is megfigyelhető volt összefüggés a kapott vasbuca széntartalma és a technológiai paraméterek között (minél nagyobb befűjt levegőmennyiséggel és faszén/vasérc aránnyal kohósítunk, annál nagyobb lesz a vasbuca széntartalma), igazán nagy széntartalmú acélt (amelyben átlagosan $C\% > 0,5$) nem sikerült sohasem előállítani. Kialakult egy olyan sejtésem, hogy amíg a kis bucakohóban nem áll elő folyékony nyersvas is a szilárd vasszivacs mellett, addig nem is lehet igazán nagy széntartalmú vasanyagot nyerni. Tehát a korábbi kísérletek két nagy hiányossága a nem megfelelő kiértékelés és a kapott bucak viszonylag kicsi széntartalma voltak. Emellett nem sikerült részleteiben értelmezni a vasbucakohászatban a vasanyag felszenülési, cementálódási folyamatait, azaz a Fe-O-C hármas rendszerben zajló metallurgiai folyamatokat.

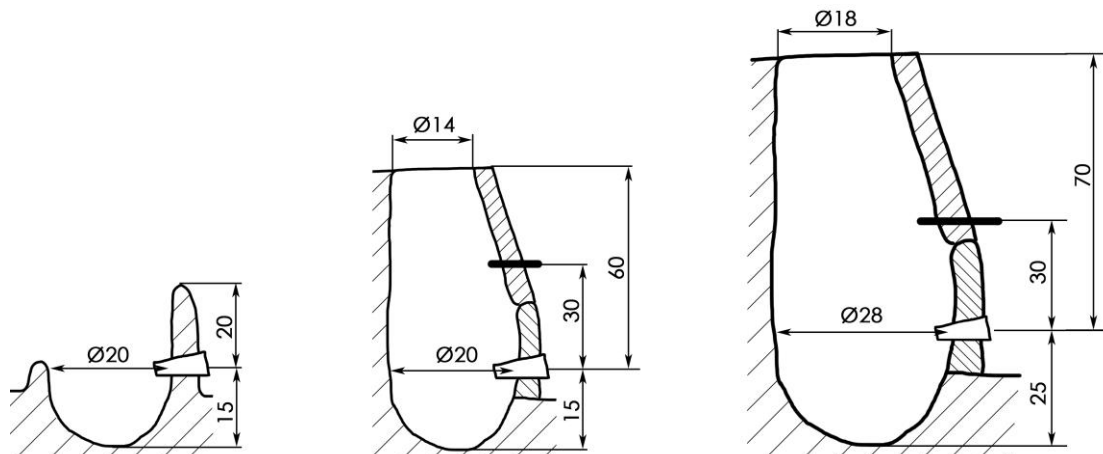
Kb. másfél éve kezdtem el szegekkel kísérletezgetni (65-80-as szegekkel). Először szegeket hegesztettem össze oldalszeles kovácstűzben (az erről szóló cikk megjelenés alatt [3]), majd a szegek kohósításával próbáltam ismét megoldani a vasbuca széntartalmának befolyásolását. Már az első szegkohósító kísérletek során látható volt, hogy ezzel a módszerrel el lehet jutni vasanyag felszenítésével a kisméretű bucakemencében is a nyersvasig. Emellett a szegekkel elvégzett kísérletek jó modellkísérletnek tekinthetők, ugyanis a kohóba levegőn és faszéneken kívül csak jól ismert kémiai összetételű és geometriájú betétanyag kerül a vasszegek formájában, így a kohóban zajló metallurgiai folyamatok sokkal jobban értelmezhetővé válnak (a vasércek változatos kémiai összetétele, szemcsemérete, stb. sokat bonyolítja a képet). Ezekben a szegkohósító kísérletekben (a szilárd közegű cementálásnál szokásos módon) a szegek tulajdonképpen egyfajta próbapálcának is tekinthetők, amelyekkel karbonpotenciált mérünk. Tehát segítségükkel a különböző technológiai paraméterek és kohógeometriák karbonpotenciálra gyakorolt hatása válik szemléletes és egyszerű kísérletekkel vizsgálhatóvá, és ez a Fe-O-C hármas rendszerben zajló metallurgiai folyamatok jobb értelmezését is lehetővé teszi. Meg kell jegyezni továbbá, hogy a kor technológiai színvonalán a nagy széntartalmú acél nagy mennyiségben történő előállítására a kapott vasanyag újrakohósítása egy meglehetősen triviális, és egyszerűbb megoldás a jóval kisebb mennyiségű acélt adó, felszenülést csak a felületi rétegekben okozó, zárt közegben végzett cementáló módszerek helyett.

2. Módszerek és eredmények

2.1. A kísérletek leírása

Összesen 20-25 szeghegesztő és szegkohósító kísérletet végeztem el, de ezek közül a részletes értékelésbe csak 9-et vonok be. A szeghegesztő kísérleteket oldalszeles kovácstűzhelyben, a szegkohósítókat egy kisebb (az imolaihoz

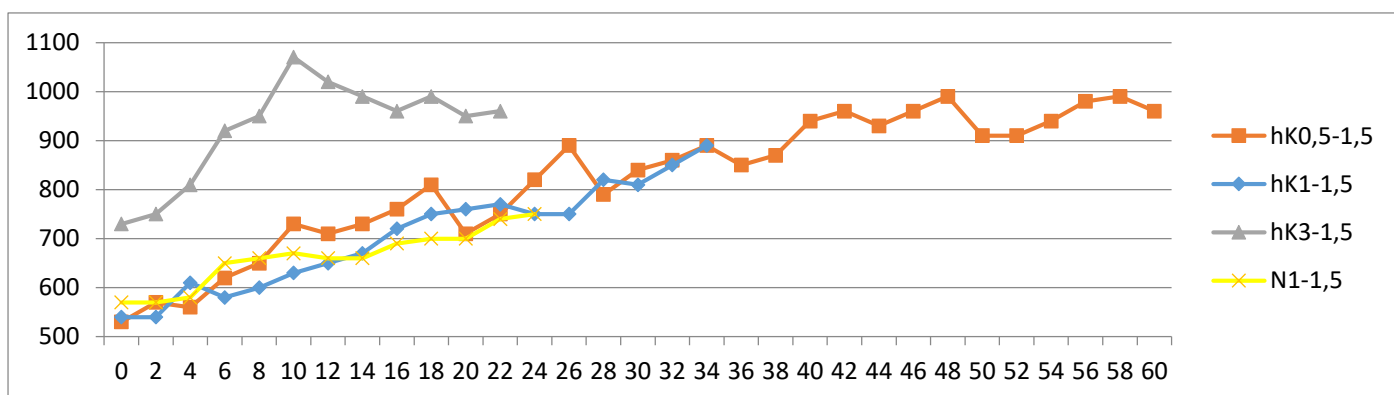
hasonló) és egy nagyobb (a somogyfajsi kohókhoz hasonló) méretű kohókban végeztem el (ld. 1. ábra). A kisebb kohó fúvósíkja és medencéje az oldalszeles kovácstűzhelyével megegyező méretű volt, míg a nagyobb kohó méretei kb. 40%-kal haladták meg a kisebbét. A fúvóka belső átmérője mindig 25mm volt. Az itt bemutatandó kísérletek közül 7-et a kiskohóban végeztem el, 3 esetben rövid előfűtéssel, „hideg” kohóval 4 esetben pedig hosszú előfűtéssel, „meleg” kohóval. Egy-egy kísérlet történt összehasonlításuként oldalszeles kovácstűzben és a nagyobb kohóban. A kohókon a fúvósík felett 30cm-es magasságban hőmérsékletmérési pontot alakítottam ki. A hőmérsékletet a homlokfal belső oldalától kb. 3cm-es távolságban mértem Ni-CrNi termopárral. Az egyes kísérletek technológiai szempontból lényeges adatit az 1. táblázat foglalja össze. A hőmérsékletmérési eredmények a 2. ábrán láthatóak, a 3. ábra pedig a kiskohót mutatja üzem közben és a betétanyagokat.

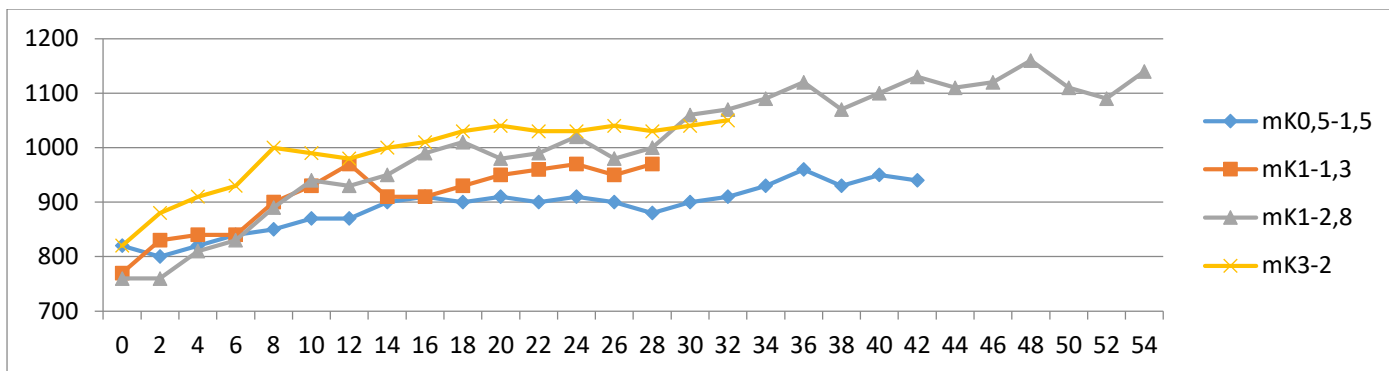


1. Ábra: A szeghegesztő és szegkohósító modellkísérletek kovácstűzhelye és kohói

1. Táblázat: A kísérletek fontosabb technológiai adatai

Sorszám	Kovácstűz	Kiskohó							Nagykohó
		hK0,5-1,5	hK1-1,5	hK3-1,5	mK0,5-1,5	mK1-1,3	mK1-2,8	mK3-2	
Dátum	23.04.15/1	23.04.14/1	23.04.15/3	23.04.14/2	23.04.20	23.04.18	23.04.19	23.04.22	23.04.15/2
Szeg (kg)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3	2,8	2	1,5
Levegő	1 (150l/p)	0,5 (50l/p)	1 (150l/p)	3 (250l/p)	0,5 (50 l/p)	1 (150l/p)	1 (100l/p)	3 (250l/p)	1 (150l/p)
Előfűtés: fa + faszén (p)	15+15	30+15	15+15	15+15 (meleg kohóval indul)	65+25	45+15	55+15	60+20	30+30
Adagolás (p)	30	65	35	20	45	30	65	35	30
Lefűjtetés (p)	15	55	45	25	45	40	30	20	60
Buca (kg)	1,29	1,31	1,55	1,24 + 0,37(ny)	1,49	1,17	2,98	2,09 + 0,1(ny)	1,40+0,16(ny)
méretei (cm)	10x8x8	9x11x10	11x11x10	10x10x9	12x11x9	10x11x10	18x12x10	12x13x11	14x12x10
Nyersvas aránya	0	0	0,3	0,7	0,2	0,9	0,5	0,9	0,9



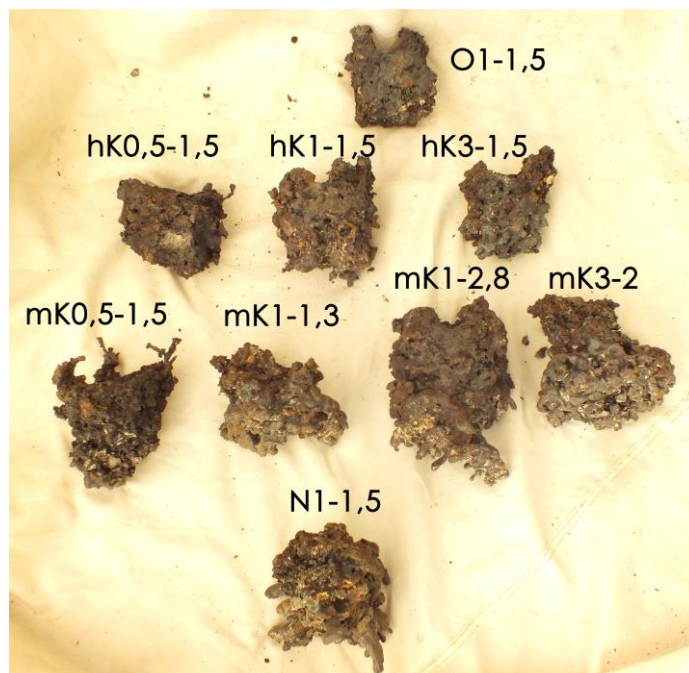


2. ábra: Hőmérsékletek az aknában az adagolási szakaszban



3. ábra: A kiskohó üzem közben a centrifugál ventilátorral és felette a hőelemmel (balra), a kimért betétanyagok 400g faszén joghurtos vödrökben és 200g szeg konzervesdobozokban.

A kísérletek fával majd faszénnel történő előfűtéssel kezdődtek (előfűtési szakasz). Ezután az előre kimért faszenet és szegeket 400 ill. 200g-os adagokban adagoltam (adagolási szakaszban), majd ezután az elegyszintet a fúvóka feletti kb. 15cm-es magassáig fújtattam le (lefújtatási szakasz). A szegek 70mm hosszúak és 3mm átmérőjűek voltak, és általában 1,5kg-os mennyiségben kohósítottam őket. A faszén 6-25mm-es szemcseméretű volt. A levegőbefúvás centrifugál ventilátorral történt, három különböző fokozat mellett, 0,5, 1 és 3-as fokozaton (ezek kb. 50, 150 és 250 liter/perces térfogatáramnak felelnek meg). A bontás után a kapott vasbucát óvatosan kivettem és szabad levegőn hagytam lehűlni. A kohó medencéjéből kiválogattam a salak és néha előforduló nyersvas darabkákat. A kohó medencéjében a bucától elkülönülő salakmedve ezekben a kísérletekben sosem jelent meg. A kísérletek eredményeképpen kapott 9 bucát a 4. ábra mutatja. A bucákban a lehűlés után szemrevételezéssel megbecsültem a nyersvas és a vasszivacs mennyiségét. A bucák többsége nyersvasat és vasszivacsot is tartalmazott néhány bucában csak vasszivacs, néhányban pedig szinte csak nyersvas volt (ld. az 1. táblázat utolsó sorát).



4. Ábra: A kísérletek eredményeképpen kapott 9 buca

2.2 Alapvető megfigyelések

A szegkohósító kísérletek többségénél a beadagolt szegek felszenülése olyan nagymértékben megtörtént, hogy a kapott vasbucában megjelent a nyersvas. A kapott vasbucák alaposabb szemrevételezésével jól elkülöníthető volt bennük a vasszivacs és a nyersvas az egyes kísérleteknél változó arányban. A vasszivacs felül, a nyersvas alul volt (ld. pl. az 5. ábrán a hK3-1,5-ös kísérlet vasbucáját közeli képeken bemutatva). Néhány (itt részletesen nem tárgyalt) kísérlet során a kohóbontáskor a felső vasszivacs könnyedén letört az alsó nyersvas blokkról. A vasszivacs fúvóka előtti vagy feletti része („vaskorona”) lazább, a fúvóka alatti része („mag”) tömörebb volt, ill. a vasszivacs fúvókához legközelebb eső részén gyakran megfigyelhető volt egy égési kráter (ezeket a megfigyeléseket már korábban, a szeghegesztős kísérletek kapcsán megtettük, ld. a [3]-ban a 3. ábrát). A vasszivacs megjelenésére jellemző volt a szokásos szemcsés, tüskés felület, ami arra utal, hogy a kohóban szilárd halmazállapotban volt, a nyersvas ezzel szemben a salakhoz nagyon hasonló, cseppes, fűrtös volt, lekerekített felületekkel. A nyersvasat a bucában néha nehezen lehetett megkülönböztetni a salaktól, ha a salak színe a nyersvaséhoz hasonlóan szürke volt, a vasszivaccsal viszont nem lehetett összetéveszteni. A kohó medencéjében gyakran voltak megtalálhatók a vasbucától elvált, lefolyt nyersvascseppek (ld. 6. ábra). Azokban a kísérletekben, amik majdnem teljesen csak nyersvasat adtak, a nyersvas kitöltötte a kohó medencéjének elülső fúvóka alatti részét és a nyersvas a salakmedvékhez hasonlóan részben felvette a medence aljának alakját (ld. 7. ábra).

Természetesen a vasfázison kívül salak is látható volt kisebb-nagyobb mennyiségben a bucákban. A salak színe a vasszivacsban jellemzően zöld, zöldes fekete vagy fekete volt, míg a nyersvasban zöldesszürke, szürke vagy szürkésfehér (ld. pl. az 5. ábra jobb oldali képén), esetleg némileg áttetsző. Ezek a színek mind összefüggnek a salak vastartalmával, a legtöbb vasat a fekete, kevesebbet a zöld és a legkevesebbet a szürkésfehér salak tartalmazza. Vasércek kohósításakor jellemzően jóval nagyobb vastartalmú salakok szoktak előállni, fekete vagy szürkésfekete törettel.



5. Ábra: A hK3-1,5 kísérlet vasbucája az oldalára fektetve: felül vasszivacs, alul nyersvas (balra). A vasszivacs és a nyersvas határa a vasbucában, a nyersvas szörke salakkal vegyülve (jobbra).



6. ábra: Nyersvas cseppek az N1-1,5-ös kísérletből



7. Ábra: A kohó medencéjének formáját felvett nyersvas az mK3-2 kísérletből

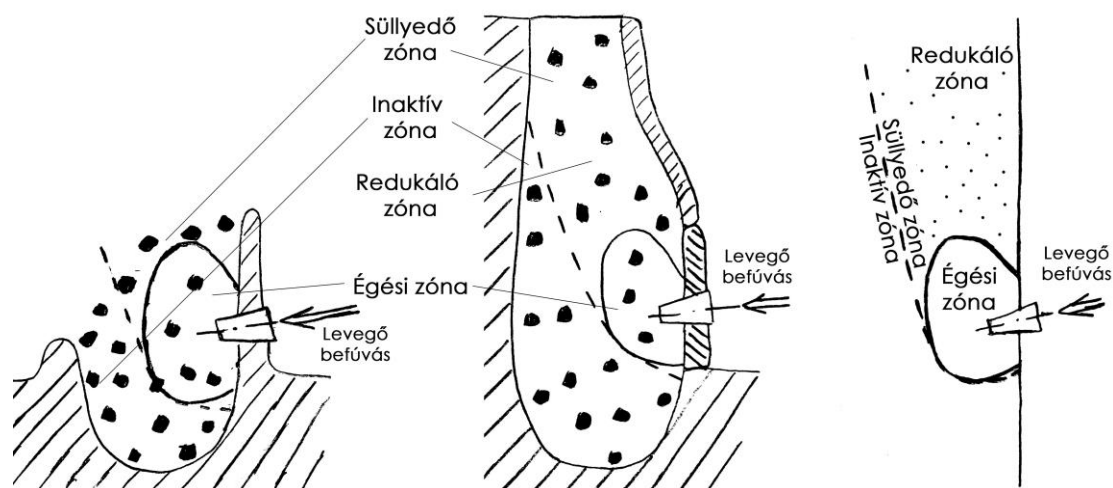
A vasszivacs és a nyersvasfázis felszenülttségével kapcsolatos anyagvizsgálati eredményeket részletesen itt most nem mutatom be, összefoglalóan ezekről annyit, hogy egy nyersvasminta metallográfiai vizsgálata alapján az perlites-ledeburitos szövetszerkezetű, kb. 3%-os C-tartalmú szürkeöntvényként volt azonosítható. A vasszivacs fázis

széntartalma azonban nem volt nagy, átlagosan kb. 0,5%-ra becsülöm. Ezt a becslést az alapoza meg, hogy néhány a korábbi, tavaly ősszel elvégzett szegkohósító kísérletben a nyersvasblokktól elvált vasszivacsot vastömbbé kovácsoltam és a felületen maratással láthatóvá tettem a szén eloszlását. Emellett edzett hőkezeltségi állapotban keménységméréseket is végeztem ilyen tömbökön. Egyelőre tehát a széntartalom vonatkozásában csak annyit állapítottam meg, hogy a nyersvasfázis néhány %-nyi, a szilárd halmazállapotban maradt vasszivacs fázis viszont csak pár tized %-nyi szént tartalmaz.

3. Az eredmények értékelése

3.1. Metallurgiai zónák

A kísérleti eredmények értékelése kapcsán elsődleges fontosságú, hogy magyarázatot adjunk arra, mi határozta meg a kapott vasbucákban a nyersvas és a vasszivacs arányát, ebből következően pedig arra, hogy a szegkohósító modellkísérletek során milyen metallurgiai folyamatok során ment végbe a vasanyag felszenülése.



8. Ábra: Metallurgiai zónák az oldalszeles kovácstűzben (balra) és a bucakohóban (középen) és sematikusan (jobbra)

Mindenek előtt tekintsük át az oldalszeles kovácstűz és a bucakohó főbb metallurgiai zónáit (8. ábra). Két fő térést különíthetünk el:

- 1) Inaktív zóna: ebben a faszén nem ég el, így ez a zóna mozdulatlan, metallurgiai folyamatok nem zajlanak benne, az atmoszférája redukáló/cementáló
- 2) Süllyedő zóna: ebben az elegy lefelé süllyed, a fúvóka felé halad, ebben a térrészben zajlanak a metallurgiai folyamatok

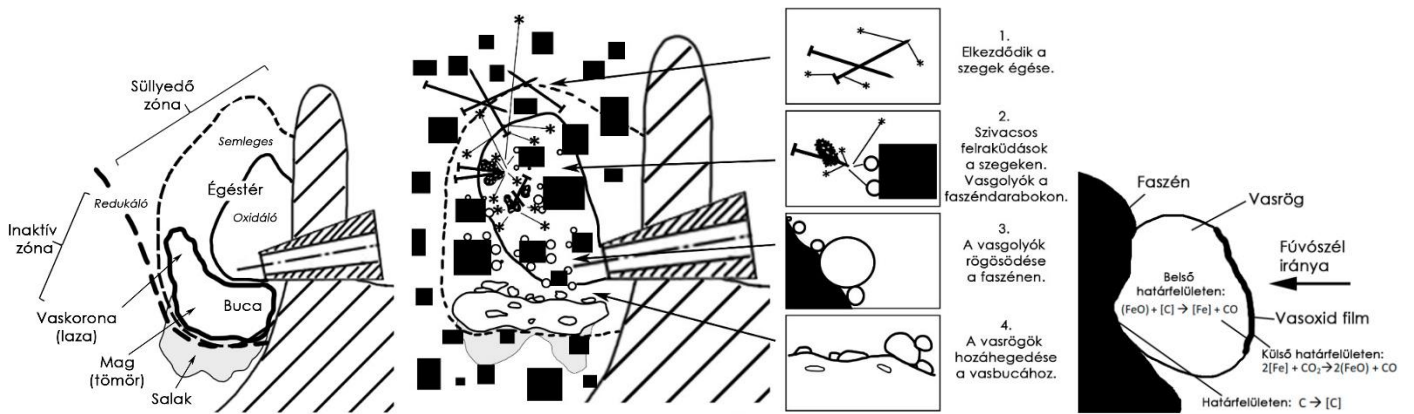
Az atmoszféra szempontjából a süllyedő zóna további két részre osztható:

- 2a) Égési zóna: az atmoszféra a faszénre nézve oxidáló, itt a faszén elég és ebben a térrészben alakul ki a legnagyobb hőmérséklet
- 2b) Redukáló zóna: az atmoszféra a faszénre nézve redukáló, azaz itt a faszén nem ég el, a hőmérséklet felfelé haladva csökken

Tulajdonképpen a kovácstűzhelyhez képest a bucakohó mindössze annyiban különbözik, hogy egy akna magasodik a fúvósík fölé, így felfelé kiterjedt redukáló zóna jön létre. A kovácstűzhely és a bucakohó metallurgiai zónái egyszerűsítve, sematikusan szemléltetve láthatók a 8. ábra jobb oldali kisképén.

3.2. A szeghegesztő modellkísérletek metallurgiai folyamatai (ismétlés)

Ezek után nézzük meg részletesen, hogy mi történik a kohóba beadagolt szegekkel. Az, hogy mi történik a redukáló zóna nélküli oldalszeles kovácstűzbe adagolt szegekkel korábban már bemutattuk, de mivel ennek a szegkohósító modellkísérletek kapcsán is nagy jelentősége van, ld. ezt a 9. ábrán. Az ábra bal oldali kisképén a vasfázis (és nem csak a faszén szempontjából) tekintve a fúvóka előtt kialakuló atmoszféraviszonyokat, elkülöníthetünk az égési térben egy semleges és egy oxidáló atmoszférájú zónát: a semlegesben a faszén még elég, de a vas már nem, az oxidálóban pedig a faszén és a vasfázis is elég. Az oxidáló zóna a fúvóka orrától mindössze pár cm-re, míg a teljes égési zóna 10-15-cm-re is kiterjed (felfelé talán még feljebb). Ezek a hozzávetőleges értékek 6-25mm-es szemcseméretű faszén és 25mm-es belső átmérőjű fúvókán keresztül beáramló pár száz liter/perces levegőtérfigatáram esetében állnak fent és nyilvánvalóan növekednek a befűjt levegő mennyiségének a növekedésével.



9. ábra: Atmoszféra viszonyok és a vasbucca helyzete az oldalszeles kovácstűzben (balra), főbb metallurgiai folyamatok az oldalszeles kovácstűzben a szeghegesztős modellkísérletek során (középen), a faszén felületén lévő vasgolyókhoz köthető metallurgiai folyamatok (jobbra)

Röviden áttekintve az oldalszeles kovácstűzben zajló metallurgiai folyamatokat elmondható, hogy a beadott vékony (3mm-es átmérőjű) szegek többsége teljes térfogatában elég. A nagy kiterjedésű redukáló zóna hiányában az elégés előtt jelentősebb cementálódás nem történik. A szegek elégése tökéletlen, a nagy mennyiségben keletkező olvadt vasoxid mellett vasszemcsék lökődnek ki (hiccelés). Ezek a vasszemcsék többnyire felrakódnak a faszéndarabokra és így a teljes elégéstől, vasoxiddá alakulástól megmenekülnek. A faszén felületén lévő vasgolyók olvadt állapotban vannak (bizonyíték erre a gömb alak és a színhőmérséklet). A vasgolyók az égési zónában a faszéndarabok égése miatt azok csökkenő felületén egymáshoz egyre közelebb kerülve egyesülhetnek, növekedhetnek (rögösödés). Ezek a még mindig olvadt vasrögök hegednek hozzá a fúvóka alatt a növekvő, szilárd halmazállapotú vasszivacsához, vasbuccához (nem diffúziós hegedés történik, hanem inkább a felrakó hegesztéshez hasonló folyamat játszódik le a vasszivacs tetején, amit olvadt vasoxid film borít).

3.3. A szegkohósító modellkísérletek metallurgiai folyamatai

Ezek után rátérhetünk arra, hogy milyen metallurgiai folyamatok eredménye képpen alakul ki a nyersvasat és vasszivacsot is tartalmazó vasbucca a szegkohósító modellkísérletek során. A vasbuccában megjelenő nyersvas/vasszivacs aránya a redukáló zóna és az égési zóna viszonyaitól függnek, ezeket pedig a technológiai paraméterek befolyásolják (korábban egy téves szemlélettel a különböző technológiai paraméterek közvetlen hatását próbáltam megérteni a kapott vasanyag kémiai összetételére, jelen esetben szénttartalmára, azonban helyesebb, ha a technológiai paraméterek hatását erre két zónára vizsgáljuk és megértjük, hogy e két zóna viszonyaitól hogyan függ a szénttartalom). Az arányt két folyamat határozza meg:

- 1) Az égési zónába besüllyedő folyékony vas és szilárd vas aránya, amit a redukáló zóna folyamatai befolyásolnak
- 2) Az égési zóna és a közvetlenül alatta lévő inaktív zóna telítődése nyersvassal, amit az égési zóna mérete és természetesen a kohósítás időtartama határoz meg

A redukáló zóna jellemzői

A redukáló zónában az atmoszféra redukáló, a vasfázist cementálja. A hőmérséklet lefelé haladva növekszik. A szegkohósító modellkísérletek során a redukáló zónában a vasfázis felszenülését (vagy vasérc kohósításakor a vasoxidok redukációját és a vasfázis felszenülését) alapvetően négy dolog határozza meg:

1a) Hőmérséklet – ezt befolyásoló technológiai paraméterek ezt befolyásolja:

- befújt levegő térfogatárama (Q)
- betétek szemcsemérete (d)
- betétek alkotóinak tömegaránya (m/m)
- előfűtés időtartama (T)

1b) Karbonpotenciál (azaz az atmoszféra CO/CO₂ aránya) – ezt befolyásolja:

- befújt levegő térfogatárama (Q)
- betétek szemcsemérete (d)
- betétek alkotóinak tömegaránya (m/m)
- előfűtés időtartama (T)

1c) Idő, amit a betét a redukáló zónában tölt, ez az elegy süllyedési sebességével van összefüggésben – ezt befolyásolja:

- redukáló zóna keresztmetszete (D) (kohógeometria szerepe)
- befújt levegő térfogatárama (Q)

1d) Felület – esetünkben a vasszegek felülete, porózus vasércnél a redukcióhoz rendelkezésre álló felület

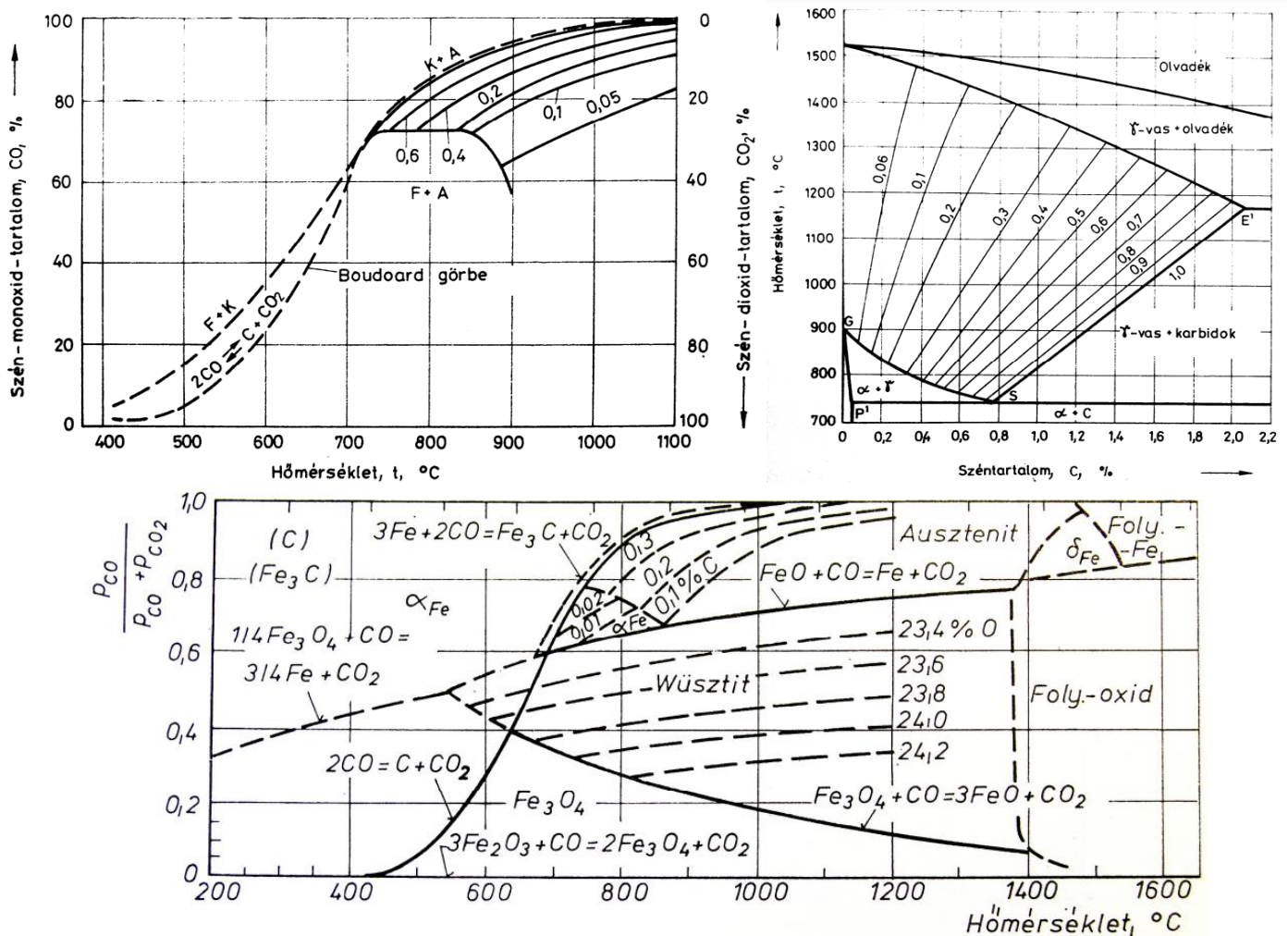
Az égési zóna jellemzői

Az égési zóna alján összeálló vasbucában a nyersvas és a vasszivacs arányát és a vasbuca méretét alapvetően a redukáló zónában zajló felszenülési folyamatoktól függetlenül első sorban az égési zóna mérete, kiterjedése határozza meg, azaz hogy mennyi hely áll a vasbuca rendelkezésére. Fontos látni, hogy a nyersvas egy része az égési zónából lefolyik, lecsepeg a bucakemence medencéjébe, így ennek elősegítése az égési zóna nyersvassal és/vagy vasszivaccsal való telítődését csökkenti.

Az égési zóna méretét befolyásoló technológiai paraméterek:

- befújt levegő térfogatárama (Q)
- betétek szemcsemérete (d)
- az égési zóna alakja (pl. mélyebbre dugott fúvóka)
- előfűtés időtartama (T)

Az égési zónában kialakuló vasbucában a nyersvas és a vasszivacs arányát alapvetően meghatározza az, hogy a redukáló zónából mi kerül be az égési zónába. Ha a redukáló zóna viszonyai lehetővé teszik a vasszivacs megolvadását járó felszenülését, akkor az égési zónába már (nagy széntartalmú) olvadt vas csöpög be. A szegkohósító modellkísérletek során az akna hőmérsékletét a fúvóka feletti 30cm-es magasságban mértem. Ebben a magasságban nyilvánvalóan már nem ér fel az égési zóna, amelynek a fúvóka feletti magasságát a kísérletek során 15-20cm-esre becsülöm. A 30cm-es magasságban a meleg kiskohós kísérletek során az adagolási szakaszban 800°C-ról 1000-1200°C-ra növekedett a hőmérséklet. Ahhoz, hogy olvadékfázis alakuljon ki, a vasszivacsnak 2,1% széntartalmúra kell cementálódnia. Az olvadékfázis megjelenése után viszont a szenülés felgyorsul. De a Fe-C állapotábra J-E likvidusza alapján látható, hogy pl. 1300°C-on szintén megjelenik az olvadékfázis, ha a vasszivacs mindössze 1,4% széntartalmúra cementálódik.



10. ábra: Diagramok a vasszivacs cementálódási folyamatának értelmezéséhez: Egyensúlyi viszonyok a cementáló közeg CO- és CO₂-tartalma, a hőmérséklet és az acél felületének karbonaktíváltsága között (fent balra), azonos a karbonaktíváltságon az ausztenit mezőben (fent jobbra), a Fe-O-C rendszer egyensúlyi viszonyai (lent)

A redukáló zónában zajló cementálódási folyamatok értelmezéséhez jó lenne olyan diagram, ami a Fe-O-C rendszerben elhelyezkedő olvadt vasszivacsot is mutatja. Én két ide vonatkozó diagramot mutatok most a 10. ábrán, de sajnos ezek

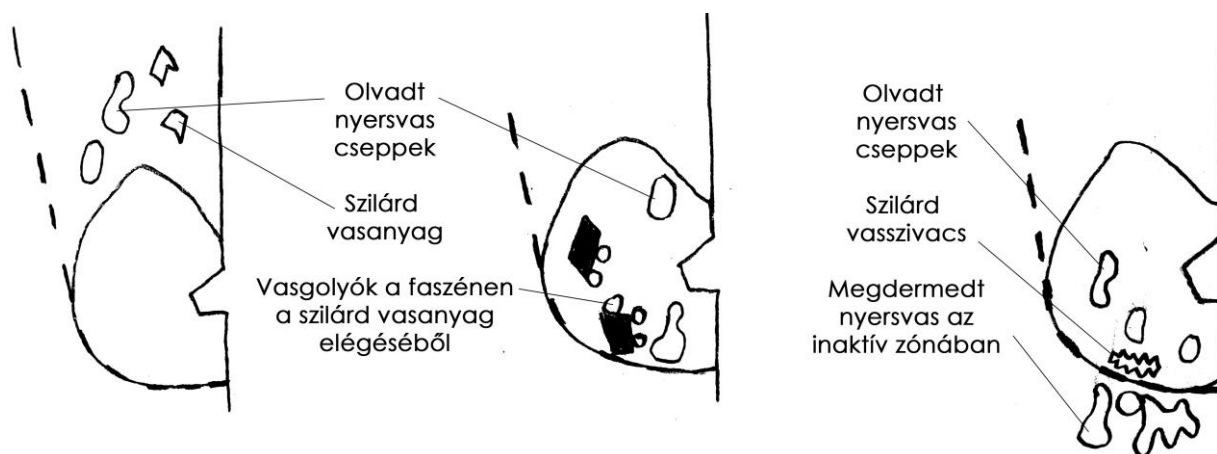
egyikével sem értelmezhető jól az olvadt vasfázis megjelenése. A cementálódási folyamatok értelmezéséhez szintén jó lenne, ha az égési zóna és a redukáló zóna különböző magasságaiban ismernénk a hőmérséklet-gázösszetétel adatokat. Mindezek hiányában mindössze azt állapíthatjuk meg, hogy a kialakuló vasbucában a nyersvas és a vasszivacs arányát alapvetően az befolyásolja, hogy a redukáló zónában végbe tud-e menni olyan mértékű cementálódás, ami olvadékfázis megjelenéséhez vezet, ezáltal pedig az égési zónába olvadt vas csepegjen be. A kísérleti eredmények alapján láthatóan végbe tud menni.

Ezt jól bizonyítják azok a videofelvételek, amiket a fúvókán benézve készítettem. Ezekon a felvételeken látható, hogy a cementálódásnak kedvező kísérleteknél a fúvóka elé nagy mennyiségben nyersvas csöpög és csak kisebb mennyiségben láthatjuk a korábban már megfigyelt, bemutatott, faszénhez tapadt vasgolyócskákat (ilyen felvételeket később linkelek majd be). Bizonyíték még a fúvóka elé csöpögő nyersvasra a mK1-2,8-as kísérletnél a fúvókán át bedugott vaspálcára csöpögni nyersvas, amit a 11. ábrán mutatok (a pálcára csöppent nyersvas a fúvószeletől gyorsan kis széntartalmúvá frissült).



11. ábra: A mK1-2,8-as kísérletnél a fúvókán át bedugott vaspálcára véletlenül csöppent (kis széntartalmúvá frissült) nyersvas

Azonban a kísérletek során a fúvókán keresztül tett megfigyelések alapján elmondható, hogy a fúvósíkban nemcsak átcsepögő olvadt nyersvascseppek hanem a vasanyag elégéséből származó faszénhez tapadt vasgolyócskákat is meg lehetett figyelni. Ezek arányát feltétlenül a redukáló zónában zajló felszenülés mértéke határozta meg. Ha ugyanis a felszenülés nem elegendő és nem olvad meg a vasfázis, hanem szilárd halmazállapotban marad, akkor mozgása az elegy süllyedéséhez kötött marad, azaz nem tud gyorsan áthaladni az égési zónán, így megtörténik az elégése a korábban már leírt módon (ld. a 12. ábrát). A vasfázis elégéséből származó vasgolyók azonban lehetséges, hogy kialakulhatnak az égési zónába csöpögő nyersvas frissülésével és elégésével is, ha a nyersvascsepp mozgása szerencsétlenül lassú (a fúvókán keresztül készített videofelvételeken a nyersvascseppek gyorsan csepegnek át a fúvóka előtt, alig lehet őket észrevenni), de ennek a folyamatnak a jelentőségét elhanyagolhatónak gondolom.

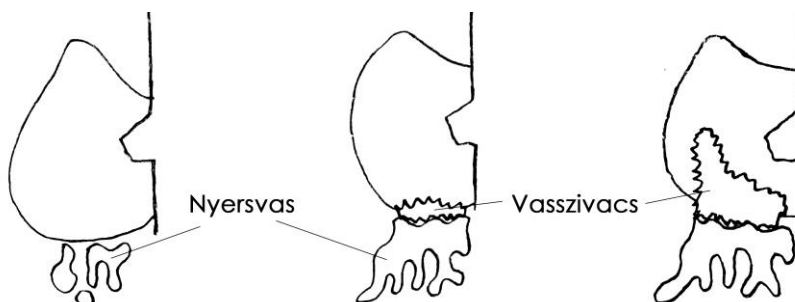


12. Ábra: A redukáló zónából az égési zónába érkező nyersvas átcsepogése és a szilárd vasfázis elégése (első két kiskép), az égési zóna alján kialakuló vasszivacs blokkot feloldó nyersvas (harmadik kiskép)

Ezek után nézzük meg, hogyan alakul ki a nyersvasat is tartalmazó vasbucá az égési zónában (a nyersvasat nem tartalmazó esetet már bemutattuk). Az égési zóna aljára lejutott nyersvas kezdetben lecsöpög, lecsurog az inaktív zónába (lejuthat akár a kohó medencéjének az aljára is), ahol megdermed. Ilyen cseppeket mutat a 6. ábra. Az inaktív zónába jutott nyersvas a továbbiakban már nem vesz részt metallurgiai folyamatokban. Azokban kísérletekben, amelyekben sok nyersvasat tartalmazott a vasbucá, a vasbucá mindig mélyen a fúvóka alatt, jórészt az inaktív zónában helyezkedett el, a tetejét nem lehetett a fúvókán keresztül bepiszkálva kitapintani. Ha a redukáló zóna kevésbé cementáló, akkor az égési zónába sok szilárd vasanyag kerül, amelyek elégéséből származó vasgolyók szilárd

vasszivaccsá állnak össze az égési zóna alján. Az ilyen vasszivaccot feltételezem, hogy részben képes lehet feloldani a rácsepegő nyersvas, tehát ha túlnyomó részt nyersvas csepeg az égési zónába, akkor nem alakul ki az alján vasszivacs blokk (ld. 12. ábra harmadik kisképe).

Ahogy az égési zóna alatti inaktív zóna megtelik nyersvassal és a nyersvas nem tud már elfolyni az égési zónában, úgy a vasbuca felső részére csepegő nyersvas frissülni kezd és nem a lehűlés miatt, hanem a szénttartalom csökkenése miatt szilárdul meg. Alapos megfigyeléssel morfológiai különbségek is felfedezhetők a frissüléssel megjelenő és a vasgolyókból összehegedő vasszivacs között: nyersvasblokk tetején lévő, frissüléssel keletkező vasszivacs sokkal lazább, törékenyebb, ez azonban összehasonlító fotókkal nehezen lenne illusztrálható. A nyersvasblokk tetején kialakult vasszivacs növekedésnek indul és idővel a fúvókán keresztül is tapinthatóvá válik, majd a folyamat előrehaladtával a szokásos módon „L” alakot felvéve a fúvóka elé is elkezd feltornyosulni (vaskorona). Ezt a folyamatot szemlélteti a 13. ábra.



13. Ábra: A nyersvasból és vasszivaccból álló vasbuca kialakulása

A vasszivacsra tehát továbbra is nyersvas csepeg, azonban ez a vasszivacs felületén gyorsan frissül, ennek során a nyersvas széntartalma három folyamat során csökken

- 1) a kisebb széntartalmú vasszivacs szív el belőle szenet
- 2) az oxidáló atmoszféra éget ki belőle szenet
- 3) a vasszivacs felületén lévő vasoxid dús salak frissíti

Ezek közül a fúvókán keresztül készített videofelvételeken a harmadik jól megfigyelhető.

Megfigyelhető volt a kísérletek során, hogy a vasbuca felszíne a vasércel végzett kohósítások során megszokottól eltérően jóval közelebb került a fúvóka orrponthoz, néha közvetlenül a fúvóka előtt gyúlt fel a vasanyag, sőt, néha még a fúvóka oldalához is hozzáért. Feltételezem, hogy ez azért történt, mert a frissülő nyersvas a nagyobb széntartalmánál fogva nehezebben égett el, illetve a folyamatosan újra récszöppenő nyersvas némileg pótolta is a kiégett szénttartalmát.

Itt kell megjegyezni még azt, hogy az inaktív zónába lejutott nyersvashoz mindig keveredik valamennyi salak is. Ezt a salakot három folyamat adja: a faszén hamuja, a mellfalazat fúvóka körüli belső részének leolvadása (ami néha igen jelentős) és az eléggő vasfázisból származó vasoxid. A nyersvassal keveredő salak vasoxid tartalmát azonban a nyersvas széntartalma teljesen lecsökkenti (a vasfázis széntartalma a salakfázis vasoxid tartalmát színvassá redukálja) és a salak kifakul, színe szürkés lesz (ahogyan ez az 5. ábrán látható).

3.4 A kísérletek során kapott vasbucák részletes értékelése

Az eddig leírtak alapján ezek után értelmezhetővé válik, hogyan alakultak ki az egyes kísérletek vasbucái.

Az O1-1,5-ös kísérlet során az oldalszeles kovácstűzbe rakott szegekből nyersvasat nem tartalmazó vasbuca állt össze. A hideg kiskohós kísérletekben (hK0,5-1,5, hK1-1,5 és hK3-1,5) a befűjt levegő térfogatáramában volt csak különbség, illetve hogy a hK3-1,5 meleg kohóval indult (ennek ellenére nem tekinthető az mK3-2 kísérlet hideg változatának). A ezekben a kísérletekben kapott vasbucákban a nyersvas mennyisége annál nagyobb, minél nagyobb volt a befűjt levegő térfogatárama, a nyersvas aránya a vasbuca teljes tömegéhez képest rendre 0, 0,2 és 0,7 lett. Ebből arra lehet következtetni, hogy a befűjt levegő növekvő térfogatárama a redukáló zónában zajló felszenülési folyamatoknak kedvez, mert megemeli az ottani hőmérsékletet, ami a hőmérsékletmérési eredményeken is látható, kb. 50-100°C-kal növekszik a hőmérséklet 100 liter/perc térfogatáram növekedés hatására. Ugyanakkor a befűjt levegő növekvő térfogatárama az égési zónában a faszén gyorsabb elégését is eredményezi, ami az elegy süllyedési sebességét növeli, így a redukáló zónában töltött időt csökkenti, de láthatóan ennek a szerepe kisebb. Az adagolási szakasz időtartamait összehasonlítva kb. 50, 35 és 20 perces időtartamok (a hK0,5-1,5-ös kísérlet adagolási szakaszának a végén a fúvóka előtt kialakuló vasblokk fojtotta a levegőáramlást) tartoznak az 50, 150 és 250 liter/perces térfogatáramokhoz. A befűjt

levegő növekvő térfogatára ezen kívül az égési zóna méretét növeli, illetve az égési zóna alatt melegebbé váló inaktív zónába jutó nyersvas később dermed meg, így több nyersvasnak lesz helye.

A meleg kiskohós kísérletekben (mK0,5-1,5, mK1-1,3, mK1-2,8 és mK3-2) a hosszabb előfűtés mellett az égési zóna méretét azzal is növeltem, hogy egyrészt a fúvókát mélyebben bedugtam (a mellfal belső síkjától szokásos 2-3cm helyett 5-6cm-re), másrészt a fával való előfűtést követően úgy töltöttem fel a kohót faszénnel, hogy a feltöltés elején a fúvósík környezetébe 6-25mm-es helyett 25-40mm-es szemcseméretű faszénet öntöttem. A meleg kiskohós kísérletek során a hosszabb előfűtés hatására a hidegkohós esetben mért 500-600°C-os kezdőhőmérséklet helyett 800°C-ról indult a beadagolási szakasz. Mindezek a kapott vasbucában megjelenő nyersvas mennyiségét jelentősen megnövelték. Legszemléletesebben a hK0,5-1,5 és mK0,5-1,5 összevetéséből látszik, hogy míg az előbbinél nem volt nyersvas a bucában, az utóbbinál már igen. Ha pedig a hK1-1,5 és mK1-1,3-at hasonlítjuk össze, akkor szintén jelentős a nyersvasarány-növekedést láthatunk, annak ellenére is, hogy az utóbbi kísérletben 200g-mal kevesebb szeget adagoltam be. Szintén érdemes összehasonlítani a hK3-1,5 és mK3-2 kísérlet eredményeit. Mindkettőnél főleg nyersvasból állt a vasbuca, azonban az utóbbinál annak ellenére, hogy 500g-mal több szeget adagoltam be, mégis szinte csak nyersvas keletkezett belőle. Ennek oka a nagyobb méretű égési zóna és az alatta melegebb inaktív zóna, amelybe így szinte az összes, az égési zónán átcsepegett nyersvas be tudott süllyedni. Ebben az mK3-2 kísérletben a nyersvasból álló vasbuca egészen felvette a kohó medencéjének az alakját, ahogyan ez a 7. ábrán látható volt. Feltételezem, hogy a hK3-1,5 kísérletnél is főleg csak nyersvas csepegett az égési zónába, azonban a kevesebb hely miatt a nyersvas frissülése is beindult és a folyamat a 13. ábra középső kisképén láthatóhoz hasonló vasbucát eredményezett. Az mK3-2 kísérletet úgy végeztem el, hogy arra törekedtem, hogy kizárólag nyersvasat állítsak elő, de azt a lehető legnagyobb mennyiségben (nyersvaskihozatal maximalizálása). A kísérletet 2kg szeg beadagolásakor hagytam abba, mert ekkor még nem volt szilárd vasszivacs tapintható a fúvóka alatt, de gyanítottam, hogy a szegadagolás folytatásával már megjelenne. A leginformatívabb, az eddigieket legszemléletesebben igazoló kísérlet az mK1-2,8 volt, ahol a szegkohósítást addig folytattam, amíg csak elért a vasbuca. Ennek eredménye egy olyan vasbuca lett, aminek az alsó fele nyersvas, a felső fele pedig vasszivacs volt. A mK1-1,3 kísérletben szinte csak nyersvas volt a bucában, ehhez képes a kb. dupla annyi szeget felhasználó mK1-2,8-nál a nyersvassal azonos mennyiségű vasszivacs volt a bucában.

Végül a nagykohóban végzett N1-1,5-ös kísérlet eredményét kell még értékelni. A nagykohóban végzett kísérlet is „hideg”-nek tekinthető, ugyanis a rövid előfűtés és a sekélyen bedugott fúvóka nem kedvezett sem az égési zóna és az alatta lévő inaktív zóna kiterjesztésének, felmelegítésének, sem pedig a redukáló zóna hőmérséklete a megnövelésének (a 2. ábra hőmérsékleti diagramján jól látható a redukáló zóna kis hőmérséklete). Ilyen viszonyok között a hK1-1,5-ös kísérlethez hasonló eredményre lehetne számítani, vagy még annál is kisebb mennyiségben megjelenő nyersvasra. Azonban nem ez történt, az N1-1,5-ös kísérlet vasbucája szinte csak nyersvasat tartalmazott. Ennek magyarázata a kohógeometriában rejlik. A redukáló zónában a cementálódás mértékét ugyanis nagyban befolyásolja az ott eltöltött idő is, amire hatással van az elegy süllyedési sebessége, ezt pedig a kohó belsőátmérője befolyásolja. A kiskohó belső átmérője átlagosan 17cm (a kohó fúvóka feletti részét szabályos csonkakúpnak feltételezve), a nagyé pedig 23cm. Ebből a keresztmetszetek 226 illetve 415cm²-re adódnak, ami azt jelenti, hogy a nagy kohóban kb. feleolyan gyorsan tud csak süllyedni az elegyoszlop, mint a kicsiben. Az N1-1,5-ös kísérlet eredményét az ugyanolyan körülmények között csak kisebb kohóban elvégzett hK1-1,5-ével hasonlítjuk össze, akkor látható, hogy a nagyjából egyforma égési zóna és alatta lévő inaktív zóna ellenére a nagykohós kísérletben csak nyersvas keletkezett, tehát jelentősen megnövekedett a nyersvas mennyisége, ami feltételezem, hogy annak köszönhető, hogy a redukáló zónában a cementálódási folyamat jobban végbement és az égési zónába szinte csak nyersvas csöpögött. Természtésen a kohógeometria nagy szerepe a vasérc kohoításakor is megmutatkozik a vaskihozatalban.

Irodalom:

[1] Thiele, Á.; Török, B.: Controlling phosphorus content in the iron bloom in the 6-10th century iron smelting, Secrets of iron - from raw material to an iron object, the 7th International Scientific Conference on Mediaeval Archaeology, Croatia, Zagreb, 10-11th September, 2020, (poszter).

Link: http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/Poszter+rovidcikk/Poszter_S12020.jpg

[2] Thiele, Á.; Török, B.: Controlling possibilities of the carbon content in the iron bloom during the iron smelting, 5th International Conference on Archaeometallurgy, Hungary, Miskolc, 19-21th June, 2019, (poszter).

Link: http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/Poszter+rovidcikk/Poszter_AIE2019_1.jpg

[3] Thiele, Á.; Hári, L: A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai – modellkísérletek oldalszeles kovácstűzhelyben, 2023 (kézirat)