



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
Járműgyártás és -javítás Tanszék

**A koraközépkori direkt acélgyártás (bucavaskohászat)
technológiájának lehetőségek szerinti reprodukálása és
tanulmányozása korszerű műszaki anyagvizsgálati
módszerekkel**

Diplomamunka

Thiele Ádám

Budapest, 2010

KÍRÁSI FELADATLAP

ELLENŐRZŐ ÉS MINŐSÍTŐ LAP

TARTALMI KIVONAT

A diplomamunka témája:

A vas kora középkori előállítási technológiájának reprodukálása és tanulmányozása

A diplomamunka felépítése:

- Bevezetés: a diplomamunka témájának bemutatása és elhelyezése a tudományterületek és tudományágak között
- Irodalomkutatás
 - A vasgyártás történetének ismertetése
 - A vasgyártás technológiai és metallurgiai alapjainak bemutatása a kapcsolódó korábbi eredmények áttekintésével
- A célkitűzések megfogalmazása
- A vas kora középkori technológiájának reprodukálása rekonstrukciós kísérletek bemutatása
- A rekonstrukciós kísérletek során elvégzett mérések, majd a kísérleteket követő anyagvizsgálatok eredményinek ismertetése
- A bucakohóban végbemenő fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok bemutatása:
 - a rekonstrukciós kísérletek,
 - az elvégzett mérések és anyagvizsgálatok,
 - és laboratóriumi kohómodellekalapján.
- A vasbucakohászat technológiájával kapcsolatos alapvető kérdések megválaszolása számítások segítségével
 - Salakképzés
 - Vaskihozatal
- A vasbucakohászati technológia modern kori alkalmazási lehetőségeinek áttekintése

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	- 9 -
2. IRODALOMKUTATÁS	- 11 -
2.1. A vasgyártás története	- 11 -
2.2. A bucavaskohászat technológiai és metallurgiai alapjai	- 15 -
2.2.1. <i>Iparrégészeti leletek</i>	- 15 -
2.2.2. <i>Archeometriai vizsgálatok</i>	- 17 -
2.2.3. <i>A bucavaskohászat metallurgiája</i>	- 23 -
2.2.4. <i>Hazai és külföldi rekonstrukciós kísérletek</i>	- 24 -
3. CÉLKITŰZÉSEK	- 26 -
4. REKONSTRUKCIÓS KÍSÉRLETEK ÉS A VASBUCA-KOHÁSZAT TECHNOLÓGIÁJA	- 27 -
4.1. Gyepvasércbányászat, gyepvasérclelőhelyek	- 27 -
4.2. A kohászat és előkészületei	- 29 -
4.2.1. <i>Kohóépítés</i>	- 29 -
4.2.2. <i>Gyepvasérc előkészítése</i>	- 31 -
4.2.3. <i>Faszénégetés</i>	- 32 -
4.2.4. <i>Bucavaskohászat</i>	- 33 -
4.3. A vasbucá átkovácsolása	- 35 -
5. MÉRÉSEK ÉS ANYAGVIZSGÁLATOK	- 39 -
5.1. A rekonstrukciós kísérletek alatt elvégzett mérések	- 39 -
5.1.1. <i>Betétanyagok mennyiségének mérése</i>	- 39 -
5.1.2. <i>Hőmérsékletmérések</i>	- 42 -
5.1.3. <i>Gázösszetétel-mérés</i>	- 44 -
5.1.4. <i>Betétanyagok süllyedési sebességének mérése</i>	- 45 -
5.2. A rekonstrukciós kísérleteket követő anyagvizsgálatok	- 46 -
5.2.1. <i>Gyepvasérc minták összetétel-vizsgálata</i>	- 46 -
5.2.2. <i>Salakképzőminták fázisösszetétel-vizsgálata</i>	- 52 -
5.2.3. <i>Salakminták vizsgálata</i>	- 53 -
5.2.4. <i>Vasbucák, vastárgyak vizsgálata</i>	- 58 -
6. A BUCAKOHÁSZAT FIZIKAI-KÉMIAI FOLYAMATAI ÉS METALLURGIÁJA	- 63 -
6.1. Kohómodell-kísérletek	- 63 -
6.2. A bucakohó metallurgiája	- 68 -
6.2.1. <i>A torokban zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok</i>	- 72 -
6.2.2. <i>Az aknában zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok</i>	- 73 -
6.2.3. <i>A medencében zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok</i>	- 76 -
7. A VASBUCAKOHÁSZAT TECHNOLÓGIÁJÁRA VONATKOZÓ SZÁMÍTÁSOK	- 78 -
7.1. Salakképzés	- 78 -
7.2. Vaskihozatal	- 84 -
7.2.1. <i>A bucakohó magasságának hatása a vaskihozatalra</i>	- 85 -
7.2.2. <i>A fűjtetés intenzitásának hatása a vaskihozatalra</i>	- 86 -
7.2.3. <i>Az érc aprítási fokának hatása a vaskihozatalra</i>	- 88 -
7.2.4. <i>A salak és a gyepvasérc összetételének hatása a vaskihozatalra</i>	- 88 -
8. A BUCAVASKOHÁSZATI TECHNOLÓGIA MODERN KORI ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI	- 95 -
9. ÖSSZEGZÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK	- 97 -
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	- 99 -
IRODALOMJEGYZÉK	- 100 -

1. BEVEZETÉS

A technikai társadalom kialakulásában nagy szerepet játszott a vas, amelynek kiemelt jelentősége a tág határok között változtatható tulajdonságaiban, jó megmunkálhatóságában, viszonylag egyszerű előállításában van. A vas története azonban nemcsak technikátörténeti, hanem gazdaság- és hadtörténeti jelentőséggel is bír. A gazdaságtörténeti jelentőség esetében gondoljunk a mezőgazdasági szerszámokra és arra, hogy a vas adta majdnem minden mesterség szerszámainak alapanyagát. A hadtörténeti vonatkozások a vasfegyverek szempontjából szintén egyértelműek.

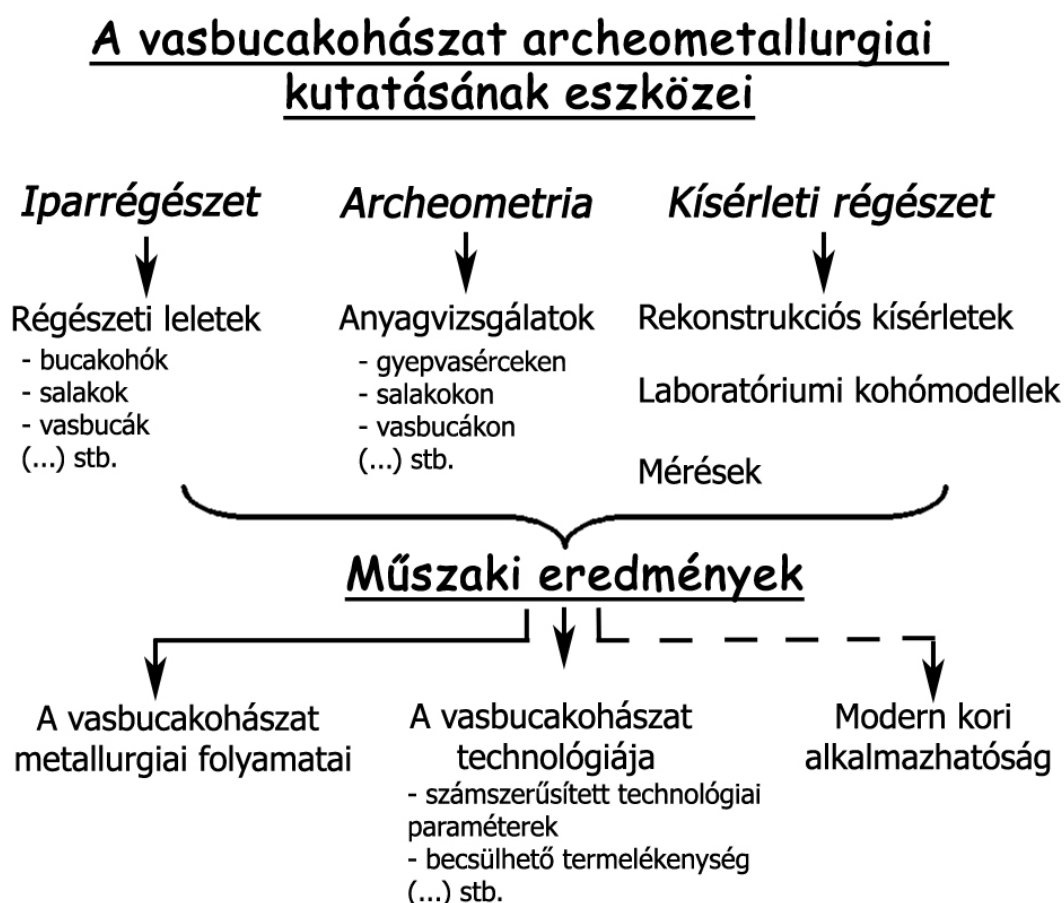
Az ember már több ezer éve állítja elő érceiből a vasat. A vaselőállítás ősi módja szerint kis faszéntüzelésű kemencékben, közvetlenül a vasércből nyertek egy salakos vasszivacsot, ún. vasbucát. A vas az elérhető kis kohászati hőmérséklet mellett nem olvadt meg ezért csak csekély mértékben ötvöződött karbonnal. Az előállított néhány kilogramm tömegű vasbucát újrahevítették, tömörítették. Eközben a sok vasoxidot tartalmazó, ezáltal alacsony olvadáspontú salak jelentős része kifolyt, kipréselődött. A tömörített vasbucákat kovácsfalvak kovácsai dolgozták fel, belőlük különböző vastárgyakat kovácsoltak. A vas előállításának ezen ősi technológiáját mai szakkifejezéssel élve direkt módszerű vagy közvetlen acélgyártásnak nevezhetnénk.

A direkt módszerű bucavas-előállítás ősi technológiája napjainkra szinte teljesen feledésbe merült, eredeti formájában már csak a természeti népeknél él tovább. A közelmúlt egyik szerencsés folyamata azonban, hogy a történelemtudományok és a műszaki tudományok szoros együttműködésével – főként a nyugati országokban – egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek korabeli tárgyak, folyamatok, események reprodukálására. Ennek a folyamatnak része a jelen diplomamunka is, amely a kora középkori vaselőállítás műszaki kutatását, technológiai és anyagtudományi vonatkozásainak átfogó jellemzését, korhű modellezését tűzi ki céljául.

Magyarországon a kora középkori vaskohászat témájával eddig főleg iparrégészeti szempontból foglalkoztak, azonban a teljes kép megalkotásához nem elegendőek pusztán a hagyományos régészeti eszközök. Anyagtudományi oldalról régészeti leletek (korabeli vastárgyak, salakok, esetenként bucakohó falazatdarabjai) anyagvizsgálatát végezték el, ezek az ún. archeometriai vizsgálatok körébe sorolhatók. Az iparrégészből és az archeometriából alakult ki a mára Európa szerte intenzíven kutatott archeometallurgia, azaz a kohászatrégészet. A vasbucakohászati technológia az iparrégészet és az archeometriai eszközeinek felhasználása mellett egy harmadik módszerrel, a

rekonstrukciós kísérletekkel is kutatható, amelyek során kísérleti régészeti eszközök felhasználásával a bucakohók életre keltése, a bucavaskohászat technológiájának és a kohókban lejároló fizikai-kémiai folyamatoknak a megismerése a cél.

Hazánkban eddig néhány, kevés sikerrel járó rekonstrukciós kísérlet történt. Ezek a legtöbb esetben nem voltak sem korhűek, sem reprodukálhatóak, a technológiai paraméterek nem ismertek, és a nyert vasbucák nem voltak megfelelő minőségűek. Az eredmények alapján nem volt lehetőség a bucakohóban zajló fizikai-kémiai folyamatok részletes értelmezésére sem. A dolgozat ezeket a hiányosságokat igyekszik betölteni, illetve bővíteni kívánja a téma egyébként nagyon szűk műszaki irodalmát. Az 1. ábra a bucavaskohászat kutatásának eszközeit és a kutatás várható műszaki eredményeit foglalja össze.



1. ábra: A bucavaskohászat kutatásának eszközei és a kutatás várható műszaki eredményei

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. A vasgyártás története

Az ember mintegy hatezer éve használja a vasat (GÖMÖRI 2000). Az első vastárgyak alapanyagát azonban nem kohászati eljárással, hanem meteorvasból nyerték. A vasmeteorok vegyi összetételére jellemző, hogy nikkeltartalmuk akár 20% is lehet, egyéb ötvözőket viszont csak kis mennyiségben tartalmaznak. Ennek köszönhetően a vasmeteorok nagyon jól kovácsolhatóak, jól kovácstűzi-hegeszthetőek voltak, és a korrózióknak is jobban ellenálltak, mint a későbbi korok kis karbontartalmú szénacélból készült vastárgyai.

A vasipar történetének legnagyobb előrelépését a vasnak érceiből, kohászati úton történő előállítása jelentette. Kezdetben az „égi vasat” „földi vassal” összekovácsolva hoztak létre vastárgyakat (ELIADE 2004). A vaskohászat az időszámítás előtti évezredekben ún. olvasztógödörben folyt. Az olvasztógödör a talajszintbe mélyített, egy-két méter átmérőjű, tányérszerű gödör volt, amelybe faszén és vasérc meghatározott arányú keverékét helyezték. Tűzét többnyire természetes légáram szította (HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968). Intenzívebb levegőbefúvás és nagyobb hőmérséklet elérése volt lehetséges az ún. olvasztópáholyokban. Ezek domboldalba ásott mélyedések voltak, amelyeket faszénrel és ércel töltöttek fel, majd az elegyoszlopot vékony agyagréteggel borították be. Az agyagréteget alul és felül lyuksorral látták el. Alul a levegő jutott be, felül az égéstermékek távozhattak. A tüzet szító légáram az olvasztópáholy esetén is legtöbbször természetes lehetett. A kezdetleges kohászati technológia során elérhető kis hőmérséklet mellett a vas mindvégig szilárd állapotban maradt. Feltehetően mindössze kisebb vasrögöket kaptak, amelyekből kovácstűzi-hegesztéssel állíthattak elő tömbi vasat nagyobb vastárgyak számára.

A vizsgálatunk tárgyát képező kora középkori vasgyártás a bucakohókat az ókortól örökölte (KERPELY 1898). A fejlett ókori vaskohászati technológia a mesterséges fűjtatás segítségével akár már néhányszor 10 kg-os vashúzókat is eredményezett. Magyarország területén néhány nagyméretű, római kori vashúzókat találtak régészeti feltárások során (ilyen 10-12kg-os vashúzó látható például a Miskolci Kohászati Múzeum kiállításán). A Római Birodalom felbomlása után vasiparának termelékenysége is jelentősen visszaesett, a felhalmozott szaktudás nagyobb része odaveszett.

A népvándorlás kori vaskohászat termékei ismét csekélyebb tömegű, mindössze néhány kg-os vasbucák voltak. A 9-13. századi magyar vasipar termelőegységeit a kohótelepek jelentették, amelyek a közelben található gypvasérclelőhelyek vasércére és az erdők faanyagára támaszkodtak. Az őskohászok kis (kb. 1 méter magasságú) aknás kemencében, ún. bucakohóban állították elő a 2-3kg-os vasbucákat. A kohók tüzeit kézi fűjtatókkal szították. Az őskohászok által előállított vasbucák tömörített állapotban kerültek ki a kohótelepekről, ezek további megmunkálását már a kovácsok végezték el.

A középkor folyamán a kis bucakohók méreteit a termelékenység javítása céljából növelni kezdték. Az igazi előrelépést, minőségi változást a vízikerekek vasgyártásban történő alkalmazása indította el. A vasipar volt az egyik legfontosabb európai ipar, amelyet a vízikerek és a bütyköstengely segítségével részben gépesítettek (REYNOLDS 1985). Az izomerő helyett immáron vízikerekkel hajtották meg a fűjtatókat. A kohók méretei így még tovább nőhettek, a medence átmérője és a kohó magassága is nagyobb lett – kezdetben 3-4 méteres. A kohászat alatt a vasbuca továbbra is szilárd állapotban növekedett, de már jóval nagyobb, több 10kg-os tömegűre. Megjelentek a vashámorok, amelyekben kovácsolással, bütyköstengelyek mozgatta farkaskalapácsokkal előbb előgyártmánnyá, majd késztermékké dolgozták fel a bucakohókból kikerülő nagyméretű vasbucákat. A vasipar ilyen formán egészen a 18. századig működött Magyarországon (TÖRÖK 2002).

Nyugat-Európában a középkor végén, Magyarországon az újkor elején jelentek meg az első (még faszéntüzelésű) nagyolvasztók. A korábban elérhető kisebb hőmérséklettel szemben, amelyen a vasbuca a kohászat során végig szilárd halmazállapotú maradt, immár a vas olvadáspontját is meghaladták. A megnövekedett karbonoldó-képesség következtében nyersvas keletkezett, amit a kohóból időnként kicsapoltak. A munka folyamatos volt, addig lehetett a kohó torkába a faszenet és az ércet utánpótolni, a folyékony salakot és nyersvasat pedig kicsapolni, amíg a kohó falazata tönkre nem ment. (A nyersvas a kora középkori bucavaskohászati technológia mellett is létrejöhetett alkalomszerűen. Keletkezését kerülni kellett, hiszen ez kovácsolással nem munkálható meg. Mivel a lehetséges feldolgozási módja, a vasöntés még ismeretlen volt, ezért vagy ércel keverték, és újból kohósították, vagy pedig egyszerűen eldobták.)

A nyersvasból kezdetben készeléssel készítettek kovácsolható vasat, acélt. Ennek során a nyersvasat frisselő tűzhelyen újból megolvasztották, fűjtató szél hatásának tették ki, így kiegészítve belőle a felesleges karbont. Esetenként apró vasércrögöket is hozzákeverték. A

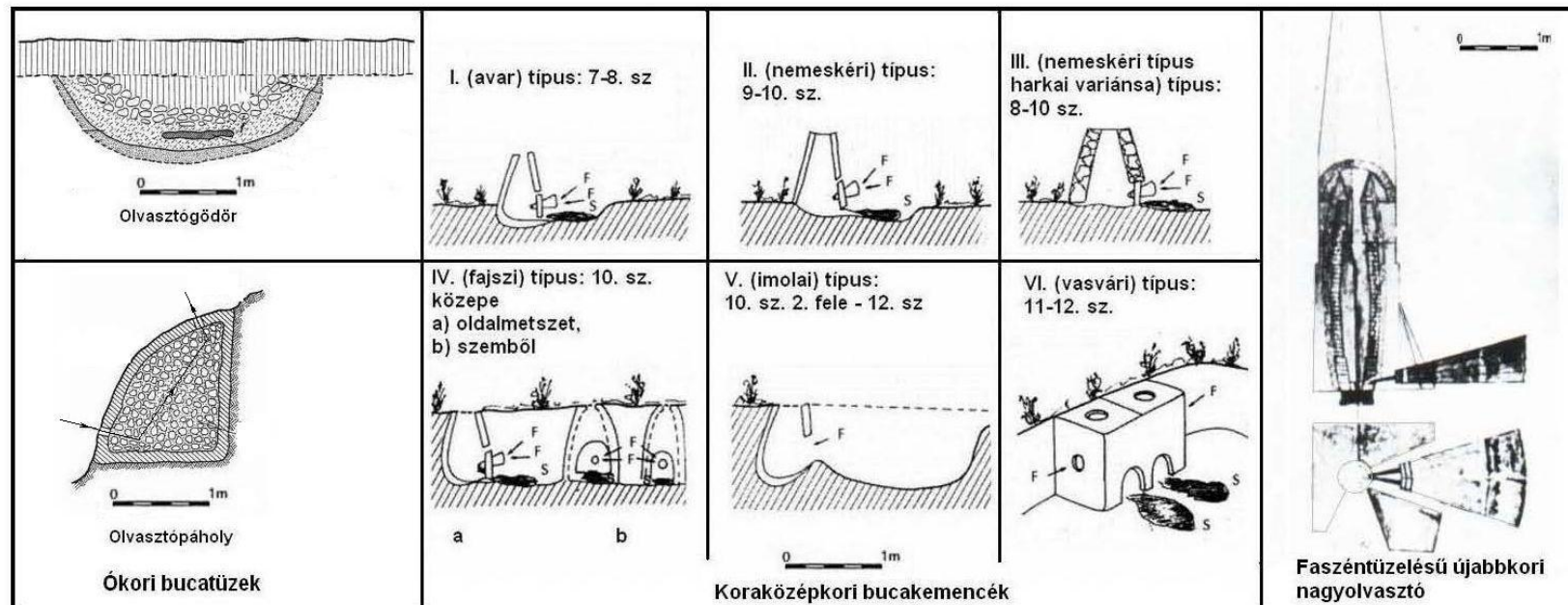
készítést történelmileg a kavarásos eljárás követte. A nyersvasat olvadt állapotban kavarták, a vas a kavarássra használt vasrúdon kezdett el kikristályosodni.

A technikai fejlődés utolsó fokai: a koksztüzelés megjelenése a nagyolvasztóban, az acélgyártás eljárásai között pedig a közismert Bessemer, Siemens-Martin és Thomas-eljárás voltak.

Az egyik legújabb alternatív vaskohászati eljárás a vasszivacsgyártás, amelynek technológiai alapjai a bucavaskohászáton nyugszanak. A vasszivacs készítésekor redukív, szénmonoxidos atmoszférában, mindössze 700–1100°C közötti hőmérsékleten dolgoznak. Ilyenkor a keletkezett vas nem olvad meg, hanem szivacsos marad, kevés korbont és más ötvözőt tartalmaz.

A fentiek alapján látható, hogy a bucakohászati technológia meghatározó jelentőségű, és a történelemben igen hosszan jelenlévő vasipari eljárás volt. Ma a természeti népeknél még mindig megfigyelhető vaskohászati technológia a bucavasgyártás. Az általuk végzett munka nagyon hasznos forrása lehet a kísérleti régészeti céllal végzett próbakohászatoknak is.

A 2. ábrán az elmondottak táblázatos összefoglalása, és a bemutatott kohótípusok (a kora középkori bucakemence típusok részletesen) is láthatók (GÖMÖRI 2000, HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968, HECKENAST 1991, JOHANNSEN 1953).



Korszak	Őskor	Ókor	Középkor	Újabb-kor	Újkor
Tüzelőanyag	Faszén			Kőszén, koksz	
Erőforrás	Izomerő		Vízikerék		Hőenergia
Kohósítás eszköze		Bucakemence		Nagyolvasztó	
Kovácsolható vas előállításának módja	Meteorvas	Direkt vasgyártás		Indirekt vasgyártás	
				frissítés	kavarás / folytacél

2. ábra: Történelmi vaskohászati technológiák és kohók

2.2. A bucavaskohászat technológiai és metallurgiai alapjai

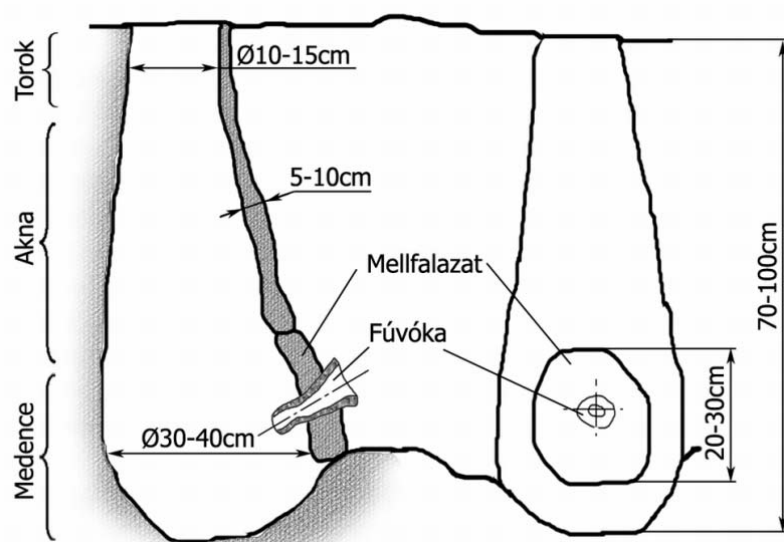
A kora középkorban a Kárpát-medencében folyó bucavaskohászat technológiai és metallurgiai alapelvei régészeti leletek, korábbi archeometriai vizsgálatok, illetve néhány rekonstrukciós kísérlet eredményei alapján részlegesen, nagy vonalakban tisztázottak. Mindenek előtt az ide vonatkozó régészeti leletekkel és a korábbi eredményekkel kell megismerkednünk.

2.2.1. *Iparrégészeti leletek*

A Kárpát-medencében feltárt kora középkori kohótelepek többségénél megtalálhatóak voltak a vaskohászati technológiához szorosan kapcsolódó objektumok, illetve ezek maradványai: faszénégető boksák, gyepvasércpörkölő gödrök, bucakohók, újraizzító tűzhelyek, stb. (GÖMÖRI 2000, GALLINA 2006).

A kora középkori vaselőállítás központi objektuma kétségkívül a bucakohó volt. Kialakításuk szerint két fő formájuk létezett: a szabadon álló (nemeskéri típus, illetve nemeskéri típus harkai variánsa) és a földbevájt típus (imolai, fajszi és vasvári típus). A kettő között átmenetet jelentettek azok a típusok, amelyeknek csak a medence részük volt beásva (avar típus) (ld. 2. ábra). A földbevájt típusú kohók 50-80cm mély gödrök, ún. műhelygödrök oldalfalába voltak bemélyítve. A diplomamunka keretében elvégzett rekonstrukciós kísérletek többsége fajszi-típusú kohóban történt, ezért csak ennek a kohótípusnak a geometriai kialakítását, felépítését mutatom be részletesen a régészeti leletek alapján.

A fajszi-típusú kohó alacsony, aknás kemence volt. Felépítésére jellemző, hogy homlokfalának alsó részén egy mellnyílást alakítottak ki, amelyet a kohászat során mellfallal zártak el. A mellfalon található lyukba fűvókát helyeztek, azon keresztül egy kézi fűjtatóval befűjt levegővel szították a bucakohó tüzeit. A fajszi-típusú bucakohó geometriáját általában a következőkkel jellemezhetjük: magassága kb. 70-80cm, belső átmérője a medencénél 30-40cm, amely kúposan csökkent felfelé, így a toroknál 10-15cm volt. Sajnos a bucakohók maradványai általában nagyon lepusztult állapotban kerülnek elő, ezért pontos geometriájuk (főleg magasságuk) nem állapítható meg pusztán a leletek alapján. A 3. ábra fajszi-típusú bucakohó felépítést és méreteit mutatja (GÖMÖRI, TÖRÖK 1998).



3. ábra: A fajszi típusú bucakohó felépítése és méretei a régészeti leletek alapján

A régészeti leletek alapján a bucakohók tehát kis belső térfogatú, aknás kemencék voltak, melyekbe az ércet és a faszenet váltakozó rétegekben vagy keverve halmozták fel, bennük a tüzet izomerővel működtetett fűtatókkal szították. A munka szakaszos üzemben folyt, a kb. fél napos kohászat után a kohó mellfalazatának megbontásával húzták ki az izzó, szilárd halmazállapotú vasbucát, amit ezután kovácsolással szabadítottak meg a salak nagyobb részétől. A bucakemence részleges helyreállítását minden újabb kohászat előtt el kellett végezni, ez általában a mellfalazat újrakészítését és újabb fúvókák elkészítését jelentette.

A bucavaskohászathoz szorosan kapcsolódó technológiai művelet volt az ércpörkölés, amelyet az ércpörkölő gödrökben végeztek el. Az összegyűjtött gyepvasércet a kohósítás előtt mosták, válogatták, és aprították, majd ércpörkölő gödörben, faszénparázson pörkölték. A kohótelepek régészeti feltárásai során napvilágra került ércpörkölő gödrök kb. 1,5x3m-es, sekély, ovális gödrök voltak (GÖMÖRI 2000).

A kohászat során nyert vasbucát tömörítéssel és kovácsolással szabadították meg a salak jelentős részétől. A képlékeny melegalakításokhoz ismételen fel kellett hevíteni a vasbucát, erre szolgált az újraizzító tűzhely. Ez szintén egy sekély, kb. fél méter átmérőjű gödör volt, amelyben izzó faszénben hevítették újra a vasbucát. Az újraizzító tűzhely tüzeit a hozzá oldalról elhelyezett fúvókán át kézi fűtatóból befűjt levegővel szították (GÖMÖRI 2000).

2.2.2. Archeometriai vizsgálatok

A régészeti feltárások során természetesen nem csak a bucavaskoháshoz kapcsolódó objektumokat találták meg, hanem a technológia betétanyagaira (a kohósításra szánt gyeptvasércdarabokra), melléktermékekre (bucasalakokra) és vasbucákra is bukkantak. A következőkben ezek tulajdonságaival ismerkedünk meg az archeometriai vizsgálatok eredményei alapján.

2.2.2.1. Gyeptvasérc

A bucakohókban könnyen kitermelhető felszíni vagy felszínközeli vasérceket, ún. gyeptvasérceket kohósítottak az őskohászok. Ezek ásványtanilag limonitos (túlnyomórészt amorf fázisú) vagy goethites (túlnyomórészt kristályos fázisú) barnavasércek voltak, amelyek vasoxidokat, vas-hidroxidokat tartalmaztak. Képletük: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. A gyeptvasércnek több megjelenési formája ismert: mocsáérc, babérc, borsóérc, stb. A gyeptvasérc a mai iparban használt vasércekhez képest kisebb vastartalmúak, sok meddő anyagot tartalmaznak. A meddő többnyire savanyú jellegű, benne a SiO_2/CaO arány nagy. Emellett talajásványok alkotójaként a Ca, Mg, Mn és Al oxidjai is előfordulnak benne kisebb-nagyobb mennyiségben. Nagyrészt ebből a meddő anyagból származik a bucakohászat során keletkező salak.

A gyeptvasérc porózus, réteges szerkezetűek. A porózus szerkezetből adódó nagy fajlagos felület a redukációs folyamatok sebességét növeli. Néhány korabeli gyeptvasérc kémiai összetétele látható az 1. táblázatban (HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968, TÖRÖK 1995).

1. táblázat: Kora középkori gyevasérccek kémiai összetételei

Azonosító	Megjegyzés	Kémiai összetétel (tömeg%)						ΣFe	Össz
		SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃		
1.	Sopron-Harkáról származó gyevasércminta (9-10sz.)	29,1	4,2	2,78	55,58	1,61	6,4	38,91	99,67
2.	Eisenzickenről származó gyevasércminta (13-14sz.)	35,43	2,68	0,64	45,75	0,04	1,32	32,03	85,86
3.	Eisenzickenről származó gyevasércminta beágyazódott kvarcdarabokkal (13-14sz.)	52,73	2,89	0,44	32,14	0,03	1,46	22,50	89,69
4.	Sopron-Potzmannról származó gyevasércminta (9-10sz.)	35,44	3,87	0,6	49,71	1,46	1,79	34,80	92,87
5.	Kópházáról származó gyevasércminta (1992 évi próbakohászat)	45,72	8,04	0,81	30,66	1,12	6,06	21,46	92,41
6.	Kópházáról származó gyevasércminta pörkölés után (1992 évi próbakohászat)	34,98	9,63	1,09	42,28	2,06	7,52	29,60	97,56
7.	Kópházáról származó gyevasércminta (1993 évi próbakohászat)	25,9	6,55	0,63	52,35	2,13	1,74	36,65	89,3
8.	Imoláról származó gyevasércminta, 1960-as ásatás	11,8	0,77	0,21	65,6	6,18	6,49	45,92	91,05
9.	Imoláról származó gyevasércminta, 1961-as ásatás	10,01	0,49	0,13	75,74	4,56	2,28	53,02	93,21
10.	Felsőcselényről származó gyevasércminta	19,35	1,54	-	73,08	2,97	-	51,16	96,94

2.2.2.2.Faszén

A bucakemence másik alapvető betétanyaga a faszén. A megvizsgált korabeli faszéndarabok döntő többsége kocsányos vagy kocsánytalan tölgyből származik. Minél lazább szerkezetű volt a fa anyaga, annál nagyobb kémiai aktív felülettel rendelkező és jobb gázátbocsátó képességű faszén készült belőle (TÖRÖK 1993). Az elégséges faszén biztosította a kohászat során szükséges nagy hőmérsékletet és redukzív, CO-dús atmoszférát. A faszén tiszta tüzelőanyag volt, minimális kén- és foszfortartalommal, így nem szennyezte a vasbucát. A faszénnek nem csak tüzeléstechnikai jelentősége lehetett, hanem a belőle keletkező fahamu szerepet játszhatott a salak összetételének módosításában is: a salakba kerülő fahamunak olvadáspont csökkentő hatása lehet, de ez a hatás nagyban függ a fahamu kémiai összetételétől és mennyiségétől.

Néhány hamuminta kémiai összetételét a 2. táblázat mutatja be (KONZ 1997, NÉMETH 2006, HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968).

2. táblázat: Néhány hamuminta kémiai összetétele

Azonosító	Megjegyzés	Kémiai összetétel (tömeg%)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
1.	Fenyőfa hamuja	-	-	1,1	40,6	12	19,4	-	-	2,3
2.	Tölgyfa hamuja1	n.a.	0,8	1,2	51,1	8,3	9,5	-	-	n.a.
3.	Tölgyfa hamuja2	n.a.	0,3	2,4	45,2	10,6	15,4	-	-	n.a.
4.	Tölgyfa hamuja3	31,8	28	2,3	10,5	9,3	10,3	6,5	-	n.a.
5.	Fahamu átl. összetétele	5	-	-	50	15	16	15	7	n.a.
6.	Bükkfaszén hamuja	15	6	14	25	10	5	-	-	19

2.2.2.3. Salak

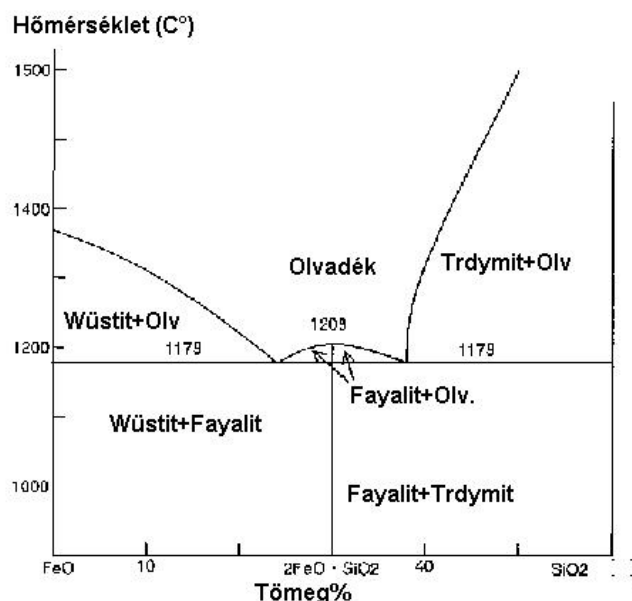
A vasbucakohászat során az érc meddő anyagiból és a vasoxidok redukciójával előálló wüstitből (FeO) salak keletkezik. Az irodalom megkülönböztet folyósalakot és kemencesalakot. A folyósalak a kohászat során kifolyik a bucakohóból, a kemencesalak viszont a kohóban marad egészen a kohászat végéig. A két salaktípus szerkezetében és kémiai összetételében is eltér egymástól. A folyósalak szerkezetére jellemző, hogy tömör, jól átolvad, többnyire folyásnyomok is jól megfigyelhetők a felületén, a kemencesalak viszont szivacsos szerkezetű.

A bucasalakok közös kémiai jellemzője, hogy a nagy mennyiségben beolvadó wüstit miatt a vastartalmuk nagy, ez az oka annak, hogy a korabeli vakohászati technológia mellett kis vaskihozatal volt elérhető (az érc vastartalmának jelentős része a salakba került). A folyósalak vastartalma túlnyomó részben kétértékű vasból (Fe²⁺) áll (ez a wüstit fázisban jelenik meg). A kemencesalak ezzel szemben a fúvósík körül kialakuló oxidáló atmoszféra miatt háromértékű vasat (Fe³⁺) is tartalmaz (magnetit fázis is jelen van, amely Fe₃O₄=Fe²⁺Fe³⁺₂O₄). A folyósalakmintákban kis mennyiségben szintén megjelenő háromértékű vas valószínűleg az évszázadok alatt bekövetkező kis mértékű visszaoxidálódás következménye (itt már hematit (Fe₂O₃) fázis megjelenése is lehetséges). A vegyelemzések eredményeiben a két és háromértékű vastartalom, azaz a wüstit és magnetit fázis FeO, illetve Fe₂O₃-ként jelenik meg (ugyanis Fe₃O₄=FeO·Fe₂O₃). A 3. táblázat néhány salakminta kémiai összetételét mutatja (az 1-5. minta esetén a régészeti feltárást Gallina Zsolt, az anyagvizsgálatokat Dr. Török Béla végezte, a 6-13. minta forrása: KANÁSZ 2005).

3. táblázat: Kora középkori salakok kémiai összetételei

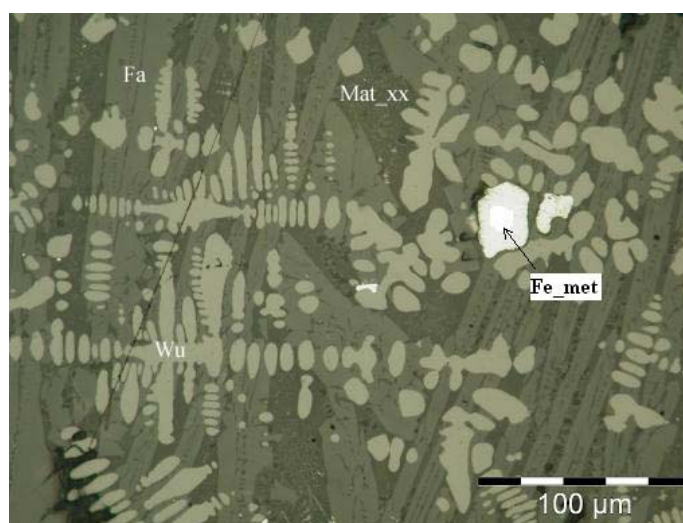
Azonosító	Megjegyzés	Kémiai összetétel (tömeg%)						ΣFe	Össz
		SiO_2	CaO	Fe_2O_3	FeO	MnO	Al_2O_3		
1.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	20,60	10,76	4,42	39,62	3,10	2,89	33,88	81,39
2.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	25,50	1,66	7,02	41,17	3,21	4,53	36,90	83,09
3.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	20,20	3,21	2,10	46,31	2,14	0,53	37,45	74,49
4.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	17,90	28,06	4,68	33,96	4,19	1,63	29,66	90,42
5.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	21,20	5,17	3,72	43,74	2,34	5,72	36,59	81,89
6.	Avar típusú bucakohóból származó kemencesalak	13,40	1,65	24,53	26,24	3,47	2,20	37,56	71,49
7.	Avar típusú bucakohóból származó kemencesalak	14,40	3,02	29,85	18,78	1,26	2,64	35,49	69,95
8.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	27,06	4,22	4,34	51,33	3,30	7,24	42,92	97,49
9.	Avar típusú bucakohóból származó folyósalak	36,67	7,13	2,69	33,06	4,10	11,76	27,57	95,41
10.	Nemesékéri típusú bucakohóból származó kemencesalak	23,41	2,86	14,57	47,51	0,92	3,94	47,11	93,21
11.	Imolai típusú bucakohóból származó folyósalak	26,14	1,28	2,53	52,39	4,26	6,86	42,48	93,46
12.	Imolai típusú bucakohóból származó kemencesalak	30,16	1,79	20,24	31,64	1,50	6,06	38,75	91,39
13.	Fajszi típusú bucakohóból származó kemencesalak	25,74	4,17	14,41	43,63	3,98	4,05	43,99	95,98

A salakok savanyú jellegűek, a nagy mennyiségben megjelenő wüstit mellett jelentős mennyiségben tartalmaznak SiO_2 -ot. A nagy SiO_2 és FeO tartalom lehetővé teszi a salakban fayalit ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) keletkezését, amely a salak túlnyomó részét alkotó kristályos fázis. Általában elmondható, hogy a többi salakalkotó kis mértékben módosíthatja az olvadáspontot (pl. a beolvadó fahamu CaO tartalma). A salakok kétalkotós összetételét legjobban a SiO_2 - FeO állapotábrával lehet közelíteni (4. ábra), mivel a többi alkotó általában jóval kisebb mennyiségben fordul elő. Az állapotábra szerint a kb. 1210°C olvadáspontú fayalit kb. 30tömeg%-os SiO_2 tartalomnál alakul ki. A wüstit-fayalit és a trdymit-fayalit eutektikum olvadáspontja kb. 1180°C .



4. ábra: FeO-SiO₂ állapotábra

A folyósalak mikroszerkezetének felépítésére jellemző, hogy a dentrites vagy táblás fayalit és a dentrites wüstit fázisokat a vasnál alacsonyabb rendszámú elemek (Al, Mg, Ca) oxidjaiból képződött amorf fázis veszi körül, amely néha szintén jelentős mennyiségű vasat tartalmaz. Esetenként előfordul a folyósalakmintákban fémes vas is, amit az őskohász egyszerűen a salakkal együtt kicsapolt. Az 5. ábrán egy, a németországi Laudersdorfból, a 9. századból származó tipikus folyósalakminta vékonycsiszolatának fénymikroszkópos képe látható (BAUERMEISTER 2005). A folyósalakminta átlagos vegyi összetétele: SiO₂=26,71%; FeO=68,63%; CaO=3,43%; P₂O₅=3,00%. A vékonycsiszolaton primer wüstit is látható, ez a salakminta nagy vastartalmára utal.



5. ábra: Folyósalak minta vékonycsiszolatának fénymikroszkópos képe (Fa – fayalit (szürke), Wu – wüstit (világosszürke), Mat_xx – amorf mártix (fekete))

2.2.2.4. Vasbuca

A kohászat célja a vasbuca előállítása volt. A kohó medencéjében kialakuló vasbuca szivacsos szerkezetű, sok salakot tartalmazó, szilárd halmazállapotú anyag, amely a kohóból kikerülő állapotában még nem alkalmas arra, hogy belőle vastárgyakat állítsanak elő. A vasbucákat ezért tömörítették, a salak nagy részét kikalapálták belőlük, majd félgömb vagy rúd alakúra kovácsolták őket.

A vasbucák kémiai tulajdonságaira jellemző, hogy ötvözőket nem vagy csak nagyon kis mennyiségben tartalmaznak, általában kis karbontartalmúak, szennyezőként a foszfor jelenik meg bennük nagyobb mennyiségben. A 4. táblázat néhány magyarországi kora középkori vasbuca és vastárgy kémiai összetételét mutatja (GÖMÖRI 2000, HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968).

4. táblázat: Vasbucák és vastárgyak kémiai összetételei

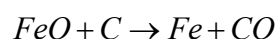
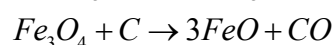
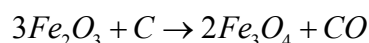
Azonosító	Megjegyzés	Kémiai összetétel (wt%)			
		C	Si	Mn	P
1.	Kis buca, Jevenstedt	0,20	0,05	0,07	0,08
2.	Nagy buca, Jevenstedt	0,05	0,06	0,04	0,08
3.	Kard, Nydam	0,52	0,11	0,02	0,15
4.	Kard, Nydam	0,42	0,00	0,02	0,21
5.	Kard, Nydam	0,52	0,06	0,03	0,14
6.	Kard, Nydam	0,43	-	-	0,12
7.	Vaskés, hazai (La Tène kori)	0,50	0,08	0,06	0,09
8.	Szeg, Wollersheim	0,56	0,18	0,06	0,14
9.	Szeg, Wollersheim	0,06	0,72	0,06	0,21
10.	Szeg, Wollersheim	0,40	0,78	0,03	0,32
11.	Szeg, Wollersheim	0,49	0,60	0,07	0,56
12.	Szeg, Wollersheim	0,43	0,26	0,00	0,47
13.	Pajzsdudor, hazai (La Tène kori)	0,12	0,09	0,02	0,05
14.	Buca, Szalacska	0,22	0,10	0,01	0,03
15.	Buca, Hévíz	1,26	0,04	0,01	0,02
16.	Buca, Sopron	1,58	0,15	0,01	0,55
17.	Buca, Sopron	1,00	0,26	0,17	0,10
18.	Buca, Heténypuszta	0,05	0,05	0,09	0,01
19.	Buca, Petőháza	0,12	0,02	0,54	0,01
20.	Buca, Eperjes	0,05	0,10	0,54	0,05
21.	Buca, Bácsa	0,01	0,05	0,00	-
22.	Buca, Bácsa	0,16	0,05	0,00	-
23.	Buca, Somogyfajsz	0,40	0,48	0,92	0,94
24.	Buca, Somogyfajsz	0,74	0,98	0,06	1,22
25.	Buca, Somogyfajsz	0,16	0,72	0,71	0,62
26.	Buca, Somogyfajsz	0,03	0,26	0,16	0,10

2.2.3. A buca kohászat metallurgiája

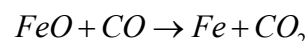
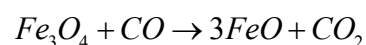
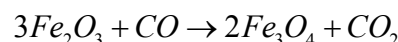
A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai az irodalomban csak nagy vonalakban tisztázottak. A kohósításra szánt gypvasércet az őskohászok rendszerint pörkölték. A pörkölés során a vas-hidroxidok hidrátvíztartalma eltávozott, hematit keletkezett. A kohóba adagolt érc hematitjából indirekt és direkt redukcióval színvas keletkezik. A redukció lépcsőfokai: Fe_2O_3 (hematit) $\rightarrow$ Fe_3O_4 (magnetit) $\rightarrow$ FeO (wüstit) $\rightarrow$ Fe (színvas).

A redukció lehet direkt és indirekt, azaz történhet:

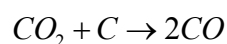
Karbonsalakkal:



Szénmonoxiddal:

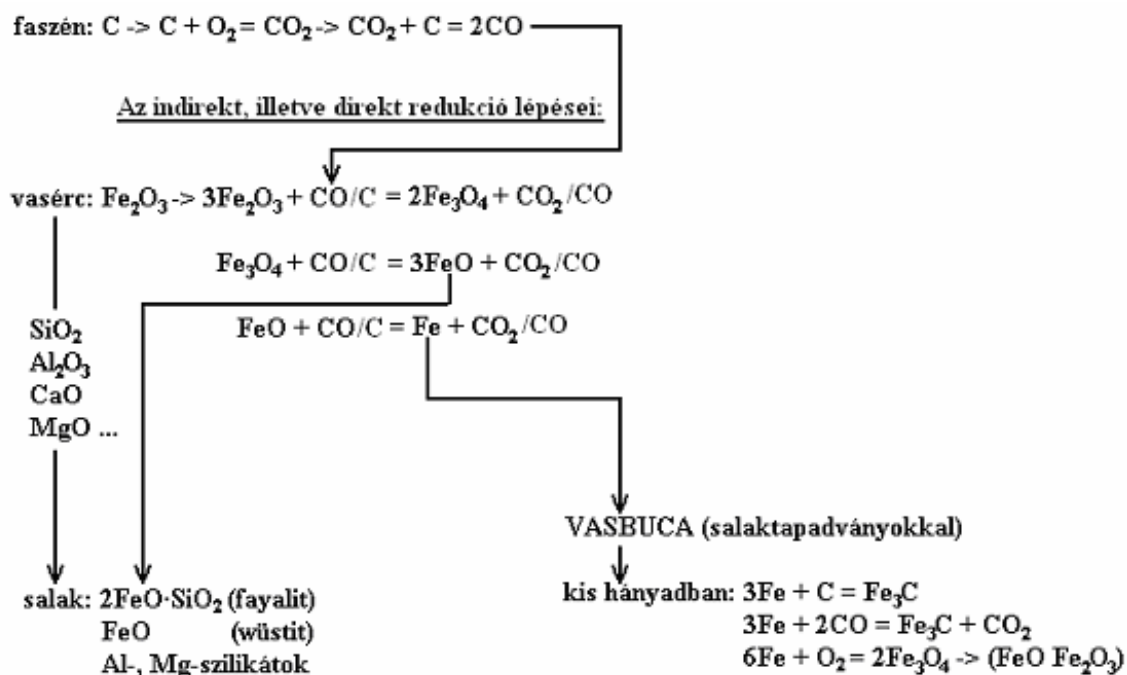


A meddő anyagokból és a wüstitből olvad össze a salak. A kohó redukzív atmoszféráját a szénmonoxid biztosítja, amelyet a faszén égésével keletkező széndioxid és a faszén karbonjának reakciója (Boudouard-reakció) termel:



A vasbuca a kohó atmoszférájától függően felszenülhet, vagy oxidálódhat.

A bemutatott folyamatokat foglalja össze a 6. ábra (TÖRÖK 2001).



6. ábra: A vasbuca-előállítás kémiai metallurgiai folyamatai

2.2.4. Hazai és külföldi rekonstrukciós kísérletek

A bucavaskohászat technológiájára és a végbemenő fizikai, kémiai folyamatokra vonatkozóan az archeometriai vizsgálatok mellett nagyon sok információ szerezhető a rekonstrukciós kísérletekből. Ezt felismerve Magyarországon is történtek próbakohászatok a régészeti leletek alapján megépített kora középkori bucakohók másolataiban. A 5. táblázat ezeket a kísérleteket mutatja be (HECKENAST-NOVÁKI-VASTAGH-ZOLTAY 1968, GÖMÖRI 2000, KANÁSZ 2005).

5. táblázat: Hazai rekonstrukciós kísérletek

Zoltay Endre (Lenin Kohászati Művek)	
Dátum	1960-as évek eleje
Érc	Kezdetben krivoj-rogi vörösvasérc, majd rudabányai ankretit, végül az imolai kohótelep feltárásánál talált gypevasérc
Technológia	5 próbakohászat imolai típusú kohóban Előre behelyezett érc-faszén keverék, később a torkon át beadagolt érc-faszén keverék Ércpörkölés nincs Elektromos fűtás Gézőszetétel, hőmérséklet, befűjt levegő térfogatáramának mérése
Eredmény	Többnyire vasrögök, egy alkalommal kisebb vasbuca
Dr. Gömöri János, Dr. Török Béla	
Dátum	1990-as évek eleje
Érc	Régészeti feltárásról származó kópházi gypevasérc
Technológia	2 próbakohászat nemeskéri típusú korhű kohóban Részben előre behelyezett érc-faszén keverék, részben a torkon át beadagolt érc-faszén keverék Ércpörkölés van Kézi fűtás Hőmérséklet mérése
Eredmény	Az első kohászat eredménye redukálatlan ércből álló összesült salakkonc, amelyet a második kísérlet során ismét kohósítottak. Így egy erősen salakos, még nem kovácsolható vasbucát kaptak.
Dr. Fehér András, Kanász Tamás	
Dátum	2003
Érc	Petesalmi tóérc (Somogy megye déli részéről, egy kohótelep közeléből)
Technológia	4 próbakohászat kezdetben nemeskéri típusú kohóban, később nem történelmi kohóban Torkon át beadagolt érc-faszén keverék Ércpörkölés nincs Elektromos fűtás Hőmérséklet mérése Két lépcsős technológia: 20 órás redukció kis hőmérsékleten, majd 1-2 órás salakkifolyatás nagy hőmérsékleten
Eredmény	Egy alkalommal 1,43kg-os vasbuca

Bartha László	
Dátum	2007-2009
Érc	Fancsikán gyűjtött gyepvasérc (Debrecenről délre)
Technológia	3 próbakohászat salakgödrös német bucakohóban Torkon át beadagolt érc-faszén keverék Ércpörkölés nincs Elektromos fűjtetés
Eredmény	Egy alkalommal 1,1 kg-os vasbucá

Európa több országában végeznek rendszeresen kísérleti olvasztásokat. Ezekről számos publikációban olvashatunk, interneten nagyon sok beszámoló, kép és videóanyag tekinthető meg. Az internet segítségével több nemzetközi munkacsoport szerveződött, amelynek tagjai (régészek, történészek, mérnökök) egymással megosztják az elvégzett rekonstrukciós kísérletek eredményeit, tapasztalatait. Az utóbbi években több archeometallurgiai témával foglalkozó nemzetközi konferencia, szimpózium, workshop is megrendezésre került. A szimpóziumokon és workshopokon a bucavaskohászati technológiát felelevenítő csapatok vesznek részt, és egymással versenyezve igyekeznek minél jobb minőségű, minél nagyobb tömegű vasbucát nyerni.

Összességében elmondható, hogy külföldi országokban az archeometallurgiai kutatások erős támaszát adják a kísérleti régészeti eszközök felhasználásával végzett sikeres próbakohászatok. Azonban külföldön nem magyar ércekkel, nem magyar kohótípusokban, nem magyar régészeti leletek alapján, és sokszor nem is korhűen folynak a kísérletek, ezért a kitapasztalt technológia, az elvégzett mérések és vizsgálatok bár támpontokat jelenthetnek a magyar rekonstrukciós kísérletek számára, az elért eredmények nem vehetők át egy az egyben.

3. CÉLKITŰZÉSEK

1. Az iparrégészeti leletek alapján egy kiválasztott hazai kohótípus rekonstruálása és abban eredményes és megismételhető próbakohászatok elvégzése.
2. A sikeres és reprodukálható vaselőállítás számszerűsíthető technológiájának feltárása a rekonstrukciós kísérletek alapján.
3. A technológiai paraméterek műszeres mérése a rekonstrukciós kísérletek során.
4. Korszerű anyagvizsgálati módszerekkel a rekonstrukciós kísérletek betétanyagainak valamint salak-, vasbuca- és vastárgymintáinak anyagvizsgálata.
5. Olyan laboratóriumi kohómodellek kidolgozása, amelyek segítségével a bucakohóban végbemenő folyamatok vizsgálhatók.
6. A rekonstrukciós kísérletek során elvégzett mérések, a laboratóriumi modellek és az anyagvizsgálatok segítségével felvázolni a kora középkori vaselőállítás során lezajló fizikai-kémiai folyamatokat, különös tekintettel a bucakohó metallurgiai folyamataira.
7. A metallurgia folyamatok részletes ismeretében a technológiára vonatkozó megállapítások kidolgozása:
 - Történhet-e, történhetett-e salakképzés, salakmódosítás a bucakohóban?
 - Hogyan változik a vaskihozatal az egyes technológiai paraméterek változásának függvényében?
 - Milyen vaskihozatal érhető el, milyen vaskihozatazt érhettek el az őskohászok?
8. Modern kori alkalmazási javaslatok kidolgozása a megismert bucavaskohászati technológiára alapozva.

4. REKONSTRUKCIÓS KÍSÉRLETEK ÉS A VASBUCA-KOHÁSZAT TECHNOLÓGIÁJA

Ebben a fejezetben a két év alatt elvégzett több mint húsz rekonstrukciós kísérlet tapasztalatait összegzem, és bemutatom a vasbucakohászat lehetséges kora középkori technológiáját. Betekintést nyerünk a vas sikeres és korhű előállításának kora középkori technológiai lépéseibe a gyepvasércbányásztól kezdve egészen a kapott vasbucából kikovácsolt vastárgyakig. A dolgozathoz tartozó DVD mellékleten egy 18 perces ismeretterjesztő film található, amelynek megtekintése elősegíti a gyakorlati lépések jobb megfigyelését, részletesebb megismerését (a filmet ajánlott még a jelen fejezet elolvasása előtt megnézni a jobb megértés érdekében).

Ebben a fejezetben a vasipar három fő ága elevenedik fel:

- gyepvasércbányászat;
- kohászat és a hozzá szorosan kapcsolódó tevékenységek (faszénégetés, gyepvasércpörkölés, stb.);
- kovácsolás – a vasbuca megmunkálása.

A magyarországi kora középkori vaskohászati technológia felelevenítése kísérleti régészeti eszközökkel történik. Az eredményes rekonstrukciós kísérletek alapját egyrészt a régészeti feltárások leletanyaga képi. Másodrészt a műszaki tudományok nyújtotta ismeretek felhasználása a sokszor hiányosan, leromlott állapotban előkerülő vasipari objektumok működésének megértését, és azok életre keltését jelentősen megkönnyíti. Harmadrészt a már elvégzett próbakohászatok során gyűjtött újabb és újabb ismeretek a technológia tapasztalati úton történő feltárását segítik elő.

4.1. Gyepvasércbányászat, gyepvasérclelőhelyek

Gyepvasércet Magyarország területén sokfelé találhatunk, ezek kohósíthatósága azonban nagyon eltérő. Nem minden lelőhely ércének van elegendően nagy vastartalma, illetve néha az ércben található meddő összetétele (ha nem elég savanyú) nem teszi lehetővé a kívánatos alacsony olvadáspontú salak keletkezését. Jelentős probléma, hogy a gyepvasérc foszfortartalma néha túl nagy (mezőgazdasági területek közelében feltételezhetően a műtrágyázás hatására), emiatt a vasbucába sok foszfor kerülhet.

A jó minőségű gyepvasérc tapasztalati úton felismerhető fizikai tulajdonságai:

- szín: a barna szín arra utal, hogy az érc vasban gazdag, a töret színe jó minőségű gyepvasérc esetén szintén rozsdabarna; a töret színében megjelenő kékes árnyalat nagy foszfortartalomra utalhat, ezért az ilyen színű ércek gyűjtését kerülni kell;
- állag: jó, ha az érc kézzel morzsolható állagú, a bucakohó redukáló atmoszférájában a porózus szerkezetű, nagy fajlagos felületű érc redukálódna gyorsabban.

A felismerhető fizikai tulajdonságok ellenére az érc kohósíthatósága és kohósítás közbeni viselkedése legegyszerűbben egy próbakohászat elvégzésével állapítható meg.

Az elmúlt két évben négy lelőhely gyepvasércét próbáltam meg kohósítani, de ez idáig egyik lelőhely érce sem nevezhető a bucakohászati technológiára tökéletesen alkalmasnak. Ezek a lelőhelyek a felfedezésük időrendjében:

- Fancsika (Debrecenről 5km-re délre);
- Kék-Kálló völgye (Létavértes község mellett);
- Somogyszob;
- Petesmalom (Lábod község mellett).

A legjobb minőségű gyepvasérc a petesmalmi lelőhelyen volt gyűjthető. Ez a gyepvasérclelőhely Dr. Fehér András kohómérnök útmutatása alapján került a látókörömbé. A gyepvasérc itt egy halastó medréből gyűjthető össze, ahol számos, a tó partoldalába bevált Árpád-kori bucakohót tárt fel Dr. Költő László vegyészmérnök-muzeológus. Ezekben feltehetően a tómederben található tóércet kohósították.

A gyepvasérc keletkezésére általában jellemző, hogy nagy oldott vastartalmú vizekből (felszíni vízfolyások vagy talajvíz) ferrihidroxidok kicsapódásával alakulnak ki. A kicsapódást a redoxipotenciál változása idézi elő. A redoxipotenciál megváltozását több tényező változása okozhatja: levegőellátottság, pH, stb. Talajvizek esetén: a talaj szemcsemérete és nedvességtartalma is lényeges lehet.

Így, például oldott vasban gazdag, földfelszín alatti vízfolyások felszínre kerülésekor a víz oxigéntartalma jelentősen megnő, ezért a redoxipotenciál növekedése miatt a vas kicsapódása következik be. Ez történik ma is a petesmalmi gyepvasérclelőhelyen, a halastó fenekének teljes „elvasasodását” okozta a mélyből feltörő oldott vastartalmú víz, amelyből a tó nagyobb redoxipotenciálú vizével keveredve ferrihidroxidok csapódnak ki. A petesmalmi halastó esetén a vas tőzegre vált ki, amely idővel teljesen elkorhadt, így a vasérc vastartalma a szokásosnál jóval nagyobb. Más lelőhelyek (pl. a fancsikai) esetén a vízben oldott vas kvarc vagy más talajásványok környezetében válik ki. Az így keletkező vasérc sokkal több meddő anyagot tartalmaznak.

Szerepet játszhatnak még a vasbaktériumok (pseudomonas) a vasérc keletkezésében. Ezek a vas oxidációjából ($\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) nyernek energiát, anyagcseretermékükből pedig limonit keletkezik. A ferrihidroxid lesüllyed a mocsarak fenekére, ott felhalmozódva legfeljebb 1m vastagságú, de nagy kiterjedésű ércfelért képez (Dr. Gruiz Katalin: Talajmikrobiológia előadásai alapján).

4.2. A kohászat és előkészületei

4.2.1. Kohóépítés

Ahhoz, hogy az összegyűjtött gyepvasércet kohósítani lehessen, bucakemencéket építettem. A kezdeti kísérleteket szabadonálló nemeskéri típusú kohóban végeztem, de annak számos hátránya miatt hamar áttértem a beépített fajszi típusú kohóra, amelynek kialakításához műhelygödört kellett ásni (ld. 2. ábra és 3. ábra). A műhelygödör oldalába beépített fajszi típusú kohó előnyei és hátrányai a szabadonálló bucakemencékkel szemben:

Előnyök:

- a kohó teljes magasságában a fölbe van mélyítve, így a kohászat során fellépő hőveszteség kicsi;
- egyszerűbb megépíteni;
- több kohászat folytatható le benne, mert a szabadon álló típusokkal szemben a falazat jóval tartósabb, könnyebben javítható, ezért a megismételt kísérletek számára megfelelőbb.

Hátrány:

- meredek partfalra van szükség, amelybe beásható a kohó;
- hosszabb kiszáradási, előfűtési idő szükséges.

A rekonstrukciós kísérletek szempontjából a fajszi típusú kohó további előnye volt, hogy a Somogyfajszi Őskohómúzeum kiállításán megtekinthetők az eredeti bucakemencék, így pontos másolatuk könnyedén elkészíthető.

A műhelygödör számára megfelelő hely kiválasztása után megkezdődhet annak kiásása (ld. DVD melléklet). Az elkészült műhelygödör mélysége 50-80cm, négyszögletes alapterületű, oldalhossza a bele kerülő bucakohók számától függően néhány méteres. A műhelygödörnek a bucakohók előterébe eső részei mélyebbek, így a kohók medencéje

mélyebbre kerülhet a gödör átlagos mélységénél. A bucakohók akár teljes magasságukban földbe ásottak is lehetnek. A műhelygödör egyik oldala bejáratként szolgál, ezzel az oldallal szemkötti két sarokban és a többi három oldalban bucakohók alakíthatók ki.

A bucakohók építése során a műhelygödör oldalfalába mélyedést alakítottam ki, amelyet ezután agyag-homok keverékével kitapasztottam. A kitapasztott üregnek azután homlokfalat építettem úgy, hogy alul egy kb. 25cm átmérőjű nyílást hagytam a későbbi mellfalazat számára. A 7. ábra két elkészült és egy félig kész, homlokfallal még nem rendelkező fajszi-típusú bucakemencét mutat. A már elkészült kohók mellnyílása mellfallal van lezárva, a sarokban kialakított kohó mellfala már fűvókával és még nyitott salakcsapoló nyílással van ellátva.



7. ábra: Rekonstruált műhelygödör részlete

A bucekemence építéséhez használt agyag-homok keverék két fontos fizikai tulajdonsága a szemcseátmérő és a nedvességtartalom. A szemcseátmérő a nedvességtartalommal szorosan összefügg, ugyanis a szemcseméret meghatározza a szemcsék közötti pórusok méretét. Minél kisebbek ezek a pórusok, annál erősebben kötődik a talaj nedvességtartalma a szemcsékhez. A finomszemcsés agyag sok vizet képes megkötni, a durvaszemcsés homok keveset. Az agyag-homok keverékből épített kemence a szárítás, majd üzem közbeni kiégése során először kapilláris, majd fizikailag kötött, végül kémiai kötött víztartalmát veszíti el. Ezt térfogatváltozás, apadás kíséri (Dr. Kovács

Miklós: Talajmechanika előadásai alapján). A keverék nagy kezdeti víztartalma esetén a térfogatcsökkenés mértéke is nagy lesz, a kemence falazata megrepedezik. Az agyag-homok keverék elkészítésekor arra kell törekedni, hogy a lehető legnagyobb legyen a keverékben a durva szemcsés, kevés vizet megkötő homok aránya, illetve minél kisebb legyen a keverék nedvességtartalma. A legjobb, ha a keverék éppen formázható állagú: földnedves és tömegének kb. 2/3-ad része homok.

Az elkészült bucakemencét ki kell szárítani. A szárítás lassú fatüzeléssel általában 15-20 órát vesz igénybe. Erős hőhatás a még teljesen ki nem száradt bucakemencét nem érheti, mert a gőzzé alakuló nedvességtartalom repedéseket okozhat a falazaton. A falazaton keletkező apró repedéseket utólagos betapasztással lehet kijavítani.

A kohó kiszárításával párhuzamosan el lehet készíteni a fűvókákat. A fűvókák a fűjtatóból kifűjt levegő kohóba vezetését szolgálják, mivel a fűjtató vascsőre nem viseli el a fűvósíkban kialakuló nagy hőmérsékletet. A fűvókák anyaga rendszerint samott, mert az agyagfűvókák fűvósíkba lógó orra gyakran meglágyul. A fűvókák megformázása egy farúdon történik (ld. DVD melléklet).

4.2.2. Gyepvasérc előkészítése

A gyepvasérclelőhelyen összegyűjtött érc mosása már általában a helyszínen megtörténhet. A vasércrögöket egy közeli vízfolyás vizében mosva meg lehet szabadítani a rájuk rakódott meddő (sár, homok, iszap, növényi részek) jelentős részétől. Ezután a gyepvasércrögök aprítása következik. Az ideális szemcseméret kb. 0,5-1cm, de kerülni kell a poros frakció adagolását. A gyepvasérc ezután, nedvességtartalmának eltávolítása céljából, a műhelygödör közelében kialakított ércpörkölő gödörbe kerül. Az ércpörkölő gödör kb. 20-30cm mélységű, 1-1,5m átmérőjű kerek gödör. A gyepvasérc megpörkölésére égő fahasábokon és izzó parázson kerül sor (ld. DVD melléklet).

A pörkölés során végbemenő kedvező folyamatok:

- eltávozik az érc fizikailag, majd kémiaiilag kötött (hidrátvíz) nedvességtartalma;
- a limonitos (barna) ércből hematitos (vörös) érc lesz, esetleg már magnetites (szürke) fázis is megjelenhet (előredukció), ez jelzi a művelet eredményességét;
- jóval porózusabbá válik a gyepvasérc szerkezete, ez segíti a kohó torkában és aknájában végbemenő szilárd fázisú redukción;
- az érc faszénnel keveredik össze, ez segíti a kohósítást;

- az érc fahamuval is összekeveredik, ez a salakképzést segíti;
- az érc-faszén elegy előmelegszik, így a kohó torkát nem hűtik a beadagolt betétanyagok.

4.2.3. Faszénégetés

A kohótelepek régészeti feltárásai során sokszor faszénégető boksák sekély, tányér-szerű gödreit is megtalálták. A kohászat nagy mennyiségű faszenet igényelt, amit a kohótelepekhez közeli erdők fáiból fedeztek. Tapasztalataim szerint 100 kg fából 20-25kg faszén égethető le, kb. 30 óra alatt. A faszénégető boksában a fa száraz lepárlása történik, de a levegő oxigénjétől (legalábbis kezdetben) nem teljesen elzárva.

A faszénégetés során izzó parázsra szorosan egymás mellé helyezett fahasábokat rakunk úgy, hogy a rakás végül egy félgömböt formázzon. Már a boksa megrakása alatt elkezdődik a fahasábok égése, szenülése, ezért sietni kell, hogy minél kevesebb faszén izzon el. A boksát avarral befedve elzárjuk a levegőtől, majd vékony földréteggel borítjuk be. Mivel a levegő kis mennyiségben képes bejutni a boksa belsejébe, a már meglévő faszén elizzása hőt termel, ez fedezi a fa nedvességének gőzzé alakulásához szükséges hőmennyiséget. A boksa ekkor fehér füstöt bocsát ki. Amikor a faanyag teljesen száraz, további hőközlés hatására megkezdődik a fa termikus bomlása (elgázosodása), amely mintegy 225°C-ig endoterm. A szükséges hőenergiát továbbra is a kis mennyiségben bejutó levegő hatására elizzó faszén biztosítja. 225°C felett a fa termikus bomlása exotermmé válik. Ezután a faszén elizzása mellett ez az exoterm bomlási folyamat egyre nagyobb részben hozzájárul a még megmaradt faanyag nedvességének gőzzé alakulásához, illetve 225 °C alatt végbemenő termikus bomlásának hőigényéhez. Ilyenkor fokozatosan csökkenthető a beengedett levegő mennyisége. A faszén elizzása tehát a levegő beengedésének csökkenésével párhuzamosan lelassul, majd megáll, azaz nincs további faszénveszteség. A termikus bomlás során nagy mennyiségű gyúlékony szénmonoxidból és szénhidrogénekből álló gázkeverék keletkezik, amely azonban nem gyullad meg, hanem eltávozik a boksa felületén. Ekkor a boksa már kék színű füstöt bocsát ki, és eléri a legnagyobb hőmérsékletét is, amely a földréteg alatt hozzávetőlegesen 400-450°C (saját hőmérsékletmérési eredmény). Amikor a berakott faanyag teljes mennyiségében lezajlott a termikus bomlás, és csupán a szilárd faszénváz maradt vissza, megszűnik a boksa füstölgése. A boksa lassan kihűl, és ki lehet bontani (Dr. Kovács Zsolt: Faipari technológiák előadásai alapján).

A jó faszénkihozatal elérését a gyakorlati tapasztalatok és az elméleti háttérismeretek együttesen segítik. Mivel a boksában lezajló folyamatok (faanyag száradása, termikus bomlása, faszén elizzása) egymással párhuzamosan mennek végbe, azok földtakarással történő szabályozása nagy tapasztalatot igényel.

4.2.4. Bucavaskohászat

Az elmúlt két év során huszonhárom próbakohászatot végeztem. Az első tizenhárom során nem sikerült nagy méretű, jól kovácsolható vasbucát előállítani. A tizennegyedik próbakohásztól kezdve viszont a megfelelő minőségű petesalmi ércel folytatott kísérletek sikerre vezettek, sorra keletkeztek a 2-3 kilogrammos, jól kovácsolható vasbucák. Az összegyűjtött tapasztalatok alapján immár felvázolhatóak az eredményes bucavaskohászat technológiai lépései:

a.) A kohó előfűtése:

A bucakohók kiszáritása után azok előfűtése kezdődik meg. A kiszáritás alatt fát égetünk a bucakemencében, az előfűtés során azonban már faszenet. A két munkafázist az is megkülönbözteti, hogy ez előbbi tüzet természetes huzat szítja, az utóbbit már kézi fűjtatás. Az előfűtés addig tart, amíg a távozó torokgázokat meg nem lehet gyújtani és stabilan égő torokláng nem jelenik meg. A torokláng a bucakohó atmoszférájának éghetőségére, nagy szénmonoxid-tartalmára, azaz annak redukáló képességére utal.

b.) Első ércréteg terítése:

A stabil torokláng kialakulása után kezdődik meg a kohászat az első ércréteg beadagolásával. Közepes intenzitású fűjtatás mellett a süllyedő elegyoszlopot folyamatosan pótolni kell, felváltva egy-egy réteg ércpörkölő gödörből kikerülő gyepvasércel és faszénnel. A betétanyagok tömegaránya kb. 1:1. A gyepvasércréteget a petesalmi gyepvasérc kohósítása esetén kis mennyiségű salakképzővel (fahamu és homok keveréke) is meg kell hinteni.

c.) Salakcsapolás:

Az első ércréteg terítésétől számított 2-3 óra elteltével (a kohó medencéjének mélységétől, geometriai kialakításától függően) a gyepvasérc meddőtartalma és a salakképző összeolvadásából keletkező híg folyós salak feltölti a medencét. Elérve a fúvóka szintjét, jelzi a salakcsapolás szükségességét. Ekkor a fúvóka alatt 5-10 cm mélyen lyukat kell ütni a mellfalba, amelyen keresztül az olvadt salak kifolyhat. A lyukat a következő salakcsapolásig agyaggal tapasztjuk vissza. A salakcsapolást ezután

hozzávetőlegesen félóránként el kell végezni. Ha ezt elmulasztjuk, az olvadt salak befolyik a fúvókába, és megdermed, majd a befűjt levegő áramlását lefojtja. Ez a medence lehűléséhez, és még több salak megdermedéséhez vezet.

d.) Az elegyoszlop fúvósíkba süllyesztése:

Az első ércréteg terítésétől számított 3-4 óra elteltével a medencében növekvő vasbuca kitapintható például egy, a fúvókán keresztül bedugott vaspálcával. Ha a vasbuca már javarészt kitölti a kohó medencéjét (ez a kísérletek többsége esetén mintegy 10-12kg érc kohósítása után történt meg), akkor érdemes a további ércadagolást megszüntetni. Az utolsó ércréteg terítése után meg kell várni, amíg az elegyoszlop a fúvósík magassága köré süllyed. Ekkor már csak vékony, izzó faszénréteg borítja a vasbucát. A fűjtetés intenzitását növelni kell, hogy a medence hőmérsékletét emelve minél több olvadt salakot ki lehessen csapolni, elválasztva azt a vasbucától.

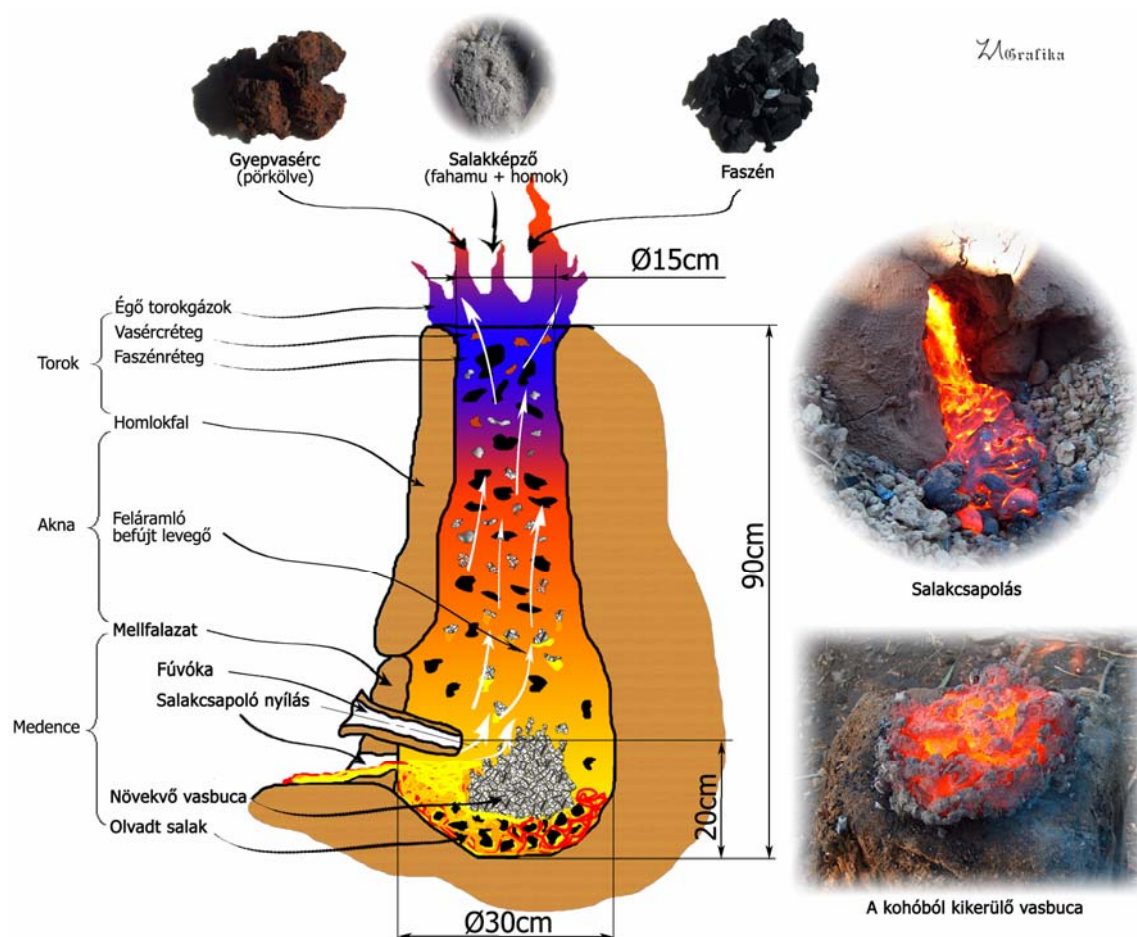
e.) A vasbuca tömörítése:

A vasbuca tömörítését közvetlenül a kohóból való kihúzása előtt el kell végezni. A vékony faszénréteg alatt nyugvó vasbucát a kohó torkán keresztül, farúddal megdöngöljük. Ekkor a gyengén összehegedt részeket a buca tömör magjához tűzihegesztjük.

f.) A kohó mellfalazatának kibontása és a vasbuca továbbtömörítése:

Az első ércréteg terítésétől számított 4-6 óra elteltével a mellfalazat megbontható a vasbuca kiemeléséhez. A buca rendkívül durvaszemcsés, köszönhetően a több órás, nagy hőmérsékletű hőntartásnak. A vasbucára tapadt szilárd salakkoronát (kemencesalak) le lehet verni, és megkezdődhet a vasbuca tömörítése. A farönkre helyezett, még izzó vasbuca tömörítését fakalapáccsal végezzük. A tömörítés után egy hozzávetőlegesen gömb alakú, kevés salakot tartalmazó, de még mindig szivacsos szerkezetű, 1-2 kg tömegű vascipót kapunk. Ennek további feldolgozása kovácsolással történik.

A próbakohászatok lefolytatására általában jellemző, hogy nem minden esetben sikerül eljutni az elegyoszlop lesüllyedéséig, és a vasbucát még a kohóban megtömöríteni. Salakkezelési problémák miatt előfordul, hogy a kohászatot meg kell szakítani, és a medence kihűlése előtt ki kell húzni a még kicsi, erősen salakos, szivacsos szerkezetű vasbucát. A vasbucakohászati folyamatát illusztrálja a 8. ábra.



8. ábra: A kísérleti bucakemence felépítése, betétanyagai, salakja és vasbucája

Az elvégzett kísérletekről elmondható, hogy a petesalmi ércel végzett próbakohászatok mindegyike sikeres volt, próbakohászatonként 8-12kg ércet kohósítva, a kohászattal és a kohó előfűtésével együtt 20-25kg faszén felhasználása mellett, 1,5-2kg tömegű tiszta vasat sikerült kinyerni, amely kiválóan kovácsolható, de hidegen sokszor túlzottan rideg volt. A fanciesikai lelőhely ércéből előállított vasbuca nem volt kovácsolható, a melegalakítás során minden esetben darabokra törött. A somogyszobi lelőhely ércét felhasználva csak nagyon kis vaskihozatal volt elérhető, de a kapott vasrögök kovácsolhatók voltak. A Kék-Kálló völgyi érc kohósításra alkalmatlan, nem keletkezett belőle megmunkálható mennyiségű vas.

4.3. A vasbuca átkovácsolása

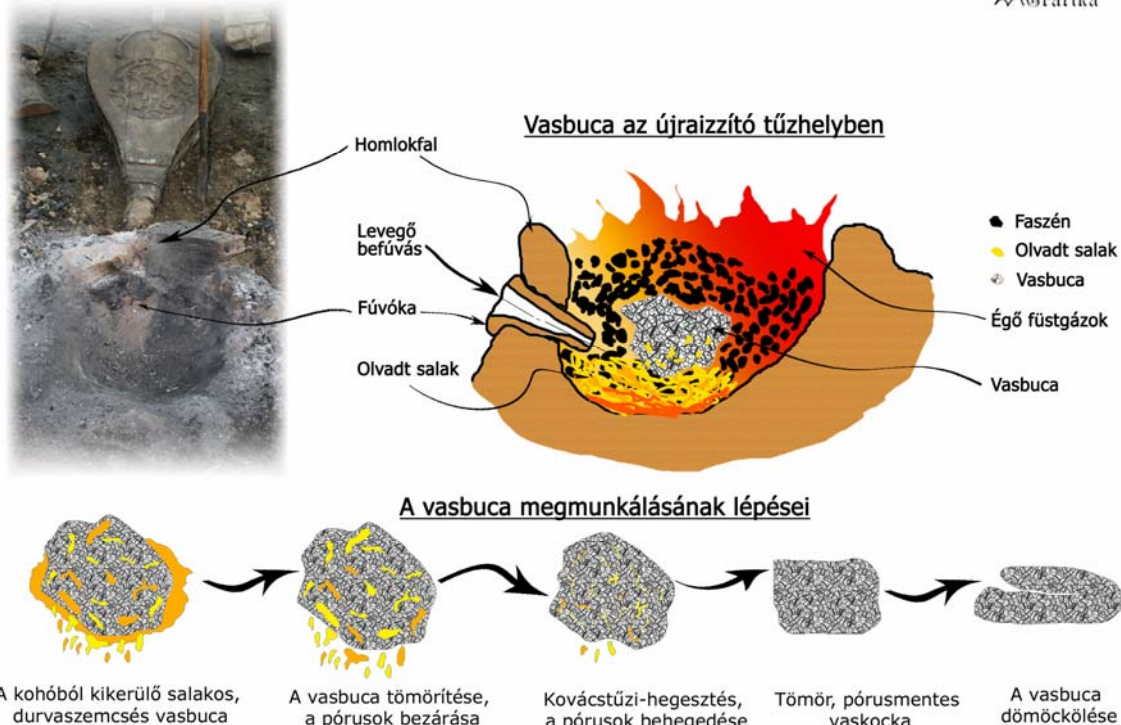
Az ismételt tömörítések és átkovácsolások érdekében a vasbuca újrahevítése az újraizzító tűzhelyben történik (9. ábra). Az újraizzító tűzhelyből kikerülő vasbuca tovább

tömöríthető farönkön fakalapáccsal, majd üllőn vaskalapáccsal. A tömörítés és a kovácsolás két legfontosabb célja:

- a vasbuca salaktartalmának kikalapálása;
- a vasbuca különálló részeinek összehegesztése,
- szemcssefinomítás.

Rekonstruált újraizzító tűzhely

MAgrafika



9. ábra: A vasbuca kovácsolása

A tömörítés során a vasbuca pórusai bezáródnak, a bennük lévő salak nagy része kifröccsen, de a pórusok még nem hegednek össze. A tömörített vasbuca megfelel a kora középkori műhelygödrök termékének. Az ilyen állapotú vascát szállították kovácsfalvakba, ahol vastárgyakat kovácsoltak belőlük.

A vasbuca kovácstűzi-hegesztése során a pórusokat borító salakfilm kipréselődik. A kifröccsenő folyékony salak maga után fémtiszta felületeket hagy, amelyek a tűzhegesztési hőmérsékleten összehegednek. Ezután a vasbuca megmunkálás közben már homogén vastömbként viselkedik, kovácsolása a mai kis széntartalmú szerkezeti acélokéhoz hasonlóan történik. A szemcseszerkezet megfinomítása céljából a tömör, pórusmentes vastömböt nagymértékű átkovácsolással munkáljuk meg – nagy alakváltozásra kell törekedni. Egy praktikus megmunkálási lehetőség a dömöckölés,

amely során a vasbucát rúddá kovácsoljuk, majd a rúd végét U-alakban visszahajtva önmagával tűzhegesztjük a munkadarabot.

Az eredményes kísérletek során kapott néhány vasbucát átkovácsoltam, rúddá nyújtottam le (10. ábra). A vasrudakból eredeti, kora középkori vastárgyak replikáját próbáltam meg elkészíteni (11. ábra).

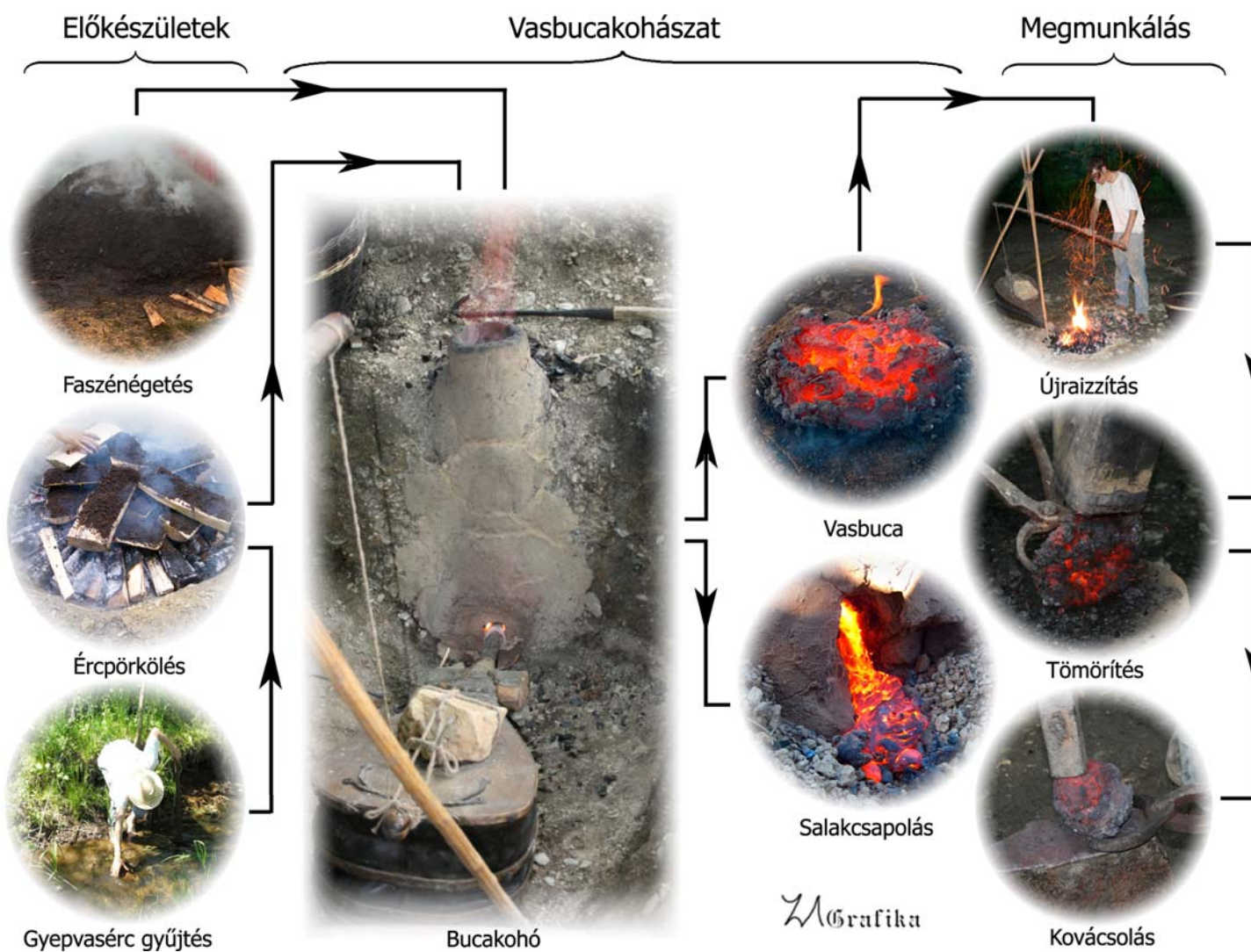
**a****b**

10. ábra: Átkovácsolt vasbucák – a) tömörített majd kocka alakúra kovácsolt vasbuca, tömeg: 760gramm; b) dömöckölt vasrúd, tömeg: 330gramm.

**a****b**

11. ábra: Vasbucákból kovácsolt vastárgyak – a) félkészfokos, tömeg: 480gramm; b) hegyes vasrúd, tömeg: 20gramm.

Összefoglalva ez eddigieket, a kora középkori vaselőállítás folyamatábráját mutatja a 12. ábra.



12. ábra: A kora középkori vasgyártás folyamatábrája

5. MÉRÉSEK ÉS ANYAGVIZSGÁLATOK

A rekonstrukciós kísérletek során mérésekre került sor a betétanyagok mennyiségére, a bucakohó hőmérsékletprofiljára és atmoszférájának összetételére vonatkozóan. A kísérleteket gyepvasérceken, salakokon, vasbucákon, illetve a belőlük kikovácsolt vastárgyakon elvégzett anyagvizsgálatok követték. Ebben a fejezetben a mérések és anyagvizsgálatok eredményeit ismertetem.

5.1. A rekonstrukciós kísérletek alatt elvégzett mérések

Méréseket csak sikeres kohászati technológia mellett célszerű végezni. A kezdeti, még sikertelen próbakohászatok célja a helyes technológia kitapasztalása volt, ezért bár mérések ezek alatt is történtek, az eredményekből nem vonhatók le megalapozott következtetések. A következőkben a 21. próbakohászat, az egyik legeredményesebb kísérlet során elvégzett mérések eredményit ismeretem.

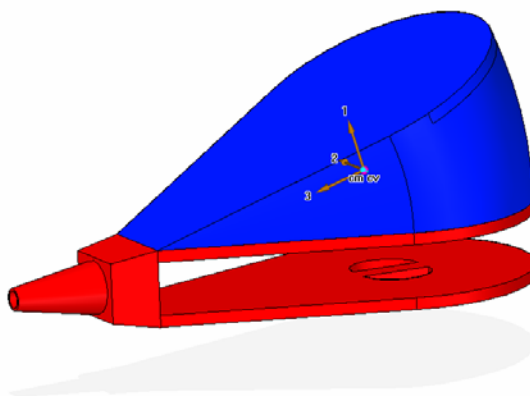
5.1.1. *Betétanyagok mennyiségének mérése*

Három betétanyag mennyiségének méréséről kell szót ejteni:

- levegő;
- salakképző;
- gyepvasérc;
- faszén.

5.1.1.1. *Levegő*

A technológia szempontjából a befűjt levegő térfogatáramának van jelentősége. A fűjtatóból egy fűvás alatt kifűjt levegő térfogatának meghatározása céljából a fűjtató modelljét Solid Edge programban rajzoltam meg. A tüdő teljesen nyitott és teljesen zárt állapota közötti térfogatkülönbség a 13. árba kézzel jelölt forgástestének térfogatával határozható meg. A test térfogata jó közelítéssel 48liter.



13. ábra: Az egy fúvással kifújott levegő térfogatának meghatározásához használt modell

Elméletileg tehát legfeljebb 48liter levegőt fúj egy fúvásra a fújtató. A gyakorlatban a fújtatás közben viszont általában csak félig nyitott állapotba került a tüdő. Emellett a fújtató sem volt tökéletesen tömített, illetve a fújtató csőre és a fúvóka között is hézag maradt, így több helyen is levegővesztéssel kell számolni. Mindezeket figyelembe véve egy fúvásra kb. 10-20liter levegő jutott a kohó belsejébe (erősen becsült érték).

A próbakohászatok során a fújtatás intenzitása az egy perc alatt végzett fúvások számával jellemezhető. Ennek értéke 15-25 körül mozgott. Így a kohóba jutó levegő térfogatárama 150-500liter/perc körül lehetett. A fújtatás a teljes kohászat folyamatában általában kis intenzitású volt (kb. 150-200liter/perc), a kohászat végén, a medencébe süllyedt elegyoszlop mellett pedig nagyon intenzív volt (kb. 400-500liter/perc).

A kezdeti rekonstrukciós kísérleteknél jóval nagyobb, kb. 1000-1500liter/perc-es levegő-térfogatárammal dolgoztam. Ennek eredményeképpen gyakran keletkeztek a kohászat során erősen felszenült vasrögök. Metallográfiai csiszolatukon perlit, lédeburit és grafit lemezek voltak láthatók, szövetszerkezetük a lemezgrafitos öntvényekhez volt hasonló.

5.1.1.2. Salakképzők

A rekonstrukciós kísérletek bemutatásánál szó volt arról, hogy a petesmalmi gypvasérc kohósításakor salakképző keveréket is szükséges a kohóba adagolni. A salakképzésről a salakképző keverék összetételének beállításáról csak a bucakohó metallurgiájának megismerése után lehet részletesen szó. A 21. próbakohászat során 1,2kg salakképző keverék került a kohóba.

5.1.1.3. Gypvasérc

A kohósított gypvasérc mennyiségének mérése a vaskihozatal meghatározása céljából fontos. A vaskihozatal kiszámítása úgy lehetséges, ha ismerjük az összes kohósított érc, illetve az összes nyert fémes vas tömegét. A vaskihozatalt kétféleképpen szokás

számítani: az érc tömegére vonatkoztatva és az érc vastartalmának tömegére vonatkoztatva.

A próbakohászatok folyamatában általában kb. 0,7kg pörkölt ércet majd ehhez kb. 0,7kg faszenet adagoltam 10-15 percenként a kohó torkába. A 21. próbakohászat során hozzávetőlegesen összesen mintegy 7,5kg érc kohósítása történt.

A 21. próbakohászat végén kapott vasbucá átkovácsolás utáni tömege 1,4kg volt. A vasbucán kívül minden próbakohászat végén található a kohó medencéjében többkevesebb salakos vasrög, amelyek nem hegedtek hozzá a vasbucához. Ezek tömege további kb. 0,1kg volt, így az összes kapott vas tömege:

$$G_v = 1,4 + 0,1 = 1,5 \text{ kg}.$$

Az ércre számított vaskihozatal így:

$$g_v = \frac{1,5}{7,5} = 0,2.$$

Az érc vastartalmára számított vaskihozatal kiszámításához ismerni kell az érc kémiai összetételét. A petesmalmi gyepvasérc kb. 55% elemi vastartalmú (ld. anyagvizsgálatok később). Így:

$$g_v' = \frac{1,5}{7,5 * 0,55} = 0,36.$$

Az érc vastartalmának tehát csak harmadát sikerült kinyerni. A vastartalom kétharmada, mintegy 2,6kg vas a salakba került.

5.1.1.4. Faszén

A kohászat alatt felhasznált faszén mennyiségének mérése az egy kg-nyi nyers ércre jutó faszénfogyasztás meghatározása céljából fontos. A fajlagos faszénfogyasztást a kohósított gyepvasérc és az elhasznált faszén tömegének ismeretében lehet meghatározni. Általában nagy mennyiségű faszén fogy el a kohó előfűtése során. A 21. próbakohászat esetében az előfűtésre 14kg faszén fogyott.

A fajlagos faszénfogyasztás kiszámításához az első ércréteg terítésétől kezdve a kohászat végéig elhasznált faszén mennyiségét célszerű figyelembe venni. A 21. próbakohászat során összesen 7,5kg keverékre 7,8kg faszén jutott, így a fajlagos faszénfogyasztás:

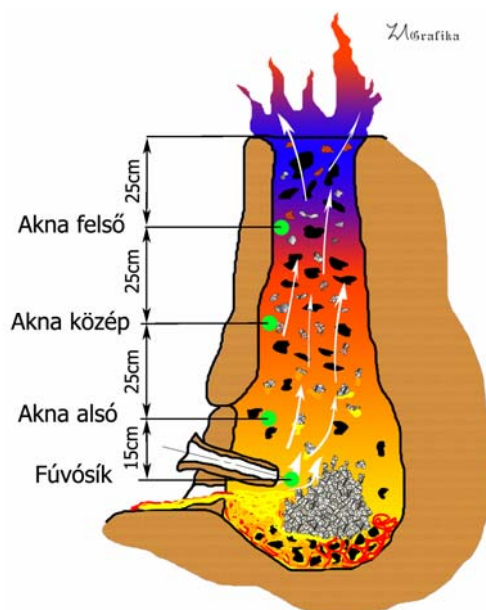
$$f = \frac{7,8}{7,5} = 1,04.$$

Ha az előfűtéshez elhasznált faszén mennyiségét is figyelembe vesszük, akkor a fajlagos faszénfogyasztás:

$$f = \frac{7,8+14}{7,5} = 2,91.$$

5.1.2. Hőmérsékletmérések

Néhány kísérlet során a bucakohó különböző pontjain hőmérsékletmérés történt. A 21. próbakohászat esetén a kohó négy pontján került sor hőmérsékletmérésekre. A hőmérsékletmérési pontok elhelyezkedését a 14. ábra mutatja.



14. ábra: Hőmérsékletmérési pontok a bucakohóban

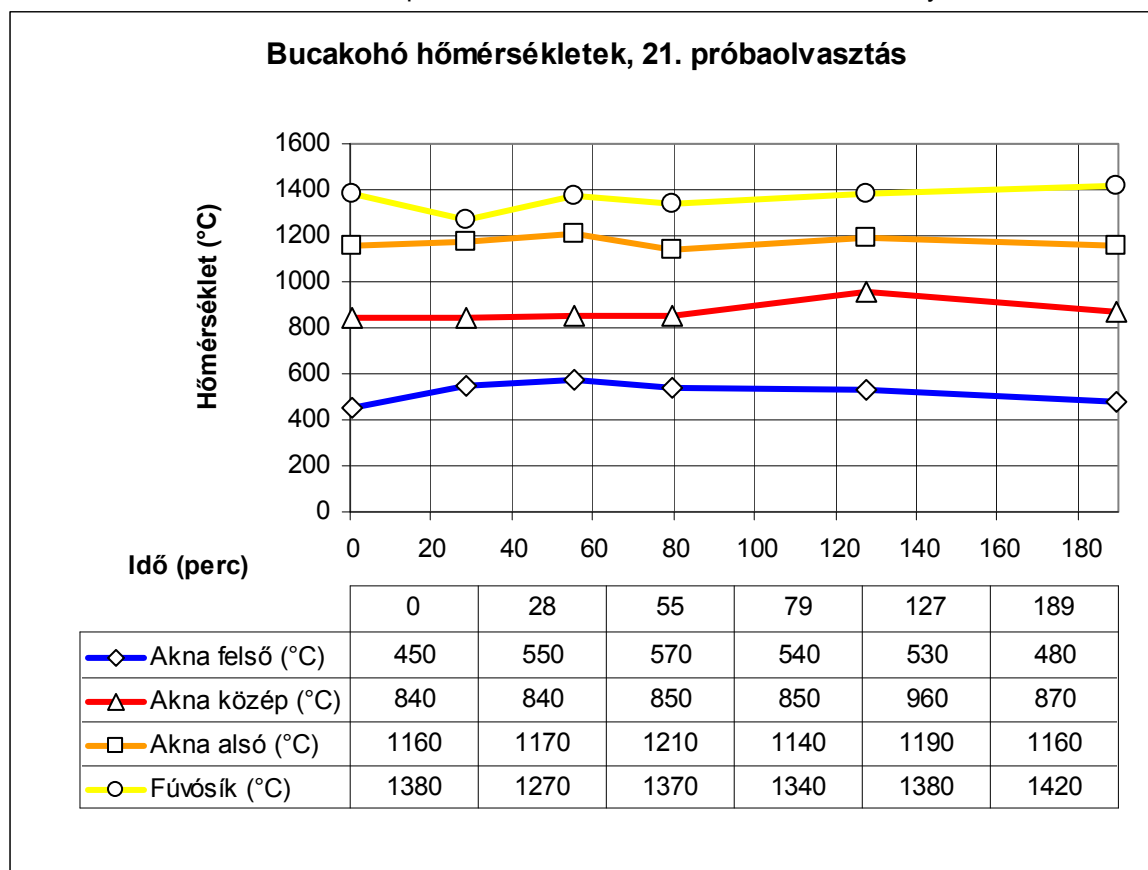
A hőmérsékletmérésekre két műszer szolgált. A kisebb hőmérsékleteket (1300°C alatt) hőelemmel mértem. A mérés elve a termofeszültségen alapszik. Két eltérő összetételű fémhuzal végét összehegesztjük. Ha a hegesztési pont hőmérséklete megnő, és a két huzal végének hőmérséklete szobahőmérsékleten marad, akkor a huzalok végein termofeszültség mérhető. A mért feszültségértékből a hegesztési pont hőmérséklete visszaszámolható. A használt hőelem termopárja Pt és PtRh-ötvözet volt. A bucakohó homlokfalába fűrt kb. 15 mm átmérőjű lyukakon keresztül volt lehetőség a termopár elhelyezésére.

A nagyobb (1300°C feletti) hőmérsékleteket össz sugárzásmérő pirométerrel mértem. A műszer a sugárzóról érkező látható és infravörös tartományba eső sugarakat lencsével összegyűjti, és a fókuszponban elhelyezett hőelemre juttatja. A mérés pontosságát nagyban befolyásolja a sugárzó test emissziós tényezője, amit a mérés előtt be kell állítani. Az össz sugárzásmérővel a fúvóka nyílásán keresztül lehetett megmérni a fúvósík

hőmérsékletét. A mérés ideje alatt a fűtás szünetelt, a fűtató csőjét el kellett távolítani a fűvóka peremétől.

A 21. próbakohászat hőmérsékletmérési eredményeit foglalja össze a 6. táblázat a hozzájuk tartozó diagramokkal.

6. táblázat: A 21. próbakohászat hőmérsékletmérési eredményei



A hőmérsékletmérések eredményeiből megállapítható, hogy a bucakohóban lévő hőmérsékletek viszonylag állandóak, vagy enyhe emelkedést mutatnak az idő előrehaladtával. Ez az állandóság kedvez a bucakemence egyenletes működésének, mert ilyenkor a beadagolt betétanyagok, a kicsapolt salak és a növekvő vasbuca okozta változások egyensúlyban vannak: két ércréteg terítése között hozzávetőlegesen ugyanannyi idő telik el, és ugyanez igaz a salakcsapolásokra is. Megfigyelhető, hogy a medence hőmérséklete elegendően nagy (kb. 1300°C) ahhoz, hogy benne a salak viszkozitása lecsökkenjen, így könnyen kicsapolhatóvá váljon.

5.1.3. Gázösszetétel-mérés

A 21. próbakohászat során a bucakohó atmoszférájának gázösszetétel-mérésére is sor került. A gázösszetétel-mérő műszer egy szondán keresztül mintát vett a kohó atmoszférájából. A mintavétel időtartama néhány perc volt, így átlagos gázösszetétel határozható meg. A mintavétel a kohó torkában történt, ugyanazon a ponton, ahol az akna felső pontjában hőmérsékletet is mértem. A gázösszetétel-mérések időpontja megegyezett a hőmérsékletmérésekével. Az eltárolt gázmintából két kis mennyiségű (10 és 25ml) gázadag összetételének meghatározása Dani master GC gázkromatográfval történt.

A gázkromatográfiás mérés két részből áll: a vizsgálandó gázelegy alkotóinak szélválasztása majd a mennyiségük meghatározása. A gázmintát egy vivőgázba (itt hélium volt) fecskendezik, majd az alkotók szétválasztása céljából adszorbens szemcséket tartalmazó töltetes oszlopon áramoltatják át. Az ismeretlen gázelegy összetevői más és más mértékben lassulnak le a töltetes oszlopon való átáramlás során, így egymást követve jutnak a mennyiségük meghatározására szolgáló detektorba. A Dani master GC gázkromatográf TCD detektorral rendelkezik, amely az adott gázalkotó mennyiségét hővezető-képessége alapján határozza meg, mégpedig úgy, hogy egy vezetősál ellenállását mérik. Az ellenállás a vezetősál hőmérsékletétől függ, ez pedig attól, hogy milyen hővezető-képességű közeg veszi körül.

A gázösszetétel-mérések eredményeit a 7. és a 8. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: A 21. próbakohászat gázösszetétel-mérési eredményei, 10ml gázadag esetén

idő (perc)	H ₂ (Vol%)	N ₂ (Vol%)	CO (Vol%)	CH ₄ (Vol%)	CO ₂ (Vol%)
0,00	9,10	61,75	24,83	1,21	4,17
28,00	2,69	66,84	24,76	0,34	4,89
55,00	0,00	71,31	25,44	0,35	4,67
79,00	8,32	62,59	26,75	0,49	9,38
127,00	5,38	65,19	22,68	0,50	8,05
311,00	1,07	82,81	12,83	0,00	8,19

8. táblázat: A 21. próbakohászat gázösszetétel-mérési eredményei, 25ml gázadag esetén

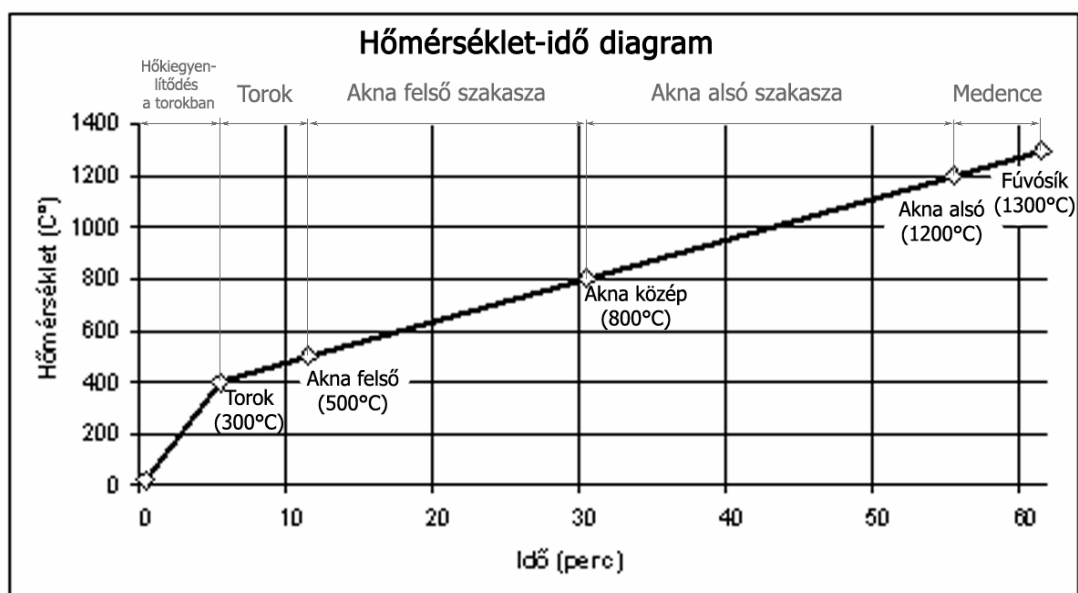
idő (perc)	H ₂ (Vol%)	N ₂ (Vol%)	CO (Vol%)	CH ₄ (Vol%)	CO ₂ (Vol%)
0,00	8,36	64,26	24,67	1,17	3,09
28,00	3,04	69,56	26,15	0,12	4,72
55,00	2,47	71,26	26,67	0,00	4,29
79,00	4,96	61,40	27,81	0,43	9,25
127,00	5,45	69,17	26,85	0,46	7,67
311,00	0,00	82,53	11,26	0,00	7,43

Az eredményekből látható, hogy a bucakohó atmoszférája redukzív. A CO térfogataránya nagy, de enyhén csökkenő tendenciát mutat. Az utolsó mintavétel már a fűvósíkba süllyedt elegyoszlop mellett történt, amikor erős fűjtás mellett már csak kevés faszén volt a bucakohó medencéjében, így az atmoszféra redukтивitása kisebb volt. Az atmoszférában kimért relatíve nagy H_2 térfogatarány származhat a faszén nedvességtartalmából, a gypevasérc, vagy a salakképzők hidrátvíztartalmából, esetleg a műhelygödör nedves oldalfalából a bucakemence belsejébe jutó vízgőzből.

5.1.4. Betétanyagok süllyedési sebességének mérése

Az elegyoszlop süllyedési sebességében nincs nagy eltérés a kohászat teljes folyamata során, a betétanyagokat közel azonos időközönként szükséges adagolni.

A betétanyagok süllyedési sebessége megmérhető az utolsó ércrerítés után. Ekkor ugyanis az elegyoszlop a fűvósíkban eléggé faszén helyére szabadon süllyed, a torkon át nem érkezik további utánpótlás. Az utolsó ércréteg szintje tehát egyre lejjebb süllyed a medence felé. A 21. próbakohászat alkalmával a kohóba adagolt utolsó ércréteg mintegy 60 perc alatt ért a fűvósíkba. A süllyedési sebesség és a hőmérsékletmérési eredmények alapján megszerkeszthető egy a kohó torkába beadagolt ércréteg hőmérsékletének időbeli változása (15. ábra).



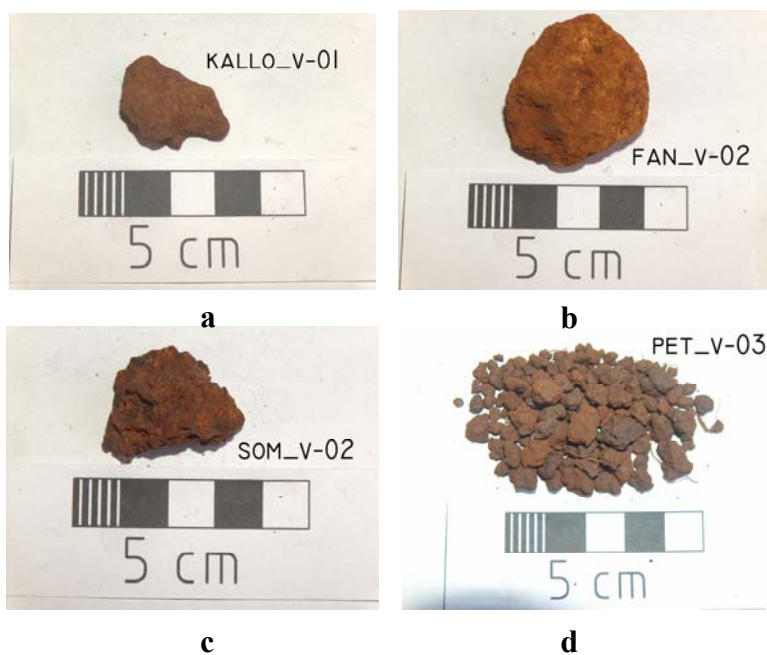
15. ábra: A bucakohóban süllyedő ércréteg hőmérséklet-idő diagramja

5.2. A rekonstrukciós kísérleteket követő anyagvizsgálatok

5.2.1. Gyepvasérc minták összetétel-vizsgálata

A betétanyagok fázisösszetételének meghatározása röntgendiffrakciós vizsgálatokkal történt. Ez a vizsgálati módszer a kristályos anyagok fázisainak arányát képes meghatározni. A röntgendiffrakció esetében a rácssíkokra beeső röntgensugarak visszaverődéskor egymással interferálnak. Ha teljesül, hogy a különböző síkokról visszavert röntgensugarak útkülönbsége pontosan a hullámhosszuk egész számú többszöröse, akkor a visszavert röntgensugarak erősítik egymást. Az útkülönbség változtatása érdekében a mintát forgatják, eközben mérik a visszavert sugárzás intenzitását. A minta forgatásával az egyes szöghelyzetekhez, azaz ugyanazon kristályrács különböző síkjaihoz tartozó intenzitáscsúcsok kiadódnak (diffraktogram). Mivel minden fázisnak más a ráczállandója és a kristályrácsa is eltérhet, a hozzájuk tartozó intenzitáscsúcsok szöghelyzete más és más lesz. Ez alapján az egyes fázisok beazonosíthatóak és egymástól megkülönböztethetőek, illetve a reflektálás intenzitásából az arányuk is meghatározható az adott mintában.

Négy gyepvasérclelőhelyről begyűjtött gyepvasércmintán történt röntgendiffrakciós vizsgálat. A következő ábrákon néhány, az adott lelőhelyre jellemző gyepvasércminta látható (16. ábra). Az összes elvégzett vizsgálat eredményeit foglalja össze a 9. táblázat.



16. ábra: A röntgendiffrakcióval vizsgált gyepvasércminták – a) Kék-Kálló völgyéből származó gyepvasércminta; b) fancsikai lelőhelyről származó gyepvasércminta; c) Somogyszobról származó gyepvasércminta; d) Petesmalomról származó gyepvasércminta

9. táblázat: Gyepvasércminták fázisösszetétel-vizsgálata röntgendiffrakcióval

Azonosító	Megjegyzés	Labor	Fázisösszetétel (tömeg%)									Össz
			Quar	Calc	Goet	Hemma	Musc	Illi	MntA	ChmA	Albi	
kallo_v-01	Kék-kálló-völgyéből származó barna színű gyepvasércminta	KKKI	30	-	60	-	-	-	-	-	-	90
fan_v-01	Fancsikáról származó kék színű gyepvasércminta	KKKI	40	-	30	-	-	-	10	-	20	100
fan_v-02	Fancsikáról származó barna színű gyepvasércminta	KKKI	6	-	75	-	-	5	10	-	4	100
som_v-01	Somogyszobról származó fehér színű gyepvasércminta	KKKI	10	70	10	-	-	5	-	5	-	100
som_v-02	Somogyszobról származó barna színű gyepvasércminta	KKKI	20	10	45	-	10	-	-	15	-	100
som_v-03	Somogyszobról származó barna színű gyepvasércminta pörkölés után	KKKI	28	8	-	40	7	-	-	20	-	100
pet_v-03	Petesmalomról származó barna színű gyepvasércminta	KKKI	3	-	90	-	-	-	-	-	-	93
pet_v-04	Petesmalomról származó barna színű gyepvasércminta pörkölés után	KKKI	5	-	-	90	-	-	-	-	-	95
				Számított kémiai összetétel (tömeg%)							ΣFe	Össz
				SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CO ₂	H ₂ O		
kallo_v-01				30,00	-	-	53,92	-	-	6,08	37,74	90,00
fan_v-01				59,73	0,35	0,37	26,96	6,36	-	3,97	18,87	97,74
fan_v-02				16,99	0,35	0,37	67,40	5,07	-	8,87	47,18	99,05
som_v-01				13,38	39,22	0,12	11,08	3,18	30,78	1,91	7,76	99,67
som_v-02				27,85	5,60	0,37	46,71	7,60	4,40	6,57	32,70	99,10
som_v-03				32,60	4,48	0,50	48,36	7,71	3,52	2,46	33,85	99,63
pet_v-03				3,00	-	-	80,88	-	-	9,12	56,62	93,00
pet_v-04				5,00	-	-	90,00	-	-	-	63,00	95,00

Megjegyzés: Quar – Kvarc (SiO₂); Calc – Kalcit (CaCO₃); Goet – Goethit (FeO(OH)); Hema – Hematit (Fe₂O₃); Musc – Muscovit (KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH,F)₂); Illi – Illit ((K,H₃O)Al₂Si₃AlO₁₀(OH)₂); MntA – Montmorillonit ((Ca,Mg)_{0,6}Al₂Si₄O₁₀(OH)₂H₂O); ChmA – Chamosit (Fe_{1,7}Mg_{0,2}Al_{0,8}(Si_{1,2}Al_{0,8})O₅(OH)₄); Albi – Albit (NaAlSi₃O₈)

A meghatározott fázisösszetételek ismeretében kiszámítható a minták kémiai összetétele. Ez látható a táblázat alsó felén.

A lelőhelyekről származó egy-egy gyepvasércmintán sor került vegyelemzés elvégzésére is. A vegyelemzések spektroszkópiai módszerrel történtek a Furol Analitika Kft. ózdi

laborjában és a Dunaferri Spektrometriai Főosztályán. A spektroszkópia alapja, hogy a vizsgált minta atomjainak elektronjait valamilyen módon gerjesztett állapotba viszik, amelyek az alapállapotba való visszatérésük során detektálható elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Mivel minden elem atomjainak más és más az elektronszerkezete, a kibocsátott sugárzás alapján meghatározható a mintában előforduló elemek aránya. A Furol Analitika Kft.-nél induktív csatolású plazma spektrometriával (ICP) dolgoztak, ami azt jelenti, hogy a gerjesztést plazma végzi el. A Dunaferriénél röntgenfluoreszcens spektrometriával (XRF) vizsgálták a mintákat, a gerjesztést röntgensugárzással végezték. A gyepvasércminták vegyelemzéseinek eredményét a 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat: Gyepvasércminták kémiai összetételvizsgálata vegyelemzéssel

Azonosító	Megjegyzés	Labor	Kémiai összetétel (tömeg%)							ΣFe	Össz
			SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅		
kallo_v-02	Kék-kálló-völgyéből származó barna színű gyepvasércminta	Ózd, Furol Analitika	6,5	6,2	0,49	42,46	4,26	0,98	n.a.	29,72	60,89
fan_v-03	Fancsikáról származó barna színű gyepvasércminta	Ózd, Furol Analitika	8	5,54	0,5	44,32	4,49	0,96	n.a.	31,02	63,81
fan_v-04	Fancsikáról származó barna színű gyepvasércminta	Dunaferri Spektrometriai Főosztály	26,2	3,07	0,68	57,9	2,35	3,28	4,8	40,53	98,28
som_v-04	Somogyszobról származó barna színű gyepvasércminta	Dunaferri Spektrometriai Főosztály	14	10	0,87	61,4	3,57	3,32	3,29	42,98	96,45
som_v-05	Somogyszobról származó barna színű gyepvasércminta	Ózd, Furol Analitika	7,3	17,3	0,87	39,03	8,18	0,72	n.a.	27,32	73,4
som_v-06	Somogyszobról származó barna színű gyepvasércminta pörkölés után	Ózd, Furol Analitika	8,5	15,76	0,88	50,89	5,99	0,87	n.a.	35,62	82,89
pet_v-01	Petesmalomról származó barna színű gyepvasércminta	Dunaferri Spektrometriai Főosztály	3,82	3,44	0,32	81	1,62	0,46	6,6	56,70	97,26
pet_v-02	Petesmalomról származó barna színű gyepvasércminta pörkölés után	Ózd, Furol Analitika	12	2,87	0,23	50,18	6,7	0,06	n.a.	35,12	72,04

A táblázatokból kitűnik, hogy egyazon lelőhelyről származó gyepvasércmintán több laborból, eltérő eredményeket kaptam. Ilyen például a somogyszobi lelőhely barna színű érce. Ha összehasonlítjuk a som_v-02, som_v-04, som_v-05 minták vizsgálatánál kapott eredményeket, látható, hogy az alkotók arányában viszonylag nagy eltérés mutatkozik.

Az eltérések tulajdoníthatók a különböző vizsgálati módszereknek, vagy az egyazon lelőhelyről származó minták eltérő összetételének.

A röntgendiffrakciós és vegyelemzéses vizsgálatok eredményei alapján megállapításokat tehetünk az ércek kohósíthatóságára a bucakohászati technológia sajátosságait is szem előtt tartva. A következő szempontokat kell figyelembe venni:

- vastartalom: nagy vastartalom (nagy vasoxidtartalom), mert így jó vaskihozatalra számíthatunk;
- meddő összetétele: lehetőleg savanyú legyen az érc meddője, ami azt jelenti, hogy túlnyomó részben kvarcot (SiO_2) tartalmazzon, így a meddőből savanyú salak keletkezik, amelynek viszkozitása kis hőmérsékleten kisebb lesz, mint a bázikus salaké. Ugyanakkor a kvarctartalom túl nagy se legyen, különben a kohászat során keletkező fayalitos ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) salak sok vasat visz el, így csökken a vaskihozatal.

Ezek után minőségük, bucakohászatra való alkalmasságuk szerint rangsorolhatók a négy gyepvasérclelőhely ércei.

Három lelőhely gyepvasércének van megfelelően nagy vastartalma: fancsikai, somogyszobi és petesmalmi (a kísérletek tapasztalatai alapján ezen lelőhelyek érceit felhasználva valóban elő lehet állítani vasbucát). A legnagyobb vastartalma a petesmalmi gyepvasércnek van. A Kék-Kálló völgyében található gyepvasérc vastartalma a legalacsonyabb, így ez kohósításra már nem alkalmas (a kísérletek tapasztalatai alapján a vaskihozatal rendkívül kicsi).

A somogyszobi gyepvasérc meddőjének összetétele kedvezőtlen. Minden vizsgálati eredmény alátámasztja azt a megállapítást, hogy ennek az érccnek túlzottan nagy a kalcittartalma (CaO-ra számítva 6-17 tömeg%). A meddő nagy kalcittartalma a belőle keletkező salak nagy CaO tartamát okozza. Ennek következtében a salak olvadáspontja nagy lesz, a salak nehezen csapolható ki bucakohóból. A somogyszobi lelőhely egyes részein olyan gyepvasérc is található, amelynek kalcittartalma jóval meghaladja a goethit tartalmát (ld. som_v-01). Ennek az érccnek a kohósítása előtt gondosan el kell választani a nagyobb vastartalmú, barna színű darabokat a fehér színű részeket tartalmazó nagy kalcittartalmú rögöktől. Ha így járunk el, akkor a somogyszobi lelőhely gyepvasércéből is lehet vasbucát előállítani, bár a sikeres kísérletek legtöbbje nem ezzel az érccel történt. A fancsikai lelőhelyen is egymástól nagyon eltérő összetételű ércek találhatók. Itt nem a nagy kalcit, hanem a nagy kvarctartalom jelenti a gondot. A nagy kvarctartalom mellett csökken a vaskihozatal, mert a salakba kerülő SiO_2 FeO-ot köt le, így sok vas a salakba

megy ahelyett, hogy a vasbuca tömegét növelné. A megfelelő vaskihozatal csak az ércrögök alapos válogatásával biztosítható. A fancsikai lelőhely érceinek kohósítása esetén jelentkezett még egy gond: a kapott vas jelentős foszfortartalma miatt nem lehetett a vasbucát kovácsolni. A jelentős mennyiségű foszfor bizonyára a gyeppvasércből származott. A gyakorlati tapasztalatok szerint a nagy foszfortartalmú vasbucát adó gyeppvasérc színe kékes, illetve töretük is kékes árnyalatú. Ezek a fizikai jellemzők a fancsikai gyeppvasérc esetén jól felismerhetők voltak.

A petesmalmi gyeppvasérc kohósításakor a kis meddőtartalom miatt salakképző beadagolására van szükség. Ha a salakképző összetételét jól állítjuk be, akkor elérhető, hogy az érc meddőjéből és a salakképzőből összeolvadó salak olvadáspontja kicsi legyen. A petesmalmi érc foszfortartalma a fancsikai érchez hasonlóan szintén nagy. Ebből következően, bár a keletkező vasbuca jól kovácsolható volt, hidegen nem lehetett nagymértékben alakítani, rideg és törékeny lett. Ennek ellenére az összetétel-vizsgálatok eredményiből levonható az a következtetés, hogy a legjobb minőségű, kohósításra leginkább alkalmas gyeppvasérc a petesmalmi lelőhelyen gyűjthető be. Az elvégzett kísérletek eredményei is ezt támasztják alá.

A gyeppvasérc foszfortartalmára magyarázat lehet, hogy a szerves anyagok bomlásakor (főleg mocsári üledékekben) keletkező foszfor a nagy oldott vastartalmú vízbe kerül. A vas így a foszfor jelenlétében, gyakran kékföld, vivianit ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) alakjában válik ki (FÜLEKY 2009). A petesmalmi, de főleg a fancsikai ércdarabokban kékes színű területek voltak megfigyelhetők. Tóércék esetén a gyeppvasérc foszfortartalma származhat a tófenék iszapjából is. Lehetséges, hogy az iszapban feldúsuló halcsontok apatit ($\text{Ca}_5(\text{F}(\text{PO}_4)_3)$) tartalmából, illetve a tópartokon található nád korhadásakor kerülhet az iszapba foszfor. A felszíni vizekbe a műtrágyázás hatására is foszfor kerülhet, amely a már kialakult gyeppvasércrögöket szennyezheti. Vajon a gyeppvasércben megjelenő foszfor az őskohászok számára is problémát okozhatott?

Hasonlítsuk össze a kísérletekhez felhasznált gyeppvasérc kémiai összetételét (9. és 10 táblázat) a kora középkori vasipar által kohósított ércékével. Referenciaként az 1. táblázat kora középkori gyeppvasérc kémiai összetételére vonatkozó adatait használhatjuk fel. Megállapítható, hogy a saját gyeppvasércminták vastartalma a petesmalmi gyeppvasérc kivételével általában alacsonyabb, mint a korabeli gyeppvasércké. Az utolsó három korabeli minta imolai és felsőcselényi kohótelepek közeléből került elő. Ezek vegyi összetétele áll legközelebb a petesmalmi érc összetételéhez. A saját gyeppvasércminták meddőjének összetétele hasonló a korabeli ércékéhez, de kérdés, hogy a korabeli minták

esetén mekkora lehet a foszfortartalom? Erre vonatkozóan általában nincs irodalmi adat. Néhány vegyelemzési eredmény alapján azonban kis foszfortartalomra lehet következtetni. Ezek szerint a korabeli és a saját gyepvasércminták meddőjének összetételében a foszfortartalom jelentheti a legnagyobb különbséget, azonban a kérdés további alaposabb körüljárása lenne szükséges.

Ha pörköljük a gyepvasércet, akkor a hidrátvíztartalma jelentősen csökken, ez látható pl. a som_v-02 és som_v-03, vagy a pet_v-03 és pet_v-04 minták összehasonlításakor (ld. 9. táblázat). A pörkölés végén gyakran tapasztalható, hogy sok vörös vasércdarabot „fog a mágnes”. Ennek oka feltételezhetően vagy a magnetit fázis, vagy pedig a színvas megjelenése. A kérdés megválaszolása céljából néhány ilyen gyepvasércmintán metallográfiai vizsgálatot végeztem. A fázisok beazonosítását pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) mérés során energiaszóródásos röntgen-spektroszkópiával (EDAX) végeztem el. A mérés elve, hogy az előkészített minta felületét nagy energiájú elektronokkal bombázzák. A mikroszkópiás képalkotás a visszavert elektronok segítségével, a vegyelemzés pedig spektroszkópiával történik. A spektroszkópiás vizsgálatban az egyes elemeket a karakterisztikus röntgensugár alapján azonosítják be, amely az atom gerjesztett állapotból az alapállapotba visszatérő elektronjainak energiakisugárzása. A minta atomjainak elektronjait az elektronsugárral gerjesztik. Egy pörkölt gyepvasércminta metallográfiai csiszolatát és az elvégzett EDAX mérés eredményeit a 17. ábra foglalja össze.



17. ábra: Pörkölt gyepvasércminta metallográfiai csiszolatának fénymikroszkópos képe (500x) és fázisok összetétele az EDAX mérések alapján

A pörkölt gypvasércdarabok csiszolatán két fázis (vörös és szürke) különíthető el. Az elvégzett EDAX mérések alapján megállapítható, hogy a vas és az oxigén aránya szerint a metallográfiai csiszolaton megfigyelhető vörös színű fázis hematit, a szürke színű fázis pedig magnetit. A csiszolat alapján tehát feltételezem, hogy pörkölés során néhány gypvasérc részleges előredukción megy keresztül, magnetit fázis jelenik meg benne.

A magnetit köbös kristályrácsa úgy épül fel, hogy rácspontok kétharmadát Fe^{3+} ionok, egyharmadát pedig Fe^{2+} ionok foglalják el ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$), ezért a pörkölt gypvasércmintában a magnetit kimutatása vegyelemzéssel is lehetséges. Ebből a célból a pet-v_02, Petesmalomról származó pörkölt gypvasércmintában utólag az ózdi Furol Analitika kft.-nél meghatározták a Fe^{2+} és Fe^{3+} mennyiségét. A nevezett minta vasoxidjának részletesebb összetétele így: $\text{Fe}^{2+}=11,00\%$ és $\text{Fe}^{3+}=24,10\%$ (v.ö. 10. táblázat utolsó sora). Megállapítható, hogy a mintában nagy mennyiségben jelent meg 2+ oxidációs számú vas, tehát a minta sok magnetitet tartalmaz, azaz részben előredukálódott a pörkölés végére.

5.2.2. Salakképzőminták fázisösszetétel-vizsgálata

Kis mennyiségű salakra mindig szükség van ahhoz, hogy a vasbuca a kohó medencéjében összeállhasson. Mivel a petesmalmi érc kis meddőtartalma nem teszi lehetővé elegendő salak keletkezését, kohósításakor kis mennyiségű salakképzőre van szükség. A kísérletek során használt salakképző homok és fahamu 3:5 arányú keveréke. Egy összekevert salakképzőmintán, egy tiszta, fenyőből származó fahamumintán és egy a salakképző keverékhez használt homokmintán röntgendiffrakciós vizsgálatot végeztem. A salakképzőhöz kevert tiszta, kőrisfából származó fahamuból nem állt rendelkezésemre minta. A minták láthatók a 18. ábrán. Az eredményeket a 11. táblázat foglalja össze.



18. ábra: A salakképzésre használt anyagok – a) homokminta; b) fahamuminta (fenyő); c.) salakképző keverék minta

11. táblázat: Salakképzőminták fázisösszetétel-vizsgálata röntgendiffrakcióval,

Azonosító	Megjegyzés	Labor	Fázisösszetétel (tömeg%)									Össz
			Quar	Calc	Ruti	Port	Musc	Dolo	Kaol	Thur	Albi	
hom-01	Homok	KKKI	55	4	1		10	1	5	5	15	96
fah-01	Fahamu (fenyő)	KKKI	20	55	-	10	-	5	-	-	-	90
sk-01	Homok és fahamu (kőris) keveréke	KKKI	35	30	1	-	10	1	-	3	8	88
Számított kémiai összetétel (tömeg%)												
	F	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CO ₂	H ₂ O	TiO ₂	Össz
hom-01	0,24	1,77	1,18	73,50	2,55	0,34	1,28	9,86	2,24	6,08	1,00	100,04
fah-01	-	-	-	20,00	39,91	1,09	-	-	26,57	2,43	-	90
sk-01	0,24	0,95	1,18	45,82	17,11	0,29	1,28	6,07	13,67	0,66	1	88,27

Megjegyzés: Quar – Kvarc (SiO₂); Calc – Kalcit (CaCO₃); Ruti – Rutil (TiO₂); Port – Portlandite (Ca(OH)₂); Musc – Muscovit (KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH,F)₂); Dolo – Dolomit (CaMg(CO₃)₂); Kaol – Kaolinit (Al₂[Si₂O₅(OH)₄]); Thur – Chamosit (Thuringit) ((Fe,Mg,Al)₆(Si,₂); Albi – Albit (NaAlSi₃O₈).

Az eredményekből megállapítható, hogy a salakképző keverékhez használt homok meglepően nagy mennyiségben tartalmaz talajásványokat, csak mindössze fele részben kvarc (55%). Inkább hasonlít ez a minta egy löszös talajhoz, vagy agyagban szegény talajhoz. Egy tipikus homokminta összetételében a kvarc aránya 80-90% lenne. Továbbá a vizsgált homokmintában nagy muscovit és albit tartalmánál fogva jelentős az Al₂O₃ aránya. A salakképzés szempontjából ennek valószínűleg kedvező, olvadáspont csökkentő hatása van.

A fahamu legnagyobb részben kalcitot tartalmaz, kis mennyiségben pedig kvarcot. Emellett az amorf fázistartalma nagy, 10-20%. Ennek az amorf hányadnak az összetétele nem ismert, elképzelhető, hogy a fahamu esetén várt alkálifém-tartalom ebben lenne megtalálható.

A salakképző keverék maga is relatíve nagy talajásvány-tartalmú, fő tömegében azonban kvarc és kalcit, de a salakképző keverék kalcittartalma, ebből eredően CaO tartalma kissé magas.

5.2.3. Salakminták vizsgálata

A bucasalakok morfológiai szempontból két nagy csoportba sorolhatók: kemencesalakok és folyósalakok (ld. 2.2.2.3. szakasz). Az elvégzett vizsgálatok mindegyike folyósalakokra vonatkozik.

A salakminták összetétel-vizsgálata vegyelemzéssel és röntgendiffrakciós vizsgálattal is megtörtént. Mivel a röntgendiffrakciós vizsgálati módszer csak kristályos anyagok

fázisösszetételének meghatározására alkalmas, a nagy mennyiségű amorf fázist tartalmazó salakminták esetén csak az amorf rész aránya mutatható ki, a kémiai összetétele nem. Az amorf fázis vegyi összetétele közelíthető ismert salakminták amorf fázisának vegyi összetételével, ha a két fázis a diffraktogrammon hasonló képet mutat. Ez a módszer azonban nagyon bizonytalan, ezért az így kapott eredményekből nem vonhatók le megalapozott következtetések. A röntgendiffrakciós salakvizsgálatok eredményeit a 12. táblázat foglalja össze.

12. táblázat: Salakminták fázisösszetétel-vizsgálata röntgendiffrakcióval

Azonosító	Megjegyzés	Labor	Fázis összetétel (tömeg%)					Össz
			Fayl	Quar	Cris	Glass	Magn	
kallo_s-01	Kék-kálló-völgyéből származó gypvasérc folyósalakja (szürke színű)	KKKI	35	3	3	55	-	100
fan_s-01	Fancsikáról származó gypvasérc folyósalakja (zöld színű)	KKKI	10	-	-	90	-	100
fan_s-02	Fancsikáról származó gypvasérc folyósalakja (fekete színű)	KKKI	20	5	1	74	-	100
som_s-01	Somogyszobról származó gypvasérc folyósalakja (fekete színű)	KKKI	-	20	3	75	2	100
pet_s-02	Petesimalomról származó gypvasérc folyósalakja (zöld színű)	KKKI	50	10	-	30	-	90
pet_s-03	Petesimalomról származó gypvasérc folyósalakja (fekete színű)	KKKI	-	15	-	85	-	100

Megjegyzés: Fayl – Fayalit (Fe_2SiO_4); Quar – Kvarc (SiO_2); Cris – Cristoballit (SiO_2); Glass – Üveg; Magn – Magnetit (Fe_3O_4).

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a salakminták több-kevesebb kristályos fayalit fázist tartalmaznak, de fő tömegükben többnyire nagy amorf fázis tartalmúak, ezért vegyi összetételük nem számítható ki nagy biztonsággal.

A salakminták vegyelemzéssel történő vizsgálata alkalmasabb módszer a vegyi összetétel meghatározásához. Az ózdi Furol Analitika kft-nél végzett ICP spektroszkópia eredményei láthatóak a 13. táblázatban.

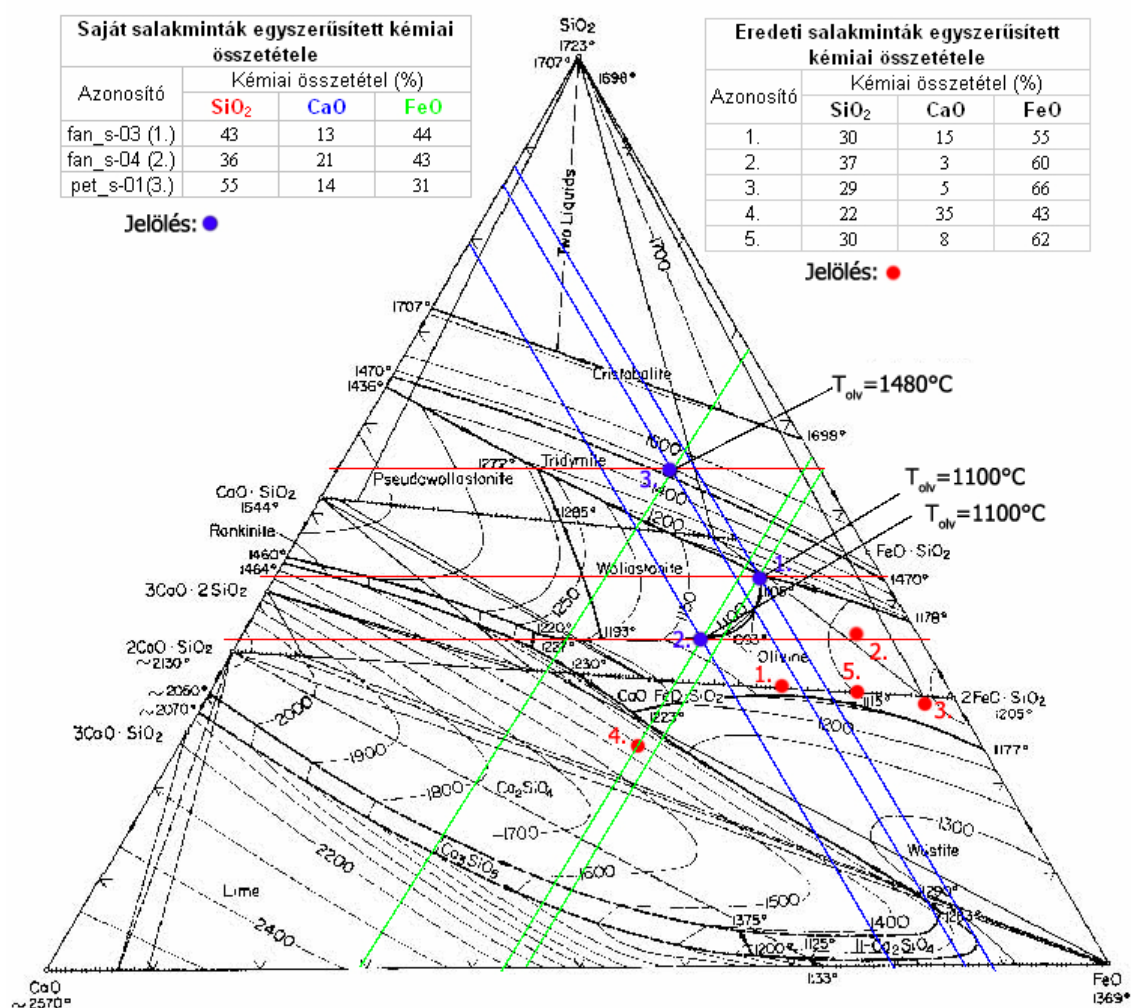
13. táblázat: Salakminták kémiai-összetételvizsgálata vegyelemzéssel

Azonosító	Megjegyzés	Labor	Kémiai összetétel (tömeg%)						Össz
			SiO_2	CaO	MgO	FeO	MnO	Al_2O_3	
fan_s-03	Fancsikáról származó gypvasérc folyósalakja (zöld színű)	Ózd, Furol analitika	32	10,05	1,07	32,81	2,32	2,86	81,11
fan_s-04	Fancsikáról származó gypvasérc folyósalakja (fekete színű)	Ózd, Furol analitika	22	12,76	1,33	26,64	3,26	2,56	65,99
pet_s-01	Petesimalomról származó gypvasérc folyósalakja (zöld színű)	Ózd, Furol analitika	45,4	11,68	1,38	24,93	3,36	2,56	86,75

Az ICP spektrometriás mérés esetén a szilárd minta egy részét oldatba viszük (feltárás). Ha a minta nem teljesen oldódik fel, akkor pontos következtetések levonására nem alkalmasak a kapott vegyelemzési eredmények. A táblázatból megállapítható, hogy a salakminták vegyelemzés előtti feltárása nem volt teljes. Néhány alapvető megállapítás azonban tehető. A FeO tartalom fordítottan arányos a SiO_2 tartalommal. A salakminták relatív nagy CaO tartalma nem származhat csupán a gypvasércek meddőjéből. A salakképző keverék (amelyet a fancsikai és a petesalmi érc kohósításakor is használtam) kalcittartalma jelentősen növelhette a salakok CaO-tartalmát. Ennek ellenére mindegyik minta savanyú jellegű.

A salakok fázis- és kémiai összetétele és a salakok színe kapcsolatban lehet egymással: a sötétebb színű salakok nagy fayalit, így nagy FeO tartalmúak.

A salakminták olvadáspontja a technológia szempontjából nagyon lényeges fizikai tulajdonság. Az olvadáspontok meghatározhatóak a terner diagramok segítségével. Mivel a vizsgált salakmintákban a SiO_2 -, CaO- és FeO-tartalom mellett a többi alkotó mennyisége elhanyagolható, a SiO_2 -CaO-FeO háromalkotós diagramot használhatjuk. A 19. ábra a salakminták diagrambeli helyzetét és ebből becsült olvadáspontjaikat tünteti fel. A mintáknak csak SiO_2 , CaO és FeO alkotóit meghagyva, az így kapott összetételeket pedig 100%-ra kiegészítve ábrázoltam a pontokat a terner diagramban.



19. ábra: Saját és eredeti salakok helyzete a SiO₂-CaO-FeO terner diagramban egyszerűsített kémiai összetételük alapján

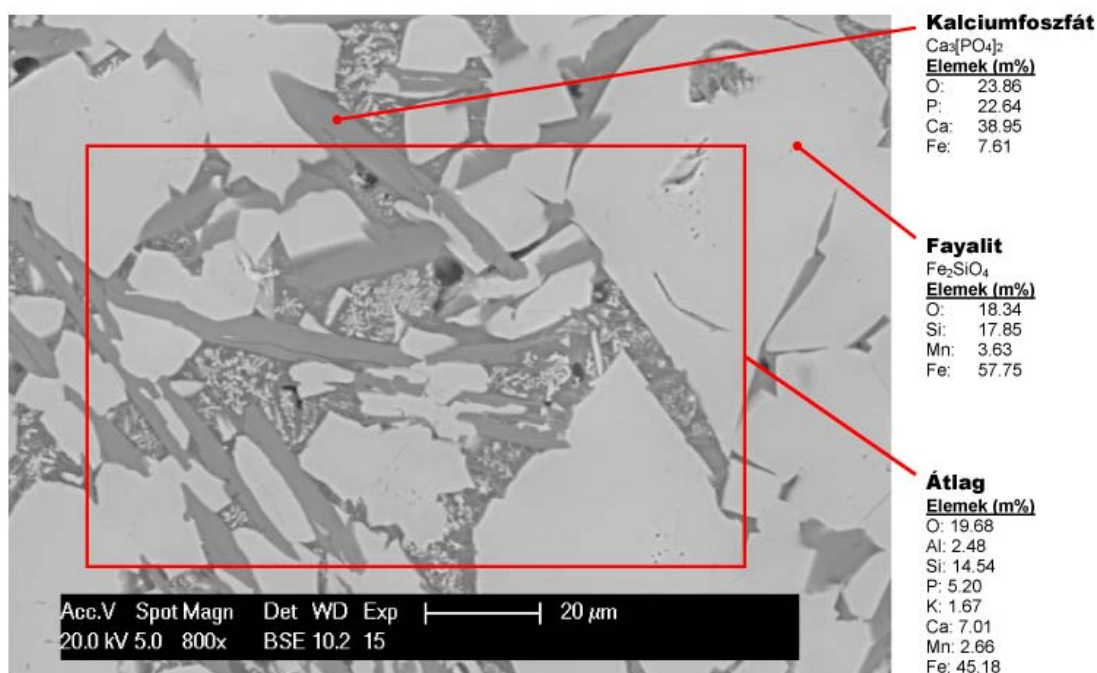
A salakminták diagram alapján becsülhető olvadáspontjai nagyok. A pet_s-01 minta kiugróan nagy olvadáspontú. Ezek az értékek nincsenek összhangban a kísérletek során tapasztaltakkal, a salakok általában narancssárga-sárga izzás mellett kb. méz viszkozitással folytak ki a salakcsapoló nyíláson. Az elméleti olvadáspontok és a gyakorlati tapasztalatok ellentmondásának oka egyrészt az, hogy a terner diagramok kristályos fázisok olvadáspontját mutatják meg. A salak nagy üvegképző hajlama azonban jelentős túlhűthetőséget eredményez. A bucasalakok kisebb-nagyobb részben viszont amorf fázisúak, amely éles olvadásponttal nem rendelkezik, lehűlés közben fokozatosan növekszik a viszkozitása. Ezért lehetséges a gyakorlatban már a narancssárgán izzó (900-1000°C-os) salakot is kicsapolni a bucakohóból. Másrészt a bucasalakok rendszerint nagyon inhomogének, ezért lehetnek olyan összetételű pontok, ahol a megolvadás jóval hamarabb következik be, sőt a salakok egyes fázisainak

olvadáspontja is eltérő. Harmadrészt a vegyelemzések pontatlanságai adhatják az eltérések okát.

A bucasalakok elméleti és gyakorlatban tapasztalt olvadáspontjainak összhangba hozása céljából még számos salakmintán kellene vegyelemzést végezni. Emellett ki kellene dolgozni valamilyen módszert arra, hogy hogyan lehet laboratóriumi körülmények között a salakok lágyulási hőmérsékletét meghatározni.

A saját salakminták vegyi összetétele, a gyevasérccekhez hasonlóan, összevethető kora középkori salakok vegyi összetételével is. Referenciaként a 3. táblázat kora középkori salakok kémiai összetételére vonatkozó adatait használhatjuk fel. Megállapíthatjuk, hogy a kora középkori salakminták FeO-tartalma általában nagyobb, SiO₂-tartalma pedig kisebb a saját salakmintákénál. Emellett a korabeli salakok között is előfordulnak nagy CaO-tartalmú minták. A saját salakmintákban háromértékű vas csak egy esetben volt kimutatható (ld. som_s-01 mintában megjelenő magnetit fázis). Ezzel szemben a korabeli salakminták mindig tartalmaznak több-kevesebb háromértékű vasat (ennek magyarázatáról már volt szó, ld. 2.2.2.3. szakasz). Az eredeti salakminták egyszerűsített kémiai összetételük szerinti helyzete látható a 19. ábra kék pontokkal jelölt helyein.

Egy, a somogyszobi gyevasérc kohósításakor keletkezett jellegzetes folyósalakminta metallográfiai csiszolatának elektronmikroszkópos képét és a salakminta fázisainak beazonosítása céljából elvégzett EDAX mérések eredményeit a 20. ábra foglalja össze.

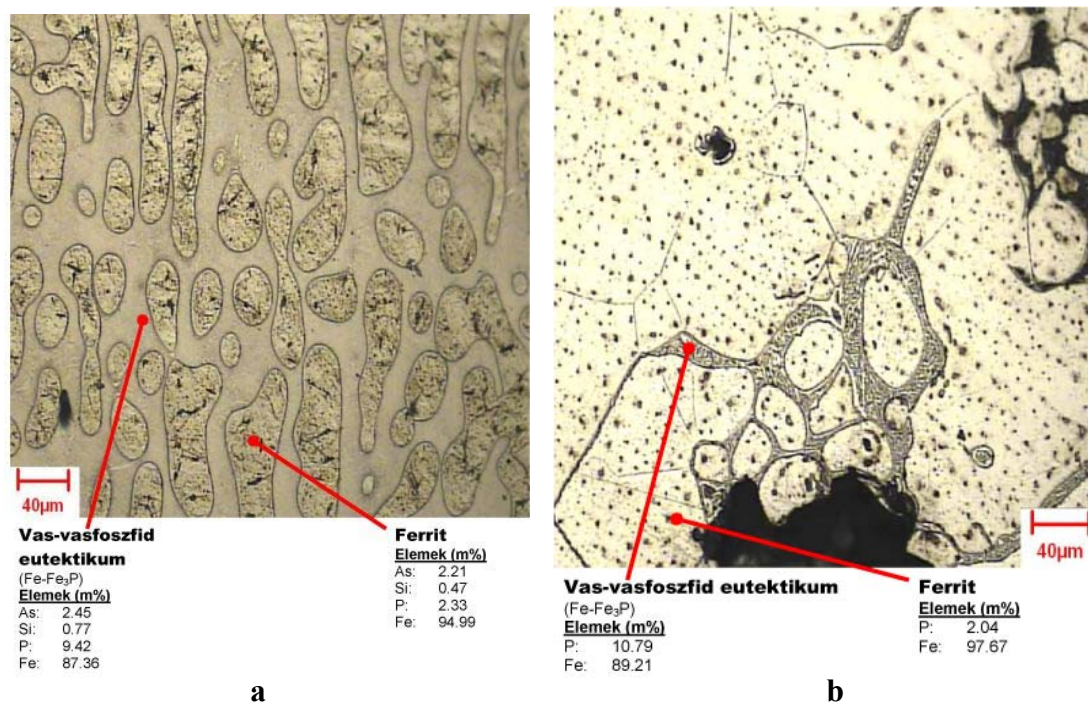


20. ábra: Folyósalakminta metallográfiai csiszolatának elektronmikroszkópos képe (800x) és a fázisok összetétele az EDAX mérések alapján

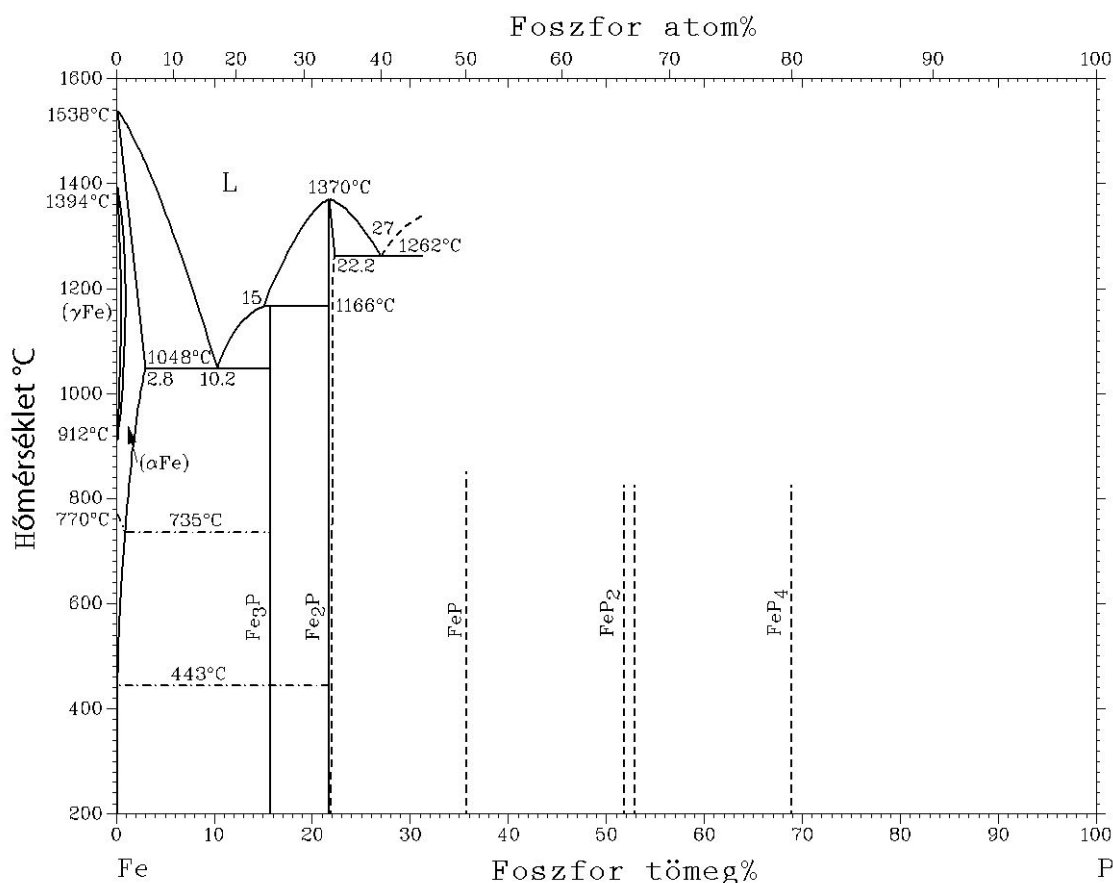
A vizsgált salakminta mikroszerkezetére jellemző, hogy a táblás fayalitos (világosszürke) mezők közzé szintén táblás, az EDAX mérések alapján feltételezhetően kalciumfoszfát (sötétszürke) lapok ékelődnek (a kalciumfoszfát fázis talán a gyepvasérc apatit-tartalmából keletkezett). Ez a két fázis teszi ki a minta legnagyobb részét. A táblákat a vasnál alacsonyabb rendszámú elemek (Al, Si, Mg, Ca, K) oxidjaiból képződött amorf fázis (fekete színű mátrix) veszi körül, amelyben apró dentrites fázisok (fehér színű) figyelhetők meg. Wüstit fázist a minta nem tartalmaz.

5.2.4. Vasbucák, vastárgyak vizsgálata

A kezdeti kísérletek során a fancsikai gyepvasérből előállított vasbucák kovácsolás közben széttörték (ld. 4.2.4. szakasz). A későbbi sikeres próbakohászatok során a petesalmi ércből előállított vasbucákat már jól lehetett kovácsolni, azonban szobahőmérsékleten nagyon ridegek voltak. Néhány fancsikai gyepvasérc és néhány petesalmi gyepvasérc kohósításából származó vasbuca metallográfiai csiszolatán fénymikroszkóp alatt látható fázisainak beazonosítása céljából EDAX méréseket végeztem (21. ábra). Így fény derült a melegtörékenységre és a ridegség okára.



21. ábra: Vasbuca metallográfiai csiszolatának fénymikroszkópos képe (500x) és a fázisok összetétele az EDAX mérések alapján – a) fancsikai gyepvasérből készült vasbuca; b) petesalmi gyepvasérből készült vasbuca.



22. ábra: Fe-P kétalkotós egyensúlyi állapotábrára

A fancsikai gyepvasérből készült vasbuca szövetszerkezetére jellemző a nagy mennyiségben jelen lévő eutektikum fázis. Az EDAX mérések eredménye szerint az eutektikum kb. 10tömeg% foszfort tartalmazó vas-vasfoszfid eutektikum. A 22. ábrán látható Fe-P kétalkotós egyensúlyi állapotábráról (ASM International) leolvasható, hogy az eutektikus összetétel 10,2tömeg%-nál van. Ebben az eutektikum mátrixban ferrit szemcsék láthatók, amelyek oldott foszfortartalma szintén jelentős. Az eutektikum olvadáspontja 1048°C, így a bucakohó medencéjének nagy hőmérsékletén olvadt állapotban van jelen. Az ilyen, nagy foszfortartalmú vasbucák szerkezetére jellemző, hogy vasgolyókból épülnek fel, mert a felületi feszültség a részben megolvadt vasrögöket gömb alak felvételére készíti (a fancsikai gyepvasérc kohósítása során gyakran voltak megtalálhatók a salakba ágyazódott néhány mm-es vasgolyók (THIELE 2009/1)). A vasbucák melegtörékenysége oka az eutektikum kis olvadáspontja, amely a kovácsolás 1100-1300°C-os hőmérsékletén megolvad. A fancsikai gyepvasérből készült vasbuca kémiai összetételére jellemző továbbá a meglepően nagy arzéntartalom.

A petesmalmi gyepvasérből készült vasbuca metallográfiai csiszolatán többnyire nem vagy csak nyomokban lehet vas-vasfoszfid eutektikumot megfigyelni, a szövetszerkezet

túlnyomórészt ferrites. Azonban a ferrit oldott foszfortartalma még mindig jelentős. Az ilyen nagy mennyiségben jelenlévő foszfor az acél mechanikai tulajdonságaira kedvezőtlen hatású: bár növeli a szilárdságot és a korrózióval szembeni ellenállást, az acél ridegségét eredményezi. Ez a magyarázata a petesalmi gyepvasérből készült vasbuca és a belőle kikovácsolt vastárgyak szobahőmérsékleten tapasztalt ridegségnek.

A nagy mennyiségű foszfor a gyepvasérből származik. A fancsikai gyepvasérc foszfortartalma a petesalmi érchez hasonlóan nagy (ld. 10. táblázat). Ez azonban önmagában nem ad magyarázatot arra, miért jelenik meg a fancsikai érből készült vasbucaminta metallográfiai csiszolatán jóval több eutektikum, mint a petesalmi gyepvasérből készült vasbucaminta esetén. A fancsikai érből készült vasbucaminta egy olyan kezdeti próbakohászatból származik, amikor a befűjt levegő térfogatárama nagyon nagy volt (1000-1500liter/perc). Az így kialakuló nagyobb hőmérséklet kedvezhetett a vasbuca foszfortartalma növekedésének.

A petesalmi tóérből készült vasbucákat megmunkálva vastárgyakat lehetett kikovácsolni, így készültek szegek, vasrudak, nyílhegyek, fokosok. Ezeken számos metallográfiai vizsgálatot végeztem. A következőkben egy vasrúd metallográfiai vizsgálatának eredményét mutatom be. A metallográfiai csiszolat a kovácsolt minta második szeletéből készült (ld. 23. ábra).



23. ábra Kovácsolt vasrúd – a) minta; b) metallográfiai csiszolat (50x)

A kovácsolt minta metallográfiai csiszolatán durva szemcsés, tisztán ferrites szövetszerkezet látható. A zárványok méretei még nagyok. Fe-Fe₃P eutektikum nem jelenik meg.

A petesmalmi ércből készült vasbucákon és vastárgyakon elvégzett metallográfiai csiszolatok arra engednek következtetni, hogy:

- a vasbuca nagyobb részt tisztán ferrites acél, a karbonban való feldúsulás általában nem következik be;
- szemcseszerkezet néha még nagy mértékű átkovácsolás után is durva marad;
- általában sok zárványt tartalmaznak;
- túlzottan nagy foszfortartalom, amely jobb esetben (csak oldott P) hidegen okoz ridegséget, rosszabb esetben (Fe-Fe₃P eutektikum) azonban már kovácsoláskor is törékennyé teszi a munkadarabot.

A karbon- és foszfortartalom meghatározása céljából egy vasszegreplika (24. ábra) esetében vegyelemzés történt. Ennek eredménye a 14. táblázatban látható.



24. ábra: Vasszegreplika

14. táblázat: A vasszegreplika vegyelemzési eredménye

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)
0,0062	0,0107	<0,0007	>0,324	<0,0011	0,0695	0,0374
Ni (%)	Al (%)	Co (%)	Cu (%)	Nb (%)	Ti (%)	V (%)
0,0805	0,0208	0,0067	0,0033	0,037	0,025	<0,0010
W (%)	Pb (%)	Sn (%)	Ce (%)	B (%)	Fe (%)	
<0,0130	>0,0360	<0,0021	0,0354	0,001	<99,1	

Az eredményekből kitűnik a nagyon kis karbontartalom (ilyen kis karbontartalom pontos kimutatására ez a vizsgálati módszer nem alkalmas). Az acél nagyon kevés ötvözőt tartalmaz, szinte tisztán ferritnek tekinthető. A foszfortartalom nagyobb volt a méréshatárnál, így a pontos mennyiségét nem lehet tudni, de az megállapítható, hogy túl nagy mennyiségben van jelen. Ilyen nagy foszfortartalmú acél már nagyon rideg, törékeny,

és ez a gyakorlati tapasztalatokkal is egybevág. A foszfor mai szokásos mennyisége az acélokban: $P < 0,035\%$. Néhány ötvöző mennyisége a mai acéloknál szokásos értékeknél nagyobb, így pl. a mintában megjelenő Nb, mint mikroötvöző, mennyisége ma is szokásos adagolási érték, ennek a mennyiségnek már jelentős hatása van. Hasonló a helyzet a Ti-nal is.

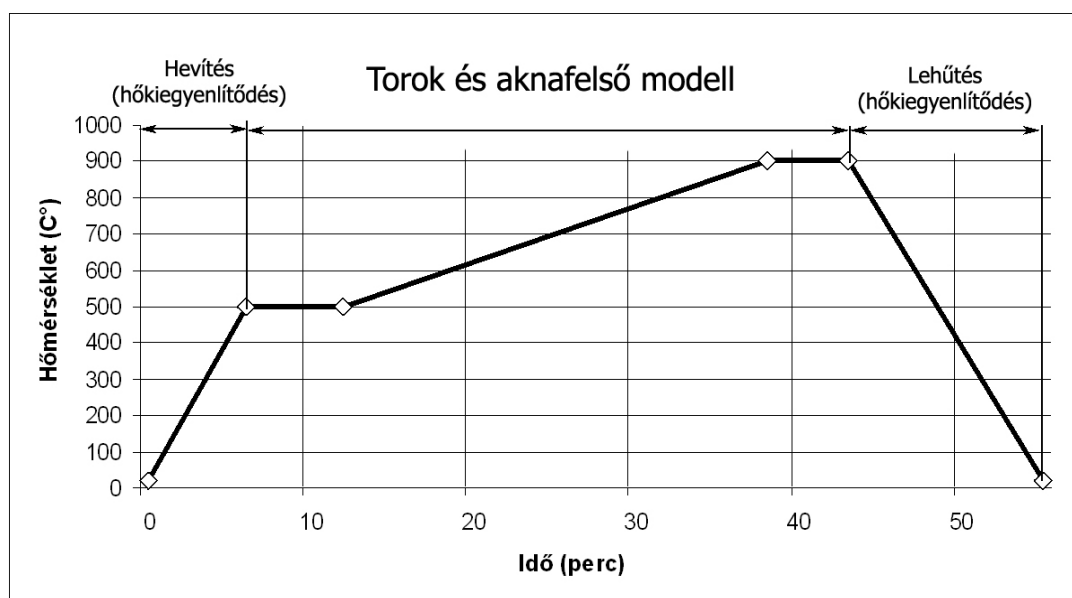
Az elkészült vastárgy replikák már alkalmasak a kora középkori vastárgyakkal való összehasonlításra, bár kémiai összetételük kedvezőtlen. A kora középkori vastárgyak foszfortartalma nem lehetett nagyon magas, különben a nagy ridegség miatt könnyen törhettek volna. A karbontartalom szintén fontos tulajdonsága a vasbucának. Ahhoz, hogy a vas mechanikai tulajdonságait széles határok között, egyszerűen lehessen befolyásolni, nagyobb karbontartalomra lenne szükség, mint amekkorával a próbakohászatok során kapott vasbucák rendelkeznek. A vasbucák karbontartalmának növelése az eddigi próbakohászatok során még megoldhatatlan problémát jelentett.

A saját vasbucák és vastárgyminták összetételét összehasonlíthatjuk a korabeliekkel. Ehhez referenciaként a 4. táblázat kora középkori bucák és vastárgyak kémiai összetételére vonatkozó adatait használhatjuk fel. A saját eredményeket a táblázat adataival összevetve látható, hogy néhány korabeli vastárgy hasonló kémiai összetételű, mint a vizsgált vasszegreplika. Az eredeti vastárgyak többsége nagyobb karbontartalmú, és kisebb foszfortartalmú, de van néhány hasonló összetételű minta is. Az adatokból levonható az a következtetés, hogy az őskohászok számára is problémát okozhatott a vasba nagy mennyiségben bekerülő, azt szennyező foszfor.

6. A BUCAKOHÁSZAT FIZIKAI-KÉMIAI FOLYAMATAI ÉS METALLURGIÁJA

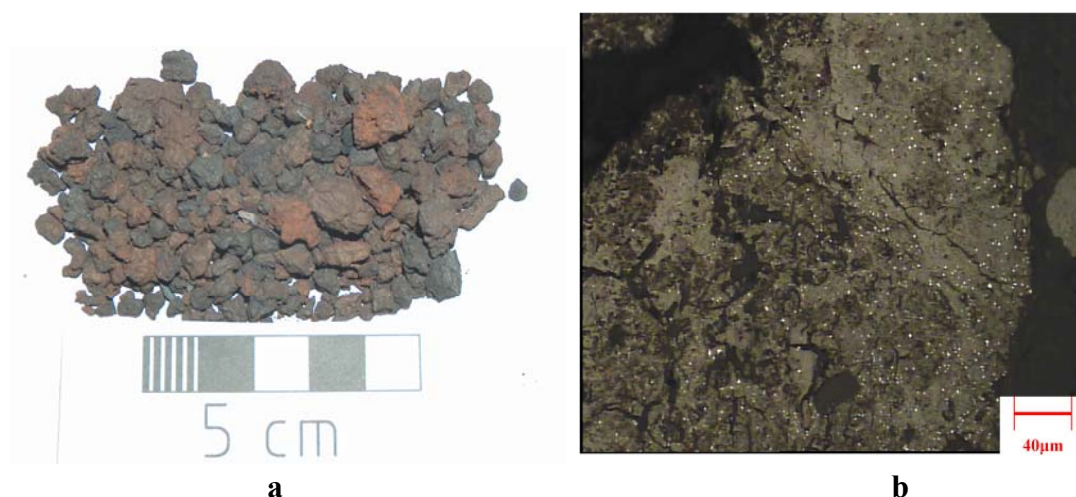
6.1. Kohómodell-kísérletek

A bucakohó torkában és aknájában lezajló folyamatok modellezésére kétlépcsős kísérletet végeztem el. A bucakohó torkában és aknájának felső részén lévő viszonyokat a következőképpen közelítettem: a petesalmi gyepvasércet faszénnel összekeverve (kb. 1:1 tömegarányban), lezárt vasdobozban kb. 40 perc alatt 500°C-ról 900°C-re hevítettem ellenállásfűtéses Denkal 6 típusú kemencében. A kísérlet a cementáláshoz hasonló, de itt acél munkadarab felszenítése helyett gyepvasércet dezoxidálunk. A 40 perces időintervallum az elegyoszlop akna közepéig tartó süllyedési idejének felel meg (a próbakohászatok során történt időmérések alapján, ld. 15. ábra). A kísérlet első fele végén néhány előredukált, részben dezoxidált gyepvasércdarabot optikai mikroszkópos vizsgálatra elkülönítettem. A többi, részben dezoxidált gyepvasércdarabbal végeztem a kísérlet második felét. A kísérlet első felének hőmérséklet-idő diagramját a 25. ábra mutatja.



25. ábra: A torok és aknafelső modellkísérlet hőmérséklet-idő diagramja

A torok és aknafelső modellkísérlet végén a gyepvasércdarabok kisebb része megpörkölődött, vörös színre váltott, nagyobb része viszont szürke lett, előredukálódott. A megjelenő fázisok beazonosítása céljából, és annak eldöntésére, hogy a kísérlet végén található-e már színült vas a mintákban, optikai mikroszkópos vizsgálatot végeztem néhány minta csiszolatán (26. ábra).



26. ábra: A torok és aknafelső modellkísérlet eredménye – a) gyepvasércminták; b) gyepvasércminták csiszolata (200x)

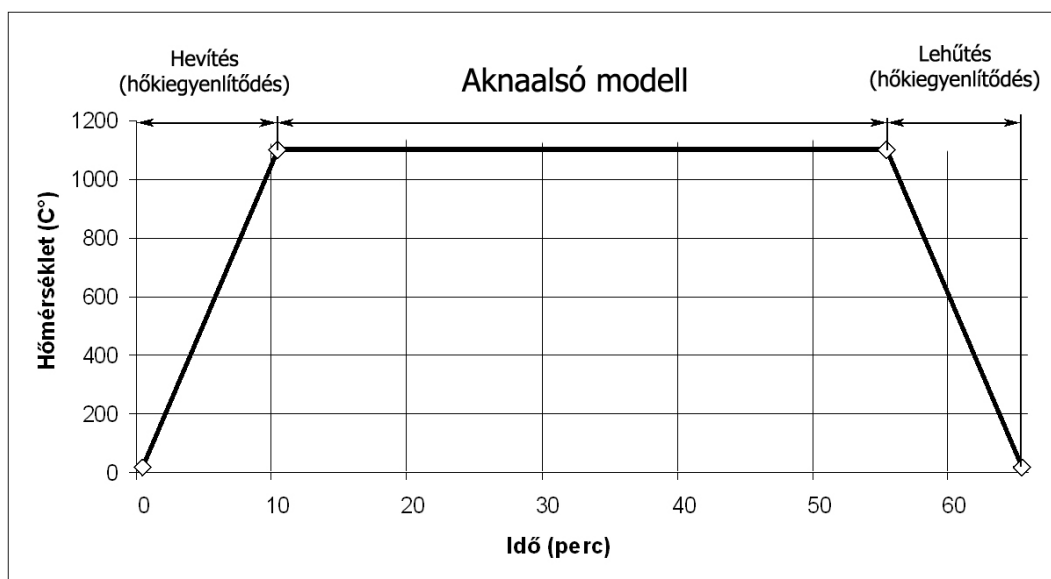
A csiszolatokat összevetve a pörkölt gyepvasércdarabok csiszolatával (17. ábra), látható, hogy a kísérlet végén kis mennyiségben már színült vasszemcsék is megjelennek (fényes fehér pontok). A szilárd halmazállapotú vas-oxidok redukcióját ilyen kis hőmérsékleten a CO végezte. A CO kezdetben a lezárt vasdobozban maradt O_2 és faszén reakciójából ($C + O_2 = CO_2$) keletkező CO_2 Boudouard-reakció szerinti bomlásából ($CO_2 + C = 2CO$) származik. Később az indirekt redukció során keletkező CO_2 bomlásából. A lezárt vasdobozban mindig az adott hőmérsékletre tartozó CO - CO_2 arány áll fenn, ez az arány a Boudouard-görbe alapján határozható meg. Részletesen ld. később.

A kialakuló vasszemcsék mérete néhány mikrométeres, eloszlásuk egyenletes. A színült vasszemcsék kis mennyiségéből arra lehet következtetni, hogy a torok-aknafelső modell hőmérséklet-idő viszonyai nem voltak elegendőek nagy mennyiségű vas kiszínítéséhez. Feltételezem azonban, hogy ha a kísérletet pörkölt gyepvasérccel végeztem volna el, akkor jóval nagyobb mennyiségben színült volna ki a vas a mintákban. A bucakencébe is pörkölt gyepvasércet adagolunk, a kísérlettel így alulról becsüljük a bucakohó aknájának középső részéig kiszínülő vas mennyiségét.

A 26. ábra alapján továbbá az is megfigyelhető, hogy a gyepvasérc szerkezete nagyon porózus, így a nagy fajlagos felület lehetővé teszi, hogy a CO nagy reakciófelületen érintkezessen a szilárd gyepvasérccel.

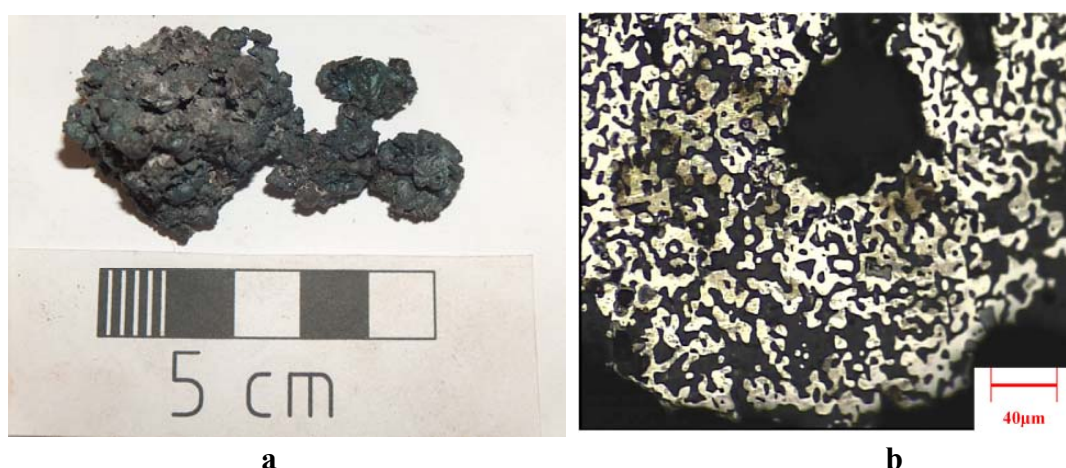
A bucakohó aknájának alsó részében lévő viszonyokat modellezendő a részben dezoxidált gyepvasércdarabokat salakképzővel (ld. sk-01 minta, 11. táblázat) összekeverve kis mennyiségű faszén mellett szintén lezárt dobozba helyeztem, majd $1100^\circ C$ -os egy órás hőntartás következett. Az aknaalsó modellkísérlet hőmérséklet-idő

diagramját a 27. ábra vázolja fel. Az aknaalsó modellkísérlet eredményeképpen egy összesült, szivacsos rög keletkezett (28. ábra).



27. ábra: Az aknaalsó modellkísérlet hőmérséklet-idő diagramja

Az 1100°C-os hőmérsékleten a salak már megolvad és bevonja a reakciófelületeket, meggátolva a további szilárd fázisú redukciót. Felvetődik a kérdés, hogy a nagy vas-oxid-tartalmú olvadt salak és faszén határfelületén zajló olvadék fázisú direkt redukcióval válhat-e ki még nagy mennyiségben vas? Egyáltalán, elég nagy-e ehhez a határfelület? Összevethető-e az olvadék fázisú redukció reakciófelületének a mérete a szilárd fázisú redukció óriási reakciófelületével (a porózus pörkölt gyepvasérc nagyon nagy fajlagos felülettel rendelkezik)?

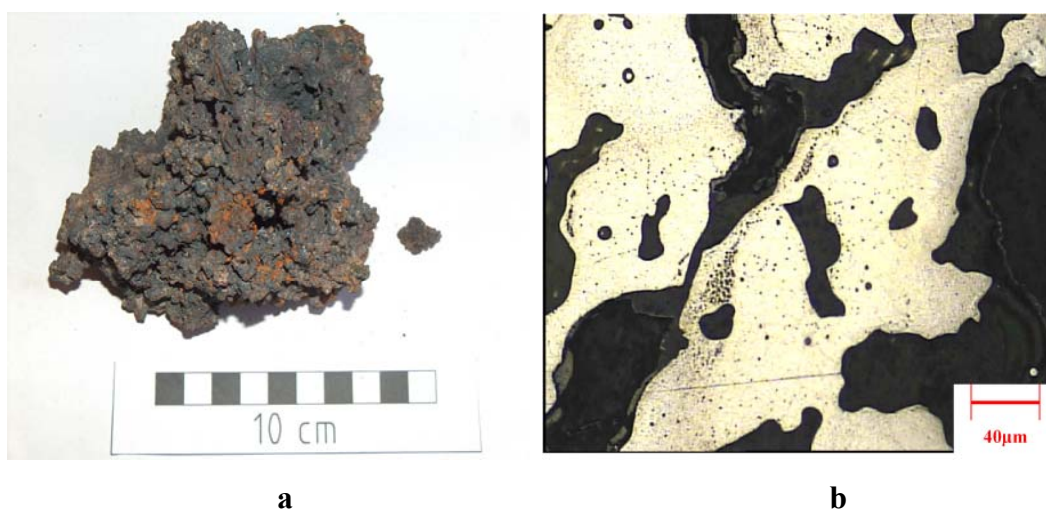


28. ábra: Az aknaalsó modellkísérlet eredménye – a) szivacsos, összesült rög; b) a szivacsos rög egy darabjának metallográfiai csiszolata (200x)

Mivel az aknaalsó modellkísérlet szobahőmérsékletről indult, a salak megolvadása előtt még volt lehetőség szilárd fázisú redukcióval további vasszemcsék kiszínülésére. Az így

keletkezett vasszemcsék összehegedtek, amikor a salak megolvadása miatt érintkezésbe kerültek. A kialakult vasszemcsék mérete néhány 10 mikronos. A kis hőmérséklet miatt a salak nem tudott elfolyni az összehegedt vasszemcsék környezetéből, így nem alakult ki „kis vasbuca”.

A bucakemence medencéjében uralkodó 1200-1300°C-os hőmérsékleten a salak viszkozitása feltételezhetően sokkal jobban lecsökken, ezért a vasbuca kevésbé szivacsos. Ezt a feltevést megerősítendő, egy olyan vasbucadarabon végeztem metallográfiai vizsgálatot, amely a kohó medencéjéből kivett állapotában hűlt le, és nem történt rajta tömörítés. Ezt a vasbucát és a róla származó minta metallográfiai csiszolatát mutatja a 29. ábra.

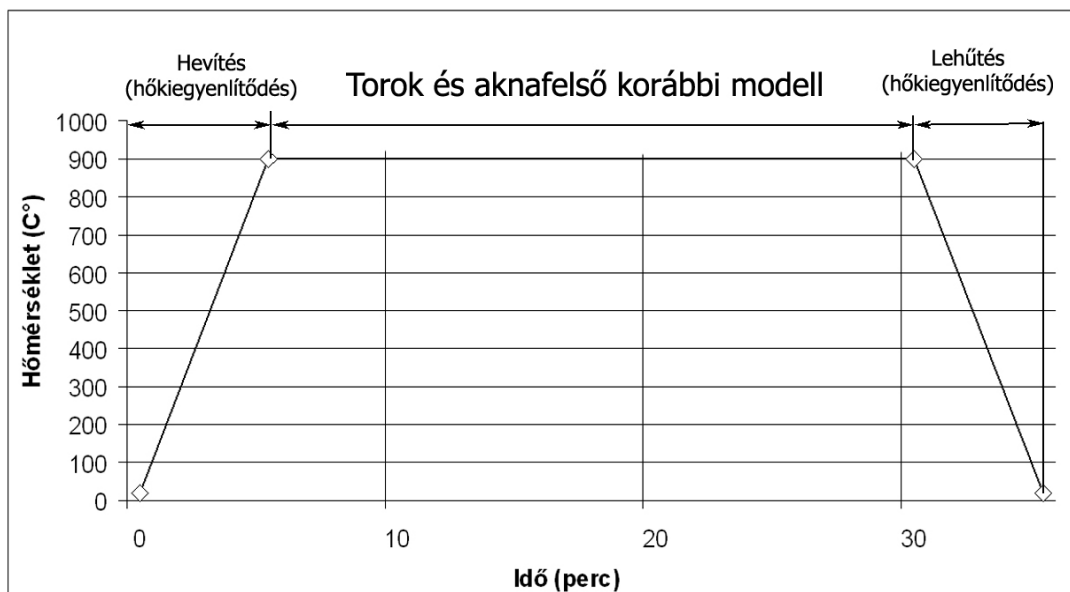


29. ábra: A vasbuca állapota a bucakemence medencéjének viszonyai között – a) a 19. próbakohászat tömörítetlen vasbucája; b) a vasbucáról származó minta metallográfiai csiszolata (200x)

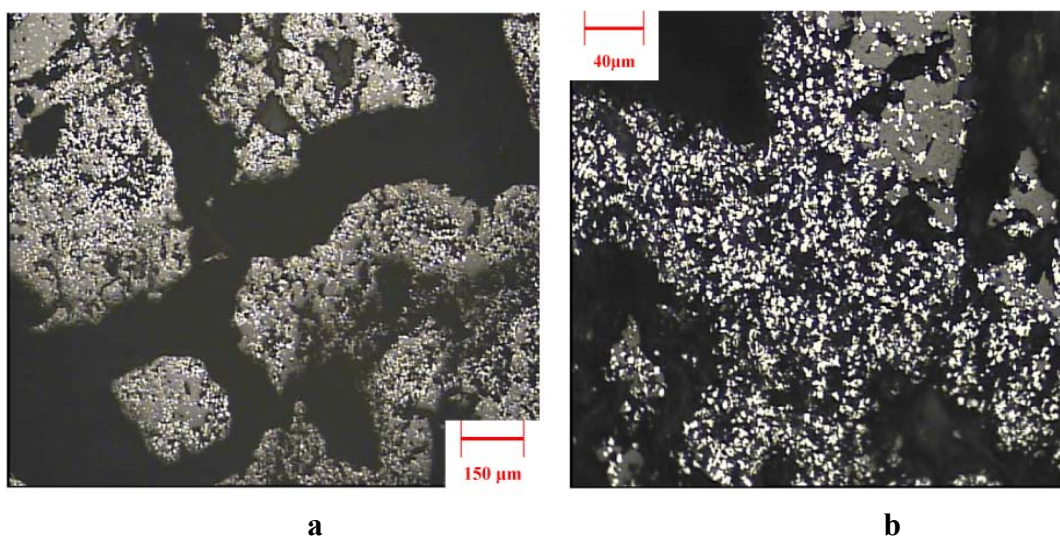
A metallográfiai csiszolat segítségével megállapítható, hogy a vasszemcsék összehegedése a medence nagy hőmérsékletén tovább folytatódik, a kialakuló vasszemcsék mérete már néhány 100 mikronos.

A torok és aknafelső modell hőmérséklet-idő diagramja, próbakohászatok során elvégzett idő és hőmérsékletmérések hiányában, kezdetben jóval egyszerűbb volt: a gyepvasérc-faszén keveréken 900°C-os hőntartást végeztem 30, 60 és 90 percen keresztül. Ennek a kísérletnek a hőmérséklet diagramja a 30. ábra szerint alakult. A gyepvasércdarabok itt is pörköletlenek voltak. Ezekből a kísérletekből megállapítható volt, hogy már 30 perc alatt is jelentős mennyiségű vas színült ki, a 60 és 90 perces minták esetén látott mennyiség

ezt már nem sokkal haladta meg. Egy 30 perces minta mikroszerkezete látható a 31. ábra optikai mikroszkópos felvételein.



30. ábra: A korábbi torok és aknafelső modellkísérlet hőmérséklet-idő diagramja



31. ábra: A korábbi torok–aknafelső modellkísérlet eredménye (900°-os, 30 perces hőntartással)
– a) (50x); b) (200x)

A csiszolatok alapján megállapítható, hogy ugyanannyi idő alatt nagyobb mennyiségben színült ki vas, mint amikor a hőmérséklet 500°C-ról 900°C-ra nőtt. Feltételezem, hogy hasonló képet látnánk, ha az elsőként bemutatott akna modellkísérletet pörkölt gyepvasércel végeznénk el, ezért úgy gondolom, hogy indirekt redukcióval a gyepvasércből nagy mennyiségű vas színül ki, mire az a bucakohó aknájának aljára ér.

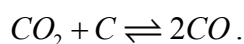
6.2. A bucakohó metallurgiája

Az elvégzett modellkísérletek, rekonstrukciós kísérletek, valamint az azok során elvégzett mérések és az őket követő anyagvizsgálatok eredményei alapján, illetve a korszerű anyagtudomány segítségével nagy vonalakban felvázolhatók a bucakemencében lezajló metallurgiai folyamatok.

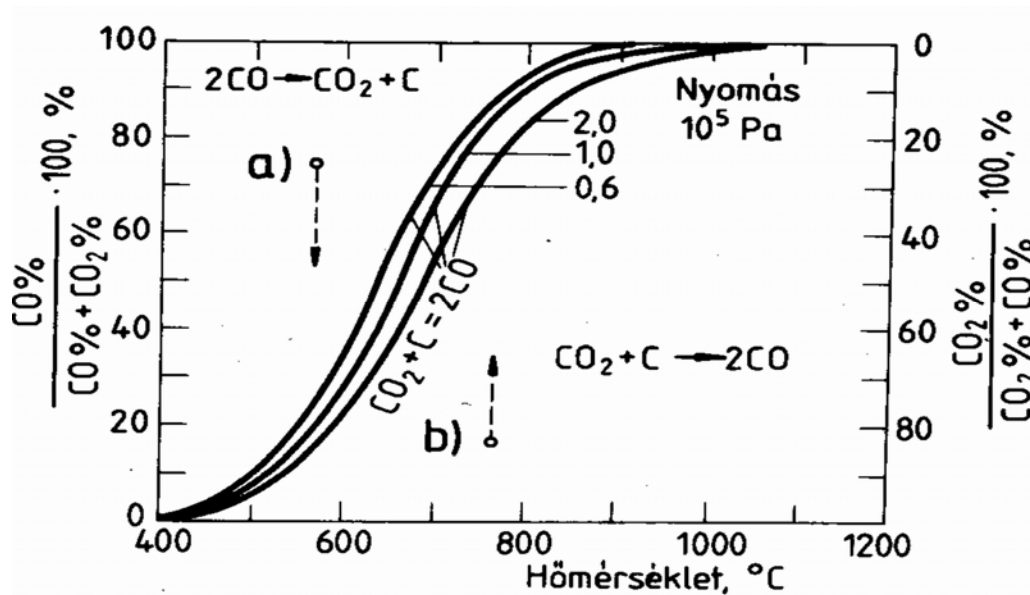
Mindenek előtt vizsgáljuk meg a bucakohó atmoszféráját és hőmérséklet-eloszlását! A kohóba befűjt nagy térfogatú levegő a fűvóka előtt nagy oxigénfelesleget okoz. Ezért a levegő oxigéntartalma a beadagolt faszén karbontartalmával első lépésben CO_2 -vé egyesül, annak ellenére, hogy az uralkodó kb. 1400°C -os hőmérsékleten a keletkezett CO_2 nem stabil:

$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, $\Delta G = -400 \text{ kJ/mol}$ (exoterm); ΔG a hőmérséklettől csak kis mértékben függ.

A fűvókától távolodva csökken az oxigén koncentrációja, a Boudouard-reakció érvényre jut, amelynek során a faszén elégéséből keletkező széndioxid az izzó faszén karbontartalmával szénmonoxidot képez:



A faszén karbontartalma tehát két lépésben oxidálódik. A Boudouard-reakció iránya, illetve az eredményeképpen kialakuló CO/CO_2 arány a hőmérséklettől függ, ahogyan ez a Boudouard-görbén látható (32. ábra, FARKAS 1989).

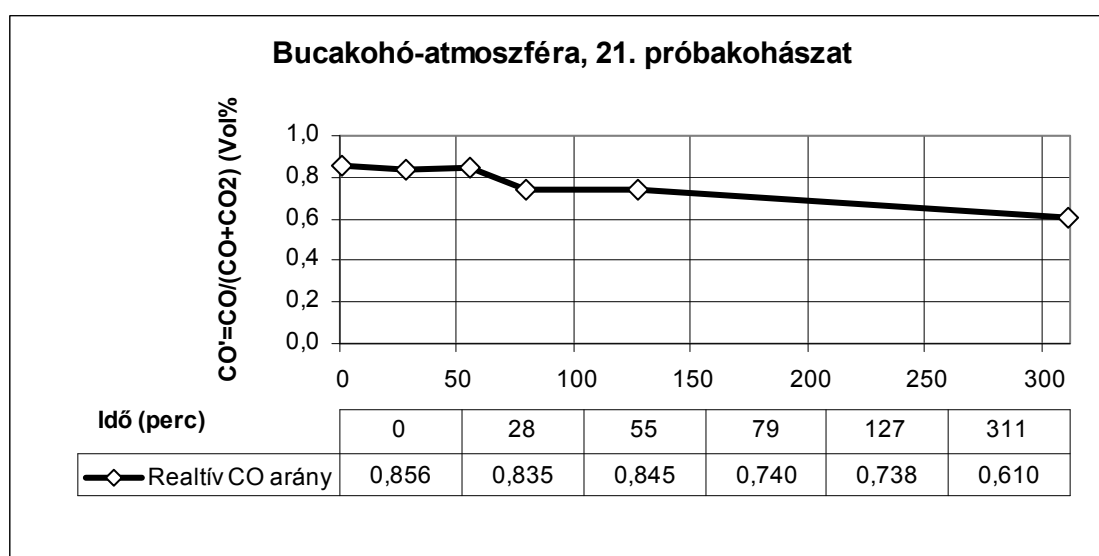


32. ábra: A Boudouard-görbe

A Boudouard-görbék kis mértékben eltolódnak a nyomás függvényében. Látható továbbá, hogy nagy hőmérsékleten a Boudouard-reakció a CO keletkezésének irányába tolódik el. A bucakohó atmoszférájának relatív szén-monoxid aránya (CO') az alábbi képlettel számítható:

$$CO' = \frac{CO\%}{CO\% + CO_2\%} * 100\%.$$

A 21. próbakohászat során az akna felső pontjában végzett gázösszetétel-mérések eredményeiből (ld. 7. és 8. táblázat) és a CO' számolt értékeiből az idő függvényében megrajzolható a 33. ábra diagramja.



33. ábra: A 21. próbakohászat során kialakult relatív CO arányok a bucakohó aknájában

A próbakohászat ideje alatt a CO' értéke lassú csökkenést mutatott. Az akna felső pontjában mérhető relatív CO arány kb. 0,8-nak tekinthető, a hőmérsékletet pedig hozzávetőlegesen 500°C-nak (ld. 6. táblázat). A stabil relatív CO arány 500°C-on azonban mindössze 0,1 lenne a Boudouard-görbe szerint. Ebből arra lehet következtetni, hogy a bucakohó jó átszellőzöttsége miatt a fűvósík nagy hőmérsékletén kialakuló nagy relatív CO arányú atmoszféra CO-tartalma a gyors feláramlás miatt nem képes lecsökkenni az adott hőmérsékleten stabil relatív CO arányokra, illetve szerepet játszik a Boudouard-reakció relatíve kicsi sebessége is. A bucakohó egyszerűsített hőmérséklet és CO' eloszlását a 15. táblázat foglalja össze, felhasználva 21. próbakohászat hőmérsékletméréseit és a 33. ábra adatait.

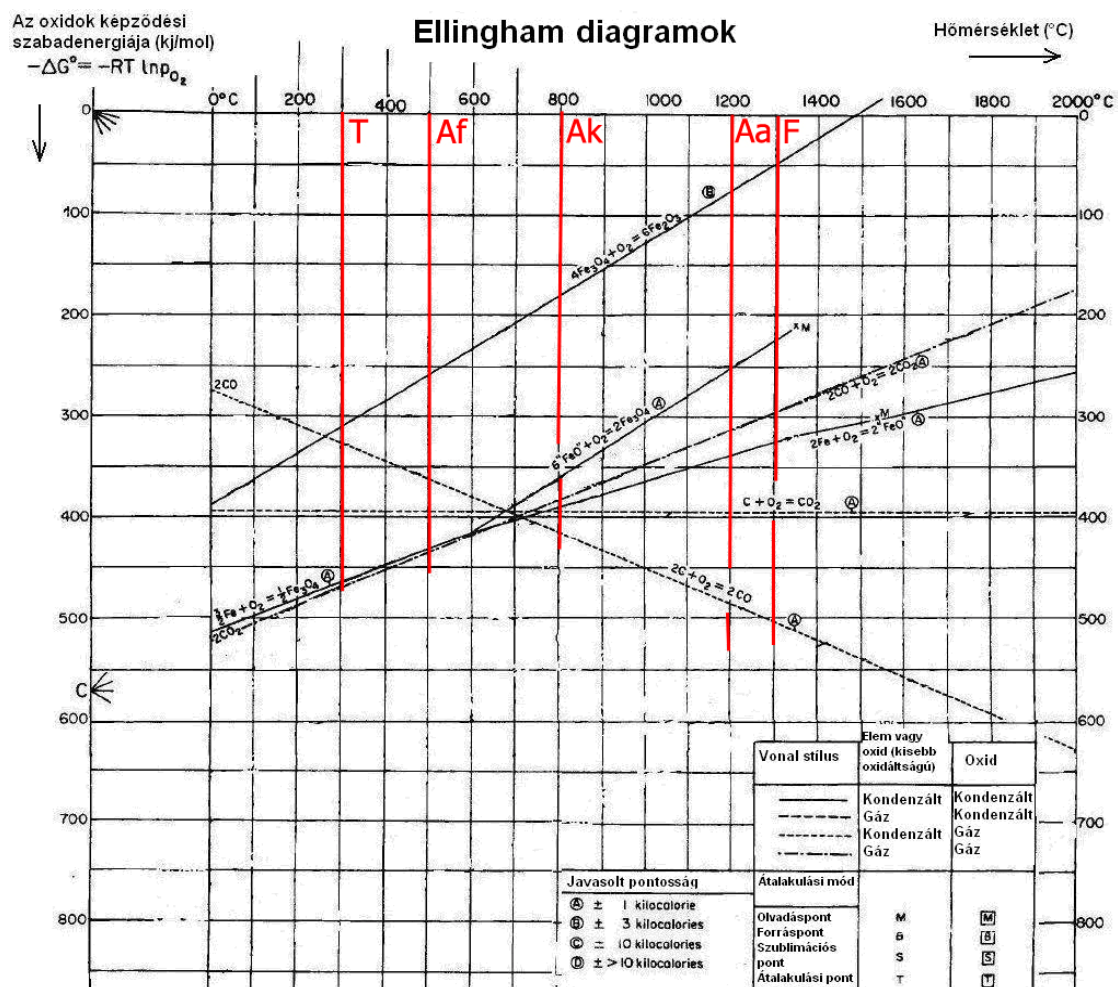
15. táblázat: A bucakohó egyszerűsített hőmérséklet és CO' eloszlása

	Hőmérséklet (°C)	Relatív CO arány (-)
Torok (T)	300*	0,7*
Aknafelső (Af)	500	0,8
Aknaközép (Ak)	800	0,9*
Aknaalsó (Aa)	1200	1*
Fúvósík (F)	1300	1**

Megjegyzés: *Ha az akna felső részén mért CO'=0,8 értékből indulunk ki, akkor feltételezem, hogy a torokban már csak kb. CO'=0,7, az akna közepén pedig kb. CO'=0,9, az akna alsó része és a medence nagy hőmérsékletén pedig közelítően CO'=1 értéket várhatok. Ezt a feltételezést a bucakohó több pontján elvégzett gázösszetétel-méréssel lehetne bizonyítani. A torok 300°C-os hőmérséklete szintén becslést jelent.

**A CO'=1 használatával nem a fúvóka közvetlen környezetében érvényes viszonyokat jellemzem, hanem a fúvósík és a medence viszonyait.

Ezek után vizsgáljuk meg, mi történik a bucakohóban a fent jellemzett relatív CO-arányú és hőmérsékletű viszonyok között a fokozatosan süllyedő gyevasércréteggel. A folyamatok értelmezéséhez felhasználom a vas-oxidok, valamint a C és CO oxidációjára vonatkozó Ellingham-diagramokat (34. ábra), amelyek megmutatják, hogy az adott hőmérsékleten lezajló oxidációs folyamatok mekkora szabadenergia csökkenéssel járnak.



34. ábra: Vas-oxidok, valamint a C és CO oxidációjára vonatkozó Ellingham-diagramok

Továbbá felhasználok a vas redukciójának egyensúlyi vonalait ábrázoló Boudouard–Bauer–Gläser-diagramot, amelynek egy-egy pontja megmutatja, hogy adott gázösszetétel és hőmérsékletviszonyok mellett milyen szilárd fázisok tartanak egyensúlyt. Ahhoz, hogy tudjuk, milyen CO és CO₂ parciális nyomásösszeghez tartozó diagramot vehetünk figyelembe, meg kell határozni, hogy mennyi a CO és CO₂ gázok parciális nyomásának összege a bucakohó atmoszférájában. A parciális nyomásösszeg függvényében a Boudouard–Bauer–Gläser-diagram a Boudouard-diagramhoz hasonlóan eltolódik. Dalton törvénye értelmében a gázkeverék nyomása a komponensek parciális nyomásainak összege.

A gázelegy valamennyi komponensére érvényes a

$$P_{p_i} V_{kev} = P_{kev} V_i$$

összefüggés, ahol: $\frac{V_i}{V_{kev}}$ a térfogattört.

A 8. táblázatban a gázelegy egyes komponenseinek térfogattörtjei adottak, és ismert, hogy $P_{kev} = 1 \text{ bar}$.

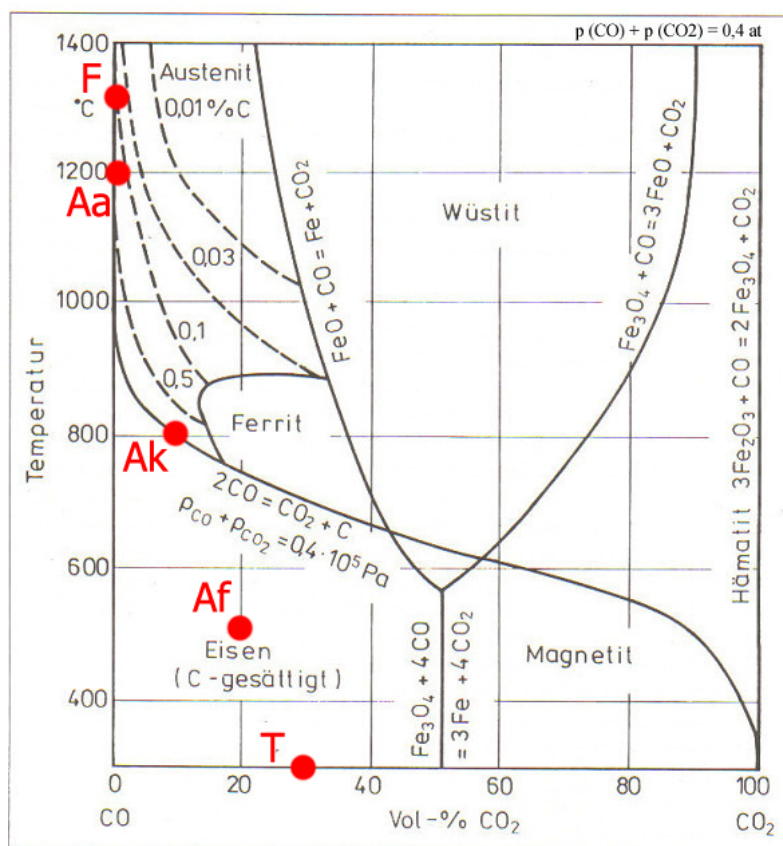
Ebből:

$$P_{p_{CO}} = P_{kev} \frac{V_{CO}}{V_{kev}} \text{ és } P_{p_{CO_2}} = P_{kev} \frac{V_{CO_2}}{V_{kev}}$$

Tehát elmondható, hogy a Boudouard–Bauer–Gläser-diagramhoz szükséges CO és CO₂ parciális nyomások összegei:

$$P_{p_{CO}} + P_{p_{CO_2}} \cong 0,3..0,35 \text{ bar} \cong 0,296..0,345 \text{ at}$$

Tehát a 0,4at parciális nyomásösszeghez tartozó Boudouard–Bauer–Gläser-diagram használható (35. ábra). A diagramban piros pontokkal jelölve láthatók a 15. táblázat összetartozó hőmérséklet-CO' értékei alapján felvehető munkapontok.

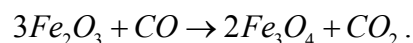


35. ábra: Az Fe-O-C rendszer egyensúlyi viszonyai (Boudouard–Bauer–Gläser-diagram)

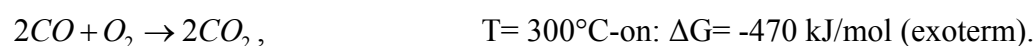
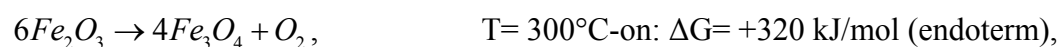
6.2.1. A torokban zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok

A 35. ábrán bejelölt munkapontok alapján most már lépésről lépésre felvázolhatók a bucakemence egyes részein zajló fizikai-kémiai folyamatok.

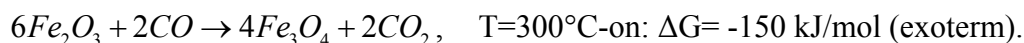
A bucakohó torkába az ércpörköltő gödörből kikerülő, nagyrészt hematitos gyepvasércet adagoljuk. Itt a hőmérséklet kb. 300°C, és $CO' = 0,7$. A Boudouard–Bauer–Gläser-diagram alapján a nagy fajlagos felületű gyepvasércben egyre nagyobb arányban a magnetites fázis jelenik meg, előredukció történik:



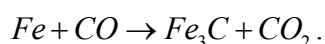
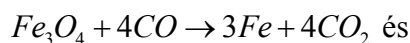
Ha ezt a reakciót két részre bontjuk, akkor az Ellingham-diagramok alapján meghatározható a szabadenergia-változás:



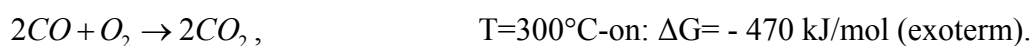
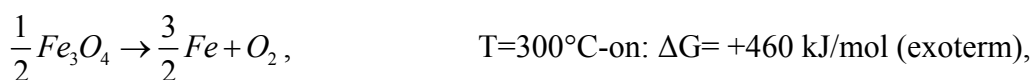
Ha a hematit magnetitté történő redukciója során keletkező oxigént a szén-monoxid veszi fel, és így szén-dioxiddá oxidálódik, akkor:



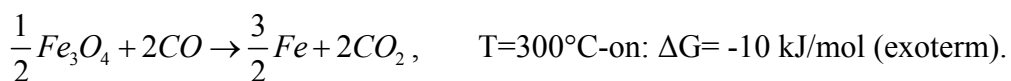
A Boudouard–Bauer–Gläser-diagram szerint, ha az elegyoszlop nagyon hosszú időt töltene a torokban, akkor az ott uralkodó hőmérséklet-CO' értékkel ($T=300^\circ\text{C}$, $CO'=0,7$) vaskarbid tarthatna egyensúlyt:



Ha vas magnetitből történő szénülésének reakcióját két részre bontjuk, akkor az Ellingham-diagramok alapján meghatározható a szabadenergia-változás:



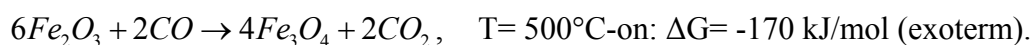
Ha a magnetit színavassá történő redukciója során keletkező oxigént a szén-monoxid veszi fel, és így szén-dioxiddá oxidálódik, akkor:



Ha a reakciókinetikai viszonyokat tekintjük, akkor a magnetit közvetlenül vassá történő redukcióját kinetikai tényezők gátolják, mert csekély a valószínűsége annak, hogy egyszerre négy CO-molekula lépjen reakcióba egy magnetit-molekulával (FARKAS 1989). A gyakorlatban nem áll rendelkezésre elegendő idő ahhoz, hogy a kohó torkában jelentős mennyiségű vas színüljön ki a magnetitből.

6.2.2. Az aknában zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok

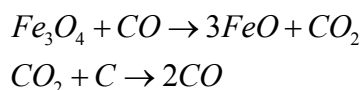
Az akna felső részében a hőmérséklet 500°C , $CO'=0,8$. Itt a torokban uralkodó viszonyokhoz képest nincs nagy változás, tovább folytatódik a hematit magnetitté redukálódása. Az előző számításokhoz hasonlóan:



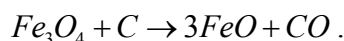
Mire az ércréteg az akna közepéig süllyed, feltételezem, hogy hematittartalma már elhanyagolhatóan kicsi, a magnetitté történő redukciója lényegében végbement. A

magnetit színvassá történő redukciója azonban a gyakorlatban még mindig nagyon lassú, színült vasszemcsék mindeddig nem jelennek meg nagy mennyiségben.

Az ércréteg tovább süllyed az akna 800°C-os hőmérsékletű, középső részére, ahol a magnetit wüstitté redukálódik. Az Ellingham-diagramok alapján látható, hogy kb. 700°C felett a direkt redukciónak már termodinamikai előnye van az indirekt redukcióval szemben (ld. C és CO oxidációjára vonatkozó egyenesek metszéspontja). A magnetit direkt redukciójának zöme a két szilárd fázis (faszén-gyepvasérc) érintkező felületeinek korlátai miatt nem közvetlenül, hanem a CO közreműködésével megy végbe (FARKAS 1989). A magnetit indirekt redukciója során keletkező nem stabil CO₂ a Boudouard-reakció értelmében karbonnal reagálva CO-vá bomlik:

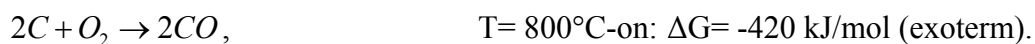
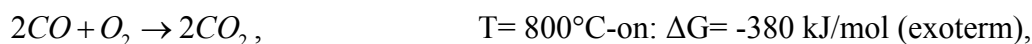
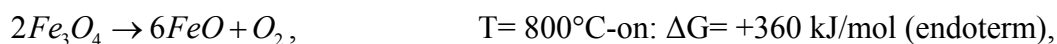


Így a fenti két reakció bruttó folyamata a magnetit direkt redukciója:

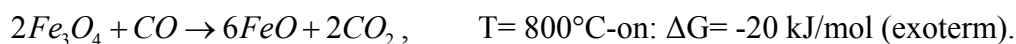


Az, hogy adott hőmérsékleten milyen mértékben jut érvényre a direkt redukció, attól függ, hogy az adott hőmérsékleten mennyire stabil a CO₂ a Boudouard-reakció értelmében. Ez azt jelenti, hogy 1000°C felett, ahol a CO₂ már egyáltalán nem stabil, kizárólag direkt redukció mehet végbe. De azt is jelenti, hogy a torok középső részén uralkodó 800°C-os hőmérsékleten a kétféle redukciós folyamat egymás mellett van jelen, mivel ezen a hőmérsékleten a CO₂ továbbra is stabil (bár a stabil CO' arány már nagy).

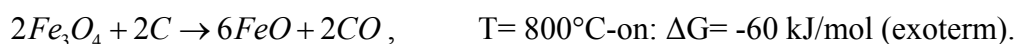
Ha a magnetit indirekt és direkt redukcióját két részre bontjuk, akkor az Ellingham-diagramok alapján meghatározható a szabadenergia-változás:



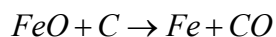
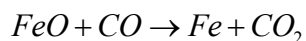
Ha a magnetit wüstitté történő indirekt redukciója során keletkező oxigént a szén-monoxid veszi fel, és így szén-dioxiddá oxidálódik, akkor:



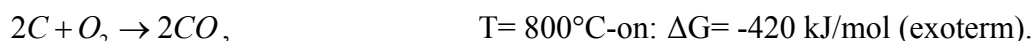
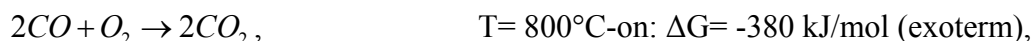
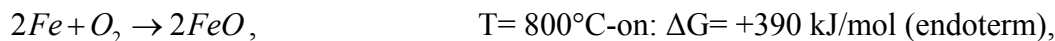
Ha a magnetit wüstitté történő direkt redukciója során keletkező oxigént a karbon veszi fel, és így szén-monoxiddá oxidálódik, akkor:



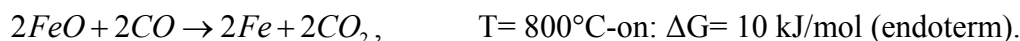
Az előzőek értelmében az akna 800°C-os középső részén kezdődik meg a vas kiszínülése wüstitből az indirekt és direkt redukcióval:



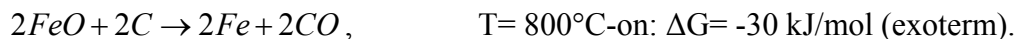
Ha a wüstit indirekt és direkt redukcióját két részre bontjuk, akkor az Ellingham-diagramok alapján meghatározható a szabadenergia-változás:



Ha a wüstit színvassá történő indirekt redukciója során keletkező oxigént a szén-monoxid veszi fel, és így szén-dioxiddá oxidálódik, akkor:



Ha a wüstit színvassá történő direkt redukciója során keletkező oxigént a karbon veszi fel, és így szén-monoxiddá oxidálódik, akkor:



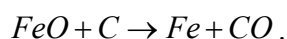
A Boudouard–Bauer–Gläser-diagram szerint az akna középső részén uralkodó hőmérséklet-CO' viszonyok ($T = 800^\circ\text{C}$, $CO' = 0,9$) mellett éppen az eutektoidos összetételű ausztenit fázis tart egyensúlyt a gázközeggel.

Az akna középső pontjától az alsó pontja felé süllyedő gyepvasércréteg vas-oxid tartalma jelentős részben színvassá alakul. Ezen a szakaszon elkezd azonban az érc maradék vas-oxid tartalma, meddője és a beadagolt salakképző salakká összeolvadni. A megjelenő olvadt salak bevonja a gyepvasérc darabok felszínét, csökken mind a direkt, mind az indirekt redukció reakciófelülete. Az olvadt salak végül meggátolja a CO bejutását a darabok belsejébe, ezzel a szilárd fázisú redukció megáll. A salak megolvadásával az eddig kialakult vasszemcsék egymáshoz érnek, diffúziós hegedéssel összehegednek.

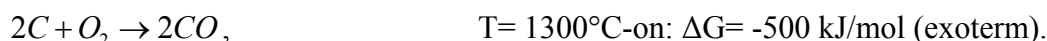
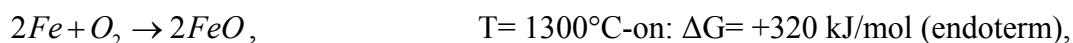
Tehát a vasbuca fő tömegét adó vas az aknában alakul ki részben indirekt, részben direkt redukcióval.

6.2.3. A medencében zajló fizikai-kémiai és metallurgiai folyamatok

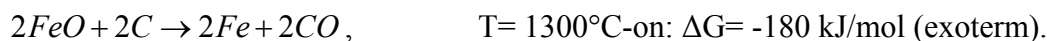
Ahogy az olvadt salakkal borított vasrögök az akna alsó pontjától a fűvósík közelébe süllyednek, a salak viszkozitása jelentősen lecsökken. A híg folyós olvadt salak nagy mennyiségben tartalmaz még vasat: oxidos formában, mint wüstit, illetve kémiaiilag lekötve a fayalitban. Elméletileg lenne lehetőség a direkt redukcióra a folyékony salak és a faszén fázishatárán. Ez a reakciófelület azonban jóval kisebb, mint a porózus gyeppasérc reakciófelülete, tehát a direkt redukcióval színülő vas mennyisége feltételezhetően nem jelentős:



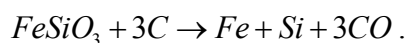
Ha ezt a reakciót két részre bontjuk, akkor az Ellingham-diagramok alapján meghatározható a szabadenergia-változás:



Ha a wüstit színvassá történő redukciója során keletkező oxigént a karbon veszi fel, és így szén-dioxiddá oxidálódik, akkor:



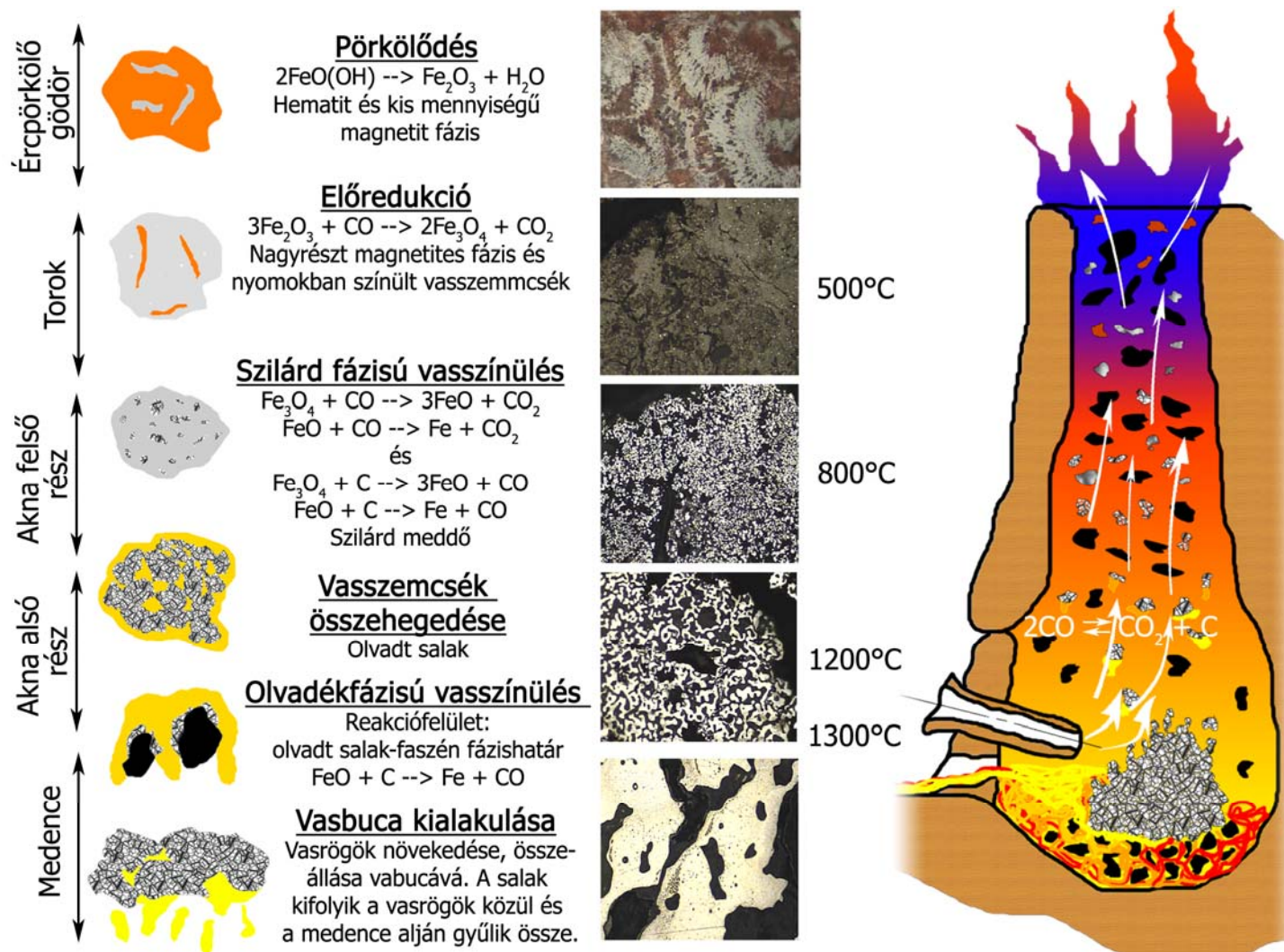
Fayalitból az alábbi reakcióegyenlet szerint színülhet ki még vas:



A gyakorlatban az olvadt salakból nagyon kevés vas színül ki. A vasbuca a medence alján lévő faszéndarabokon ül, belőle a salak kiolvad, és átfolyik a faszéndarabok között feltöltve a medencét. Ilyenkor képzelhető el kis mennyiségű vasszínülés olvadék fázisú direkt redukcióval. Az így színülő vas héj vagy lemez alakú, a faszén formáját követi. Ezt a folyamatot bizonyítják azok a vékony vaslemezek, amelyek rendszerint a vasbuca alján keletkeznek, de nem ezek teszik ki a buca fő tömegét.

A redukciós folyamatok minél teljesebb végbemeneteléséhez (és egyensúlyi helyzetek kialakulásához) az ércrétegek lassú süllyedése lenne kívánatos, azonban ez a gyakorlatban nem lehetséges, mert a nagy hőmérséklet fenntartása érdekében elengedhetetlen a folyamatos, intenzív fűjtetés. Így, a gyorsan eléggő faszén miatt, az elegyoszlop viszonylag gyorsan süllyed.

A vasbucakohászat metallurgiáját a 36. ábra foglalja össze.



36. ábra: A vasbucakohászat metallurgiája

7. A VASBUCAKOHÁSZAT TECHNOLÓGIÁJÁRA VONATKOZÓ SZÁMÍTÁSOK

A bucavaskohászati technológia és a végbemenő metallurgia folyamatok részletes ismeretében megpróbálhatunk választ adni a technológiával kapcsolatos néhány, a régészet oldaláról felmerülő néhány kérdésre:

- Történhetett-e salakképzés, salakmódosítás a bucakohóban?
- Milyen vaskihozataalt érhettek el az őskohászok?
- Milyen vastartalmú érceket kohósíthattak eredményesen az őskohászok?

7.1. Salakképzés

A bucakohó atmoszférájában lejátszódó gyepvasérc-redukciót nagyban befolyásolja a wüstitből, a gyepvasérc meddőjéből és a beadagolt salakképzőkből keletkező olvadt salak. A korán megolvadó salak ugyanis bevonja az ércszemcsék felületét és meggátolja a redukciót. A nehezen olvadó salakot pedig nehéz elválasztani a vasbucától. Ezért a túl kis hőmérsékleten olvadó salak nem kedvező, mert még vas-oxidokat tartalmazó ércet oldhat fel, csökkentve a vaskihozataalt, de a túl nagy olvadáspontú salak sem jó, mert kezelése nehéz. A salak szerepe továbbá, hogy a kohó medencéjében növekvő vasbucát megvédje a fúvóka előtt kialakuló, feltételezhetően kisebb CO' arányú atmoszférában a visszaoxidálódástól, illetve a vasbuca átkovácsolásakor lehetővé teszi a szabad felületek összehegedését.

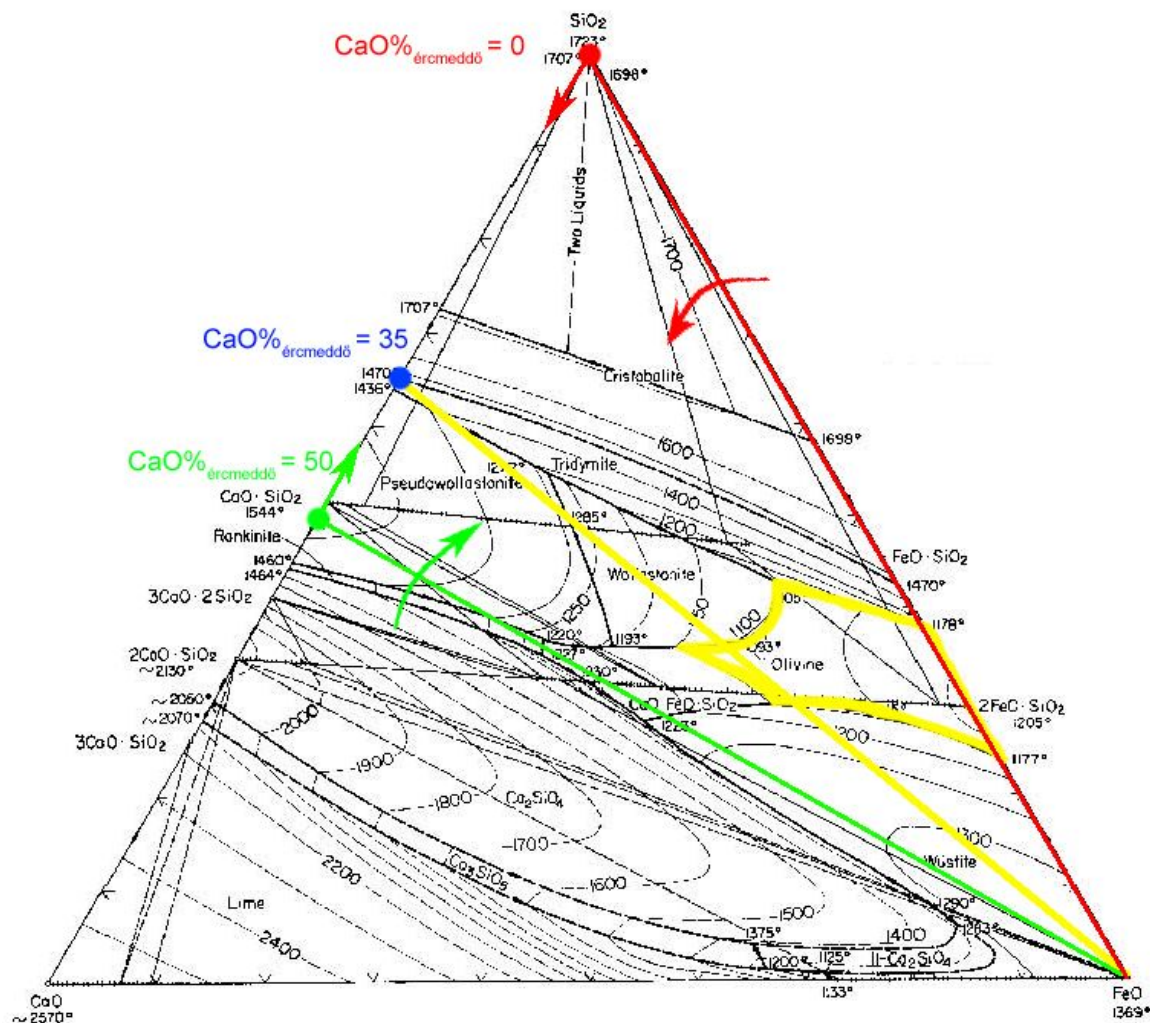
A megfelelő olvadáspontú salak létrehozása tehát fontos. A salak olvadáspontját annak összetételével lehet befolyásolni. Azt, hogy a bucavaskohászat során használtak-e tudatosan salakképzőket az őskohászok, nem lehet egyértelműen kijelenteni. Bár rendelkezésükre állhatott, a régészeti feltárások során mégsem találtak fahamut vagy homokot a kohótelepek közelében felhalmozva. Néhány esetben felmerült azonban a mészkő adagolásának lehetősége. Az is lehetséges, hogy a salak összetételének módosítása céljából eltérő összetételű gyepvasérceket kohósítottak. Esetleg egyes kohászok kitapasztalhatták, hogy adott színű és állagú ércek milyen keverékével keletkezik a kohászat kis hőmérsékletén híg folyós salak, természetesen úgy, hogy közben elegendően nagy vasbuca is összeálljon a kohó medencéjében. Egy érdekes lehetőség a korábbi kohászatok során keletkezett folyós salak összetörése és ismételt beadagolása a

kohóba. A számos módszer közül a következőkben rekonstrukciós kísérletek során használt fahamu és homok keverékéből álló salakképzést mutatom be részletesen.

A salak összetételére a beadagolt gyevasérc meddőjének összetétele, a beadagolt salakképző fahamu és homokkeverék összetétele, továbbá az érc vas-oxidjából keletkező wüstittartalom van hatással. A salakképzés elméleti hátterének kidolgozásához a következőket feltételezem:

1. A gyevasérc meddőjének összetétele állandó (ez az elvégzett vizsgálatok szerint nagyrészt igaz) és csupán kvarcból és kalcitból áll (ez a petesmalmi gyevasérc esetében nem igaz, annak relatíve nagy foszfor-pentoxid, vagy apatittartalma miatt), amiből a salakba a SiO_2 és a CaO kerül.
2. A salakképző keverék előállításához használt homok összetétele állandó, 100% kvarc, amiből a salakba SiO_2 kerül (ez a felhasznált homok esetében csak fenntartásokkal igaz).
3. A salakképző keverék előállításához használt fahamu összetétele állandó, a salakba kerülő része 70% CaO -t és 30% SiO_2 -t tartalmaz (ez a vizsgált ham-01 minta esetén az izzítási veszteség levonása után igaz is).
4. A salak a terner-diagramokból meghatározható éles olvadásponttal rendelkezik (ez a salakban meglévő amorf fázis miatt nem igaz, de a kapott olvadáspontokkal felülről megbecsülhető az a hőmérséklet, ahol a valóságban a salak már kezelhető).
5. A fahamu adagolása nagy alkáli fém-oxid-tartalma miatt csökkenti a salak olvadáspontját, ezért a fahamu adagolása a lehető legnagyobb mennyiségben célszerű (Na_2O és K_2O általában jelentős mennyiségben fordul elő a fahamuban, mint üvegképző segít a SiO_2 lágyuláspontját lecsökkenteni; a fah-01 minta azonban nem tartalmaz sok alkáli fém-oxidot, legalábbis nem kristályos fázisban).
6. A beadagolt salakképző teljes mennyisége összeolvad az érc meddőjével (a gyakorlatban ez nem mindig van így, a salakképző gyakran egyszerűen leperreg a kohó aljára).
7. Az olvadt salak nem lép reakcióba a bucakohó falazatával, így az összetételét csak a betétanyagok határozzák meg (ez a feltétel általában szintén nem teljesül, a próbakohászatok során gyakran megfigyelhető volt, hogy az olvadt salak feloldotta a kohó falazatának egy részét).

Az elmondottak alapján a bucakohó salakképzési elméletéhez felhasználható a már megismert SiO_2 - CaO - FeO terner diagram (37. ábra).



37. ábra: Salakképzés a $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ terner diagramban

A diagramban sárgával határolt területen elfogadhatóan alacsony, 1200°C alatti, a háromalkotós salak olvadáspontja. A salakképző keverék segítségével kialakítandó salakösszetétel tehát ebbe a mezőbe kell, hogy essen. Ez mind a kísérleti, mind a régészeti tapasztalatoknak megfelel (ld. 19. ábra). A salak FeO tartalma bizonytalan, nem számszerűsíthető, ehhez nem történt elegendő salakmintán vegyelemzéses vizsgálat. Ezért a diagramban nem jelölhető ki egy adott pont az ideális salakösszetételnek megfelelően. A felsorolt egyszerűsítések alapján a betétanyagok kémiai összetétele azonban biztos, ezért az ideális salakösszetételnek megfelelő egyenes kijelölhető.

Ha a sárgával határolt területhez olyan belső érintőt akarunk húzni, amelyen mozogva a legnagyobb a CaO alkotó aránya, akkor az a sárga egyenes lesz. Az ideális, kis olvadáspontú salak összetételében a lehető legnagyobb mennyiségben van CaO, mert a lehető legtöbb fahamut kell a 8. feltétel szerint beadni a salakképzés céljából. Tehát a homokból, fahamuból, az érc meddőjéből (ezt nevezzük mostantól összes meddő

anyagának) és FeO-ból kialakuló salak összetétele a sárga egyenesre esik, pontosabban változó FeO tartalommal ezen az egyenesen mozog. A sárga egyenes mentén a $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ aránya 35:65. A kohóba kerülő összes meddő anyagból adódó $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ aránya kedvező esetben így 35:65, amely a terner diagram $\text{SiO}-\text{CaO}$ oldalán a kék körrel jelölt pontnak felel meg.

Kérdés, hogy milyen arányban kell a salakképző keveréknek fahamut és homokot tartalmaznia ahhoz, hogy az összes meddő anyag $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ aránya 35:65 legyen? A kérdést gyakorlatiasabbá téve: mennyi fahamut kell adni 1kg homokhoz, és mennyi salakképzőt kell adni 1kg érchez?

Az összes meddő anyag kétalkotós, csak CaO-ból és SiO_2 -ből áll. Benne a CaO aránya a következő képlettel számítható:

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő+homok+hamu}} = \frac{m_{\text{hamu}} * \text{CaO}\%_{\text{hamu}} + m_{\text{ércmeddő}} * \text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}}}{m_{\text{ércmeddő}} + m_{\text{homok}} + m_{\text{hamu}}}$$

ahol :

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő+homok+hamu}} = 0,35$$

$$\text{CaO}\%_{\text{hamu}} = 0,7$$

$$m_{\text{ércmeddő}} = m_{\text{érc}} * (\text{CaO}\%_{\text{érc}} + \text{SiO}_2\%_{\text{érc}})$$

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}} = \frac{\text{CaO}\%_{\text{érc}}}{m_{\text{ércmeddő}}}$$

A 1kg homokhoz adandó fahamu mennyisége a fenti képletből kifejezhető.

1. Példa:

Tegyük fel, hogy 1kg gyepvasércet kohósítunk, amelynek összetétele:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3\% = 100$$

Ekkor:

$$m_{\text{ércmeddő}} = m_{\text{érc}} * (\text{CaO}\%_{\text{érc}} + \text{SiO}_2\%_{\text{érc}}) = 0\text{kg}$$

Így az $m_{\text{homok}} = 1\text{kg}$ homokhoz keverendő fahamu:

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő+homok+hamu}} = \frac{m_{\text{hamu}} * \text{CaO}\%_{\text{hamu}} + m_{\text{ércmeddő}} * \text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}}}{m_{\text{ércmeddő}} + m_{\text{homok}} + m_{\text{hamu}}}$$

$$0,35 = \frac{0,7m_{\text{hamu}}}{1\text{kg} + m_{\text{hamu}}} \rightarrow m_{\text{hamu}} = 1\text{kg}$$

Tehát, ha tiszta hematitot kohósítanánk, az ideális, kis olvadáspontú salak létrehozásához 1kg homokhoz 1kg fahamut kellene adni, a homok:fahamu aránya 1:1.

A másik kérdés, hogy mennyi salakképzőt kellene adni az érchez. Ezt már a gyakorlati tapasztalatok döntenek el. Ha az összes meddő anyag aránya nagy a betétanyagokban, akkor a meddő fayalitos salak formájában leköti a vasat, a vas a salakba megy. Ezért a nagyobb vaskihozatal érdekében a lehető legkevesebb salakképzőt kell beadagolni. Ugyanakkor legalább annyi salakra szükség van, amennyi segíti a vasszemcsék összehegedését.

2. Példa:

Tegyük fel, hogy 1kg gyepvasércet kohósítunk, amelynek összetétele:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3\% = 70$$

$$\text{SiO}_2\% = 19,5$$

$$\text{CaO}\% = 10,5$$

Ekkor:

$$m_{\text{ércmeddő}} = m_{\text{érc}} * (\text{CaO}\%_{\text{érc}} + \text{SiO}_2\%_{\text{érc}}) = 1\text{kg} * (0,105 + 0,195) = 0,3\text{kg}$$

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}} = \frac{\text{CaO}\%_{\text{érc}}}{m_{\text{ércmeddő}}} = \frac{0,105}{0,3} = 0,35 \rightarrow \text{kék pont jelöli a diagramban}$$

Ezek szerint már az érc meddőjében éppen megengedhető mennyiségű CaO van. Ha salakképzőt akarnánk adagolni, akkor annak összetétele megegyezne az 1. példában kiszámítottal. Azonban ilyen nagy meddőtartalom mellett nincs szükség hozzáadott salakképzőre, mert csökkenti a vaskihozatal.

3. Példa:

Tegyük fel, hogy 1kg gyepvasércet kohósítunk, amelynek összetétele:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3\% = 80$$

$$\text{SiO}_2\% = 20$$

Ekkor:

$$m_{\text{ércmeddő}} = m_{\text{érc}} * (\text{CaO}\%_{\text{érc}} + \text{SiO}_2\%_{\text{érc}}) = 1\text{kg} * (0 + 0,2) = 0,2\text{kg}$$

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}} = 0 \rightarrow \text{piros pont jelöli a diagramban}$$

Mivel az ércek nagy a SiO₂-tartalma, nem szabad több homokot salakképzőként beadagolni: $m_{\text{homok}} = 0\text{kg}$

Így 1kg gyepvasérchez keverendő fahamu:

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő+homok+hamu}} = \frac{m_{\text{hamu}} * \text{CaO}\%_{\text{hamu}} + m_{\text{ércmeddő}} * \text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}}}{m_{\text{ércmeddő}} + m_{\text{homok}} + m_{\text{hamu}}}$$

$$0,35 = \frac{0,7m_{\text{hamu}}}{0,2\text{kg} + m_{\text{hamu}}} \rightarrow m_{\text{hamu}} = 0,2\text{kg}$$

Felvetődik a kérdés, hogy mekkora SiO_2 -tartalom tekinthető elég nagy ahhoz, hogy salakképzőként homokot ne lehessen beadagolni. Sajnos erre a kérdésre sem adható számszerű válasz, attól függ, mekkora vaskihozatalt szeretnénk elérni. A jó vaskihozatal és a kedvező salakösszetétel között kompromisszumot kell kötni abban az esetben, ha nagy az érc meddőtartalma. Minél nagyobb ugyanis az érc meddőtartalma, annál kevesebb salakképzőt lehet mellé beadagolni, különben csökken a vaskihozatal.

4. Példa:

A 2. és 3. példa két szélsőséges esetet vázolt fel.

Kohósítsuk a petesalmi gyepvasércet. Az elvégzett összetétel-vizsgálatok alapján ennek átlagos pörkölés utáni egyszerűsített (P_2O_5 elhanyagolásával kapott) összetétele:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3\% = 90$$

$$\text{SiO}_2\% = 5$$

$$\text{CaO}\% = 5$$

Ekkor:

$$m_{\text{ércmeddő}} = m_{\text{érc}} * (\text{CaO}\%_{\text{érc}} + \text{SiO}_2\%_{\text{érc}}) = 1\text{kg} * (0,05 + 0,05) = 0,1\text{kg}$$

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}} = \frac{\text{CaO}\%_{\text{érc}}}{m_{\text{ércmeddő}}} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5 \rightarrow \text{zöld pont jelöli a diagramban}$$

Így 1kg homokhoz keverendő fahamu:

$$\text{CaO}\%_{\text{ércmeddő+homok+hamu}} = \frac{m_{\text{hamu}} * \text{CaO}\%_{\text{hamu}} + m_{\text{ércmeddő}} * \text{CaO}\%_{\text{ércmeddő}}}{m_{\text{ércmeddő}} + m_{\text{homok}} + m_{\text{hamu}}}$$

$$0,35 = \frac{0,7m_{\text{hamu}} + 0,1 * 0,5}{0,1 + 1\text{kg} + m_{\text{hamu}}} \rightarrow m_{\text{hamu}} = 0,96\text{kg}$$

Tehát, ha pörkölt petesalmi ércet kohósítunk, akkor az ideális, kis olvadáspontú salak létrehozásához 1kg homokhoz 0,96kg fahamut kellene adni, a homok:fahamu aránya kb. 1:1. Ehelyett a gyakorlatban, hibásan, homokban jóval szegényebb (homok:fahamu=3:5 arányú) salakképző keveréket adagoltam.

7.2. Vaskihozatal

A legnagyobb vaskihozatal a bucakohó metallurgiai folyamatainak ismeretében úgy lenne elérhető, ha a gyepvasérc a bucakohó aknájának középső részén, 800-900°C körüli hőmérsékleten (az így kialakuló $\text{CO}'=0,9-0,95$ mellett) hosszú időn keresztül tartózkodhatna. Így jelentős mennyiségű vas színlődne ki szilárd fázisú redukcióval még azelőtt, hogy a megolvadó salak bevonná a reakciófelületet.

Az aknában kiszínlódó vas mennyiségét, ezáltal a vaskihozatalt befolyásolják:

- a kohó magassága,
- a fűjtetés intenzitása,
- a kohósított ércdarabok mérete,
- az ércben lévő vas mennyisége és a salakba kerülő vas mennyisége.

Kérdés azonban, hogy mennyiben módosítja a keletkező salak vastartalmát, ezáltal összetételét, olvadáspontját, és így kezelhetőségét a kohó aknájában kiszínlódó vas mennyisége. Feltételezem, hogy a vaskihozatal növelése érdekében a salak olvadáspontjának növekedésével, így salakkezelési problémákkal kell szembenézni. Pl. tegyük fel, hogy az összes vas kiszínlódik a bucakohó aknájában. Ekkor a salak csupán a gyepvasérc meddőjéből keletkezhet. Így a salak nagy olvadáspontú lesz és szilárd marad, ezáltal nem lehetséges a kiszínlult vasszemcsék összehegedése, és nem áll össze a tömör vasbuca.

Elméletileg lehetséges lenne kis olvadáspontú salak előállítása úgy is, hogy a salak ne tartalmazzon FeO -ot. Az üveggyártáshoz hasonlóan a gyepvasérc meddőjéhez alkálifém oxidokat (nagy Na_2O és K_2O tartalmú fahamut) keverve lecsökkenthetnénk az így előálló salak olvadáspontját. Ehhez azonban nem mindegy, hogy milyen a meddő összetétele.

Az elmondottak alapján látható, milyen összetett technológiai problémával álltak szemben az őskohászok.

A következőkben optimális technológiai paraméterek mellett egyetlen megváltoztatott paraméter hatását mutatom be a vaskihozatalra.

7.2.1. A bucakohó magasságának hatása a vaskihozatalra

Elfogadható vaskihozatal elérése a kedvező salakösszetétel mellett befolyásolható például a kohó geometriai kialakításával is.

Alacsony kohó:

A túl alacsony kohó hátránya, hogy az akna felső része és a torok túl meleg. Nincs idő a szilárd fázisú redukcióra, mert az érc salakká olvad.

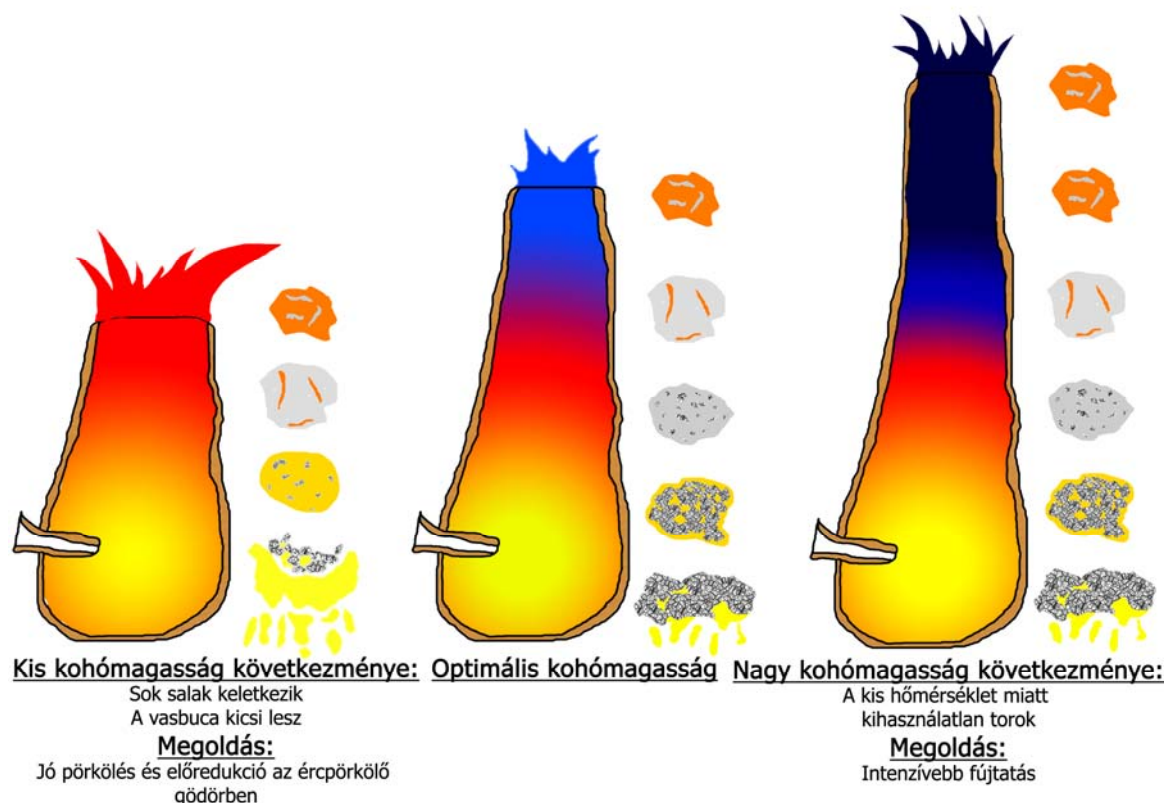
Sok FeO kerül a salakba, így nagy mennyiségű, de könnyen kezelhető salakot kapunk, és kicsi lesz a vasbuca tömege. A túl alacsony kohó vaskihozatala rossz. A vaskihozatal a kohósítandó érc jó pörkölésével növelhető.

Magas kohó:

A túl magas kohó hátránya, hogy az akna felső része és a torok hideg, ezért kihasználatlan marad.

Sok vas színül ki az aknában, de kicsi lesz a salak FeO-tartalma, így nő az olvadáspontja, romlik a salak kezelhetősége. A túl magas kohó tehát nehezen kezelhető salakot ad. A salak összetételének javítása és a jó hőmérséklet-eloszlás kialakítása intenzívebb fűjtatással lehetséges.

A kohó magassága és a vasbuca minősége közötti összefüggést magyarázza a 38. ábra.



38. ábra: A kohó magassága és a vaskihozatal közötti összefüggés

Feltételezem, hogy egy olyan próbakohászat-sorozattal, ahol csak a kohó magassága lenne változó, kimutatható lenne az összefüggés a bucakohó magassága és az előálló salak vastartalma között.

Itt térek ki az imolai típusú (mellfal nélküli) kohó működésére vonatkozó elképzelésre. Ha a bucakohó elég magas (kb. 1,5 méter), akkor már olyan nagy a légnyomáskülönbség a fúvósík és a torok között, hogy ennek hatására a beszívott levegő kellően nagy térfogatáramú lehet ahhoz, hogy a mesterséges fűjtatás elhagyható legyen. Az erős huzat biztosításához legjobb, ha elhagyjuk a mellfalazatot, vagy annak egy részét, amely így a beszívott levegő térfogatáramát nem fojtja le.

Azonban egy ilyen kohóban nem lehet a mesterséges fűjtatás mellett kialakuló medencehőmérsékletet elérni, ezért kellően nem csökken le a salak viszkozitása sem, így nem alakul ki egybefüggő, tömör vasbuca. Ehelyett egy összesült vasas-salakos konkretkezik, amelyből ki kell válogatni a vasas részeket. A darabok ezután egy újraizzító tűzhelyben hegeszthetők össze.

Elképzelhető, hogy az imolai típusú kohó fűjtatás nélkül üzemelt, de ehhez nagyobb magasság volt szükséges. Ilyen „önjáró” kohó volt látható Hollandiában a VII. Iron Smelting Symposium-on.

7.2.2. A fűjtatás intenzitásának hatása a vaskihozatalra

A kedvező salakösszetétel mellett elfogadható vaskihozatal elérése a fűjtatás intenzitásával is befolyásolható.

Gyenge fűjtatás:

Az elégtelen fűjtatás hátránya (a magas kohóhoz hasonlóan), hogy az akna felső része és a torok hideg, ezért kihasználatlan marad.

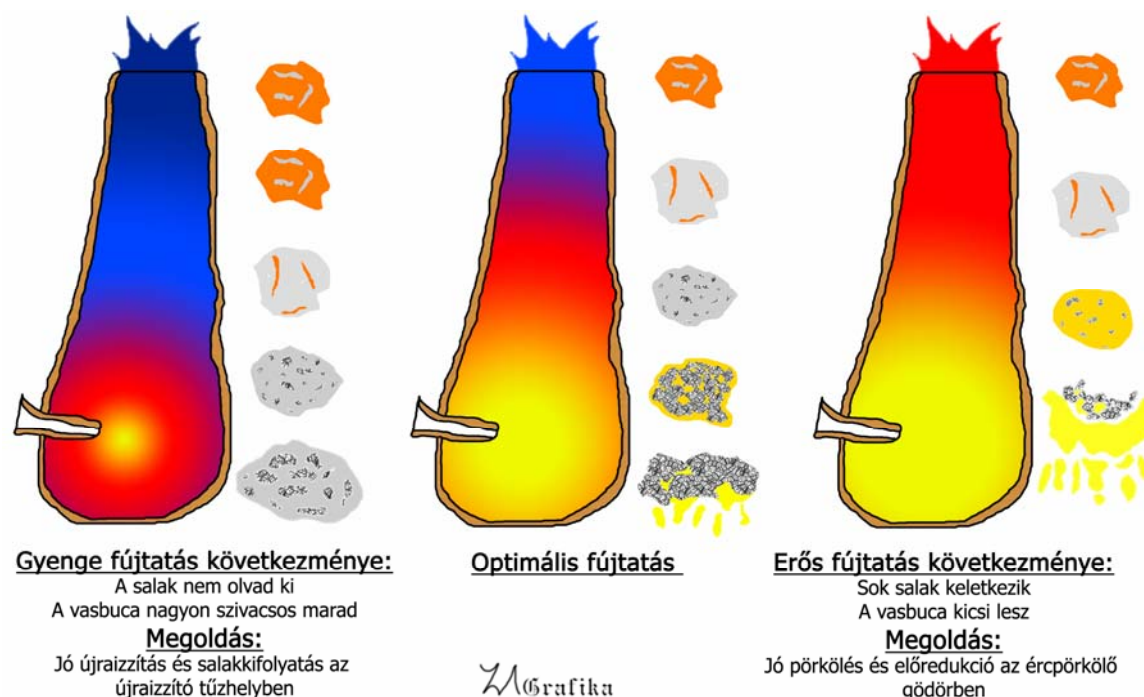
A gyenge fűjtatás következménye nem is annyira a rossz vaskihozatal, hanem a vasbuca túlzottan szivacsos szerkezete, mivel a salak a kis hőmérséklet miatt nem olvad ki. A keletkezett szivacsos vasbucából jó újraizzítással lehet a salakot kifolyatni.

Erős fűjtatás:

A túl erős fűjtatás hátránya (az alacsony kohóhoz hasonlóan), hogy az akna felső része és a torok túl meleg. Nincs idő a szilárd fázisú redukcióra, mert az érc salakká olvad.

Sok FeO kerül a salakba, így nagy mennyiségű, de könnyen kezelhető salakot kapunk, és kicsi lesz a vasbuca tömege. Túl erős fűjtatás mellett a vaskihozatal rossz. A vaskihozatal a kohósítandó érc jó pörkölésével növelhető. Túl erős fűjtatás mellett továbbá a nyersvas keletkezhet (ez a kezdeti próbakohászatok 1000-1500liter/perc-es fűjtatási intenzitása esetén többször megtörtént)

A kohó magassága és a vasbuca minősége közötti összefüggést magyarázza a 39. ábra.



39. ábra: A fűjtatás intenzitása és a vasbuca minősége közötti összefüggés

Az elmondottak alapján érthető, hogy a bucavaskoháshoz nagyon szorosan kapcsolódik az ércpörkölés és az újraizzítás, ezért a vasgyártás mégsem nevezhető egylépcsős vasgyártásnak. A három technológiai lépés megfelelő összehangolása szükséges a nagy vaskihozatal elérése érdekében.

Látni kell továbbá, hogy a három technológiai lépés között nagy átfedés van: lehetséges lenne akár a bucakohó kihagyása is, ha egy nagyon jó ércpörkölés eredményeképpen sok színült vas keletkezne a gypvasércben, az újraizzító tűzhelyben pedig ezek összehegedése történhetne meg.

7.2.3. Az érc aprítási fokának hatása a vaskihozatalra

Minél nagyobb az érc aprítási foka, annál kisebb átmérőjűek a gyepvasércdarabok, amelyeket kohósítunk. A kis átmérőjű ércdaraboknak nagyobb a fajlagos felülete, így a redukció gyorsabb lehet, nagyobb reakciófelületen mehet végbe. Az aprítás fokának növelésével így a vaskihozatal növelhető. Ha pl. homok finomságú ércet kohósítanánk, akkor elhagyható lenne a pörkölés, vagy csökkenthető lenne a kohó magassága. Azonban el kell kerülni a poros frakció kohóba adagolását, mert az a kohó átszellőzőttségét ronthatja.

Korábban megállapítottam (ld. 5.2.3. szakasz), hogy a saját próbakohászatokból származó salakok kisebb vastartalmúak, mint a kora középkori salakok. Ennek egyik oka a korabeli és a rekonstruált kohók magasságában mutatkozó eltérés, a másik ok a kohósított érc aprítási fokában mutatkozó eltérés lehet. Ebből következően a rekonstrukciós kísérletek során a korabelinél valószínűleg jobb volt a vaskihozatal.

7.2.4. A salak és a gyepvasérc összetételének hatása a vaskihozatalra

A kohótelepek feltárásakor rendszerint nagy mennyiségű salakot találnak a régészek, de a kora középkorban nagy értéket képviselő vasbuca csak ritkán került elő. Gyakori kérdés, hogy a megtalált salak mennyisége alapján megbecsülhető-e, mennyi vasat állíthatott elő az adott vasolvasztó műhely? A becslés elvégezhető, ha ismerjük a salakok mennyiségét, a kohósított érc, illetve a salakok vastartalmát.

A számítási módszer kidolgozásához ismét feltételezésekkel kell élni:

1. Ismert kell legyen a salak összes megtalált mennyiségére vonatkoztatott átlagos vastartalma (ez a gyakorlatban nehéz feladat, mert a salakok összetételének szórása nagy, néhány minta vizsgálatából nem vonhatók le következtetések a teljes mennyiségre).
2. Ismert kell legyen a kohósított vasérc átlagos kémiai összetétele (A gyepvasércek összetételére ugyanaz érvényes mint a salakok esetén).

Figyelembe kell venni, hogy az in-situ megtalált salakokban nem csak kétértékű vas található FeO formájában. A salakminták vastartalma két- és háromértékű vasból tevődik össze, Fe^{2+} és Fe^{3+} , ami FeO és Fe_2O_3 formájában jelenik meg (ld. 3. táblázat). A háromértékű vas mennyisége általában kicsi, elhanyagolható.

A salak közvetlenül a kialakulásakor egyáltalán nem tartalmaz háromértékű vasoxidot, a kétértékű vasoxid később oxidálódik vissza háromértékűvé (az évszázadok során vagy a fűvósik oxidatív atmoszféráján).

Az elmondottak alapján a csak kétértékű vasat tartalmazó salak esetén az előállított bucavas tömege az alábbi képlettel számítható ki (saját képlet, a képlet levezetéséről később szó lesz):

$$m_{buc} = Fe\%_{salak} m_{salak} \left(\frac{\frac{1}{\frac{Fe\%_{salak}}{M_{FeO}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}}} - 1}{\frac{1}{\frac{Fe\%_{érc}}{M_{FeO(OH)}} - \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}}} - 1} \right)$$

Ahol:

m_{salak} – salak tömege

$Fe\%_{salak}$ – salak vastartalma

$Fe\%_{érc}$ – érc vastartalma

M_x – moláris tömegek

1. Példa:

Tegyük fel, hogy a régészek a 1000kg salakot találnak egy kohótelep feltárása során. A salak vastartalma 55%. A salak csak kétértékű vasat tartalmaz. A vasérc vastartalma legyen 50,3%.

Salak:

$FeO\% = 70,7$

$SiO_2\% = 29,3$

$\Sigma Fe\% = 55$

A salak összetétele a tiszta fayalit összetételével megegyező.

Érc:

$FeO(OH)\% = 80$

$SiO_2\% = 20$

$\Sigma Fe\% = 50,3$

Az első példa esetén a számítás:

$$m_{buc} = Fe\%_{salak} m_{salak} \left(\frac{\frac{1}{\frac{Fe\%_{salak}}{M_{FeO}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}}} - 1}{\frac{1}{\frac{Fe\%_{érc}}{M_{FeO(OH)}} - \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}}} - 1} \right) = 0,55 * 1000 \left(\frac{\frac{1}{\frac{0,55}{56}} - \frac{72}{56}}{\frac{1}{\frac{0,503}{56}} - \frac{89}{56}} - 1 \right) = 185kg$$

A kohótelep által előállított vas mennyiségét számítsuk ki gondolatban a következő lépésekkel:

1000kg fayalitos salakban a meddő SiO_2 tömege kb. 293kg, az FeO tömege 707kg. Ennyi meddő 1457kg vasércben van. A 1457kg vasércben 1165kg goethit van, ebből redukció után 942kg FeO keletkezik. Ebből 707kg FeO salakba kerül, 235kg FeO tovább redukálódik. Így 183kg vas keletkezik. Tehát a kohótelepen 183kg vasat állítottak elő

A képlet a fenti gondolatmenetből származik egyszerűsítések után.

2. példa:

Tegyük fel, hogy a régészek 1000kg salakot találnak egy kohótelep feltárása során. A salak vastartalma 45%. A salak csak kétértékű vasat tartalmaz. A vasérc vastartalma 50,3%.

In-situ salak:

$$\text{FeO}\% = 57,86$$

$$\text{SiO}_2\% = 42,14$$

$$\Sigma\text{Fe}\% = 45$$

Érc:

$$\text{FeO(OH)}\% = 80$$

$$\text{SiO}_2\% = 20$$

$$\Sigma\text{Fe}\% = 50,3$$

Az első példa esetén a számítás:

$$m_{\text{bucsa}} = \text{Fe}\%_{\text{salak}} m_{\text{salak}} \left(\frac{\frac{1}{\text{Fe}\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{\text{FeO}}}{M_{\text{Fe}}}}{\frac{1}{\text{Fe}\%_{\text{érc}}} - \frac{M_{\text{FeO(OH)}}}{M_{\text{Fe}}}} - 1 \right) = 0,45 * 1000 \left(\frac{\frac{1}{0,45} - \frac{72}{56}}{\frac{1}{0,503} - \frac{89}{56}} - 1 \right) = 607\text{kg}$$

A kohótelep által előállított vas mennyiségét számítsuk ki gondolatban a következő lépésekkel:

1000kg salakban a meddő SiO_2 tömege 421kg, az FeO tömege 579kg. Ennyi meddő 2105kg vasércben van. A 2105kg vasércben 1684kg goethit van, ebből redukció után 1362kg FeO keletkezik. Ebből 579kg FeO salakba kerül, 783kg FeO tovább redukálódik. Így 609kg vas keletkezik. Tehát a kohótelepen 609kg vasat állítottak elő.

Az 1. és a 2. példa eredményeinek összehasonlításából látható, hogy ha a salakba kevesebb vas kerül (55% helyett 45%), akkor jelentősen javul a vaskihozatal (185kg helyett 607kg).

3. példa:

Tegyük fel, hogy a régészek 1000kg salakot találnak egy kohótelep feltárása során. A salakok átlagos vastartalma 45%, ugyanúgy, mint az 1. példában, de most ennek teljes mennyisége háromértékű vas (ez a gyakorlatban természetesen nem lehetséges). A vasérc vastartalma ismét legyen 50,3%. A salak háromértékű vastartalma eredetileg (a salak keletkezésekor) szintén kétértékű volt, csak a visszaoxidálódás miatt lett háromértékű. Ezért, ha nagyon pontosak akarunk lenni, a számítás során ezt figyelembe kell venni.

In-situ salak:

$Fe_2O_3\% = 64,29$ amely a salak keletkezésekor $FeO\% = 57,86$ volt

$SiO_2\% = 35,71$

$\Sigma Fe\% = 45$

A salak eredeti összetétele így 100%-ra számítva:

Eredeti salak:

$FeO\% = 61,84$

$SiO_2\% = 38,16$

$\Sigma Fe\% = 48,1$

A salak tömege a kialakuláskor valójában nem 1000kg volt, hanem ennél kevesebb:

$$m_{salak} = m_{salak} - \left(1 - \frac{M_{FeO}}{\frac{M_{Fe_2O_3}}{2}} \right) * Fe_2O_3\%_{salak} * m_{salak} = 1000 - 0,1 * 0,6429 * 1000 = 935,7kg$$

Érc:

$FeO(OH)\% = 80$

$SiO_2\% = 20$

$\Sigma Fe\% = 50,3$

A képletet használva, $m_{salak} = 935,7kg$ -mal és az eredeti salakösszetétellel számolva meghatározható a kohótelepen előállított vas mennyisége:

$$m_{buca} = Fe\%_{salak} m_{salak} \left(\frac{\frac{1}{Fe\%_{salak}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}}}{\frac{1}{Fe\%_{érc}} - \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}}} - 1 \right) = 0,481 * 935,7 \left(\frac{\frac{1}{0,481} - \frac{72}{56}}{\frac{1}{0,503} - \frac{89}{56}} - 1 \right) = 445,2kg$$

Szövegesen: Az eredetileg 935,7kg tömegű salakban a meddő SiO_2 tömege 357,1kg, az FeO tömege 578,6kg. Ennyi meddő 1785,5kg vasércben van. A 1785,5kg vasércben 1428,4kg goethit van, ebből redukció után 1155,6g FeO keletkezik. Ebből 578,6kg FeO

salakba kerül, 577kg FeO tovább redukálódik. Így 448,7kg vas keletkezik. Tehát a kohótelepen 448,7kg vasat állítottak elő.

4. példa:

Tegyük fel, hogy a régészek 1000kg salakot találnak egy kohótelep feltárása során. A salakok átlagos vastartalma 45%, ugyanúgy, mint az 1. példában, de most ebből 30% Fe^{2+} és 15% Fe^{3+} (ilyen salakminták gyakran kerülnek elő régészeti feltárásokon is). A vasérc vastartalma ismét legyen 50,3%. A számítás menete a 2. példában bemutatotthoz hasonló.

In-situ salak:

$$FeO\% = 38,6$$

$$Fe_2O_3\% = 21,4 \text{ amely a salak keletkezésekor } FeO\% = 19,26 \text{ volt}$$

Tehát a salak kialakulásakor $FeO\% = 57,86$ volt.

$$SiO_2\% = 40$$

$$\Sigma Fe\% = 45$$

A salak eredeti összetétele így 100%-ra számítva:

Eredeti salak:

$$FeO\% = 59,13$$

$$SiO_2\% = 40,87$$

$$\Sigma Fe\% = 46$$

A salak tömege a kialakuláskor valójában nem 1000kg volt, hanem ennél kevesebb:

$$m_{salak} = m_{salak} - \left(1 - \frac{M_{FeO}}{\frac{M_{Fe_2O_3}}{2}} \right) * Fe_2O_3\%_{salak} * m_{salak} = 1000 - 0,1 * 0,214 * 1000 = 978,6kg$$

Érc:

$$FeO(OH)\% = 80$$

$$SiO_2\% = 20$$

$$\Sigma Fe\% = 50,3$$

A képletet használva, $m_{salak} = 978,6kg$ -mal számolva meghatározható a kohótelepen előállított vas mennyisége:

$$m_{buca} = Fe\%_{salak} m_{salak} \left(\frac{\frac{1}{Fe\%_{salak}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}}}{\frac{1}{Fe\%_{érc}} - \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}}} - 1 \right) = 0,46 * 978,6 \left(\frac{\frac{1}{0,46} - \frac{72}{56}}{\frac{1}{0,503} - \frac{89}{56}} - 1 \right) = 552,5kg$$

Szövegesen: Az eredetileg 978,6kg tömegű salakban a meddő SiO_2 tömege 400kg, az FeO tömege 578,6kg. Ennyi meddő 2000kg vasércben van. A 2000kg vasércben 1600kg goethit van, ebből redukció után 1294kg FeO keletkezik. Ebből 578,6kg FeO salakba kerül, 715,4kg FeO tovább redukálódik. Így 556,4kg vas keletkezik. Tehát a kohótelepen 556,4kg vasat állítottak elő.

Ha elhanyagolással éltünk volna, és nem vettük volna figyelembe, hogy a salak vastartalmát háromértékű vas is alkotja, a számítást $m_{\text{salak}} = 1000\text{kg}$ -mal és az in-situ salak vastartalmával ($\Sigma\text{Fe}\% = 45$) végeztük volna, akkor a kohótelepen előállított vas mennyisége:

$$m_{\text{buca}} = \text{Fe}\%_{\text{salak}} m_{\text{salak}} \left(\frac{\frac{1}{\text{Fe}\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{\text{FeO}}}{M_{\text{Fe}}}}{\frac{1}{\text{Fe}\%_{\text{érc}}} - \frac{M_{\text{FeO(OH)}}}{M_{\text{Fe}}}} - 1 \right) = 0,45 * 1000 \left(\frac{\frac{1}{0,45} - \frac{72}{56}}{\frac{1}{0,503} - \frac{89}{56}} - 1 \right) = 607\text{kg}.$$

A háromértékű vas elhanyagolásából adódó eltérés ennél a példánál már jelentős.

A vaskihozattal áll kapcsolatban egy másik gyakran felvetődő, az ércek kohósíthatóságára vonatkozó kérdés. Vajon mekkora vastartalmú ércet lehet elméletileg eredményesen kohósítani, azaz úgy, hogy vasbuca is keletkezzen, és ne a salakba kerüljön az érc teljes vastartalma?

Ez a keletkező salak vastartalmától függ. Ha vállaljuk, hogy kis vastartalmú, nehezen kezelhető salak keletkezik a kohóban, akkor jóval kisebb vastartalmú ércek is kohósíthatók. A salak vastartalmának függvényében az érc minimális vastartalma a következő képlettel határozható meg (saját képlet, az előzőekben használt képletből átrendezéssel és egyszerűsítéssel adódik, annak a peremfeltételnek a figyelembevételével, hogy a kohósított ércből redukcióval keletkező FeO teljes mennyisége a salakba kerül):

$$\text{Fe}\%_{\text{érc}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\text{Fe}\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{\text{FeO}}}{M_{\text{Fe}}} + \frac{M_{\text{FeO(OH)}}}{M_{\text{Fe}}} \right)}$$

1. Példa:

Tegyük fel, hogy jól kezelhető, tisztán fayalitos salakot szeretnénk kapni. Ennek vastartalma 55%. Milyen vastartalmú (goetites) ércet kell kohósítani ahhoz, hogy vasbucát kapjunk?

$$Fe\%_{\text{érc}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Fe\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}} + \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,55} - \frac{72}{56} + \frac{89}{56} \right)} = 0,471$$

Tehát elméletileg legalább 47,1% vastartalom mellett lesz eredményes a kohászat.

2. Példa:

Tegyük fel, hogy a salak vastartalma 45% lehet. Milyen vastartalmú (goetites) ércet kell kohósítani ahhoz, hogy vasbucát kapjunk?

$$Fe\%_{\text{érc}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Fe\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}} + \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,45} - \frac{72}{56} + \frac{89}{56} \right)} = 0,396$$

Tehát elméletileg legalább 39,6% vastartalom mellett lesz eredményes a kohászat.

3. Példa:

A régészeti feltárásokon általában kb. 35% vastartalmú salakok kerülnek elő (ld. 3. táblázat). Az adatok alapján vajon milyen vastartalmú ércet kohósított még eredményesen az őskohász?

$$Fe\%_{\text{érc}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Fe\%_{\text{salak}}} - \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}} + \frac{M_{FeO(OH)}}{M_{Fe}} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,35} - \frac{72}{56} + \frac{89}{56} \right)} = 0,316$$

Tehát elméletileg nagyon kis, kb. 30% vastartalmú ércekből is elő tudhatott állítani vasbucát az őskohász, de ilyen rossz minőségű érceknél már csak kis vaskihozatal volt elérhető.

8. A BUCAVASKOHÁSZATI TECHNOLÓGIA MODERN KORI ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

A vasgyártás mai hagyományos módja a kétlépcsős, ún. indirekt módszer. A vasércet agglomeréálják (pelletezéssel vagy zsugorító pörköléssel), kokszot állítanak elő kőszén száraz lepárlásával, majd ezt a két betétanyagot salakképzők (CaO , MgO , CaCO_3) hozzáadása mellett a nagyolvasztóba adagolják. A nagyolvasztóból közel eutektikus összetételű nyersvasat csapolnak, amelynek karbontartalmát az acélgyártási folyamat során oxigén befúvásával csökkentik le. A mai hagyományos vasgyártásnak számos hátránya van:

- nagy beruházási költség;
- speciális betétanyag előkészítő műveletek;
- kb. 1millió tonna/éves termelés alatt egy integrált acélmű (zsugorító üzemek, pelletező üzem, kokszoló üzemek, nagyolvasztók, illetve konverterek) nem versenyképes;
- a technológia környezetszennyező és energiapazarló.

Egy alternatív vasgyártási módszer a vasszivacs gyártás, amely az ősi direkt módszerű vaselőállítás közvetlen leszármazottjának tekinthető. A vasszivacs (Direct Reduced Iron – DRI) gyártás során a vasércet redukáló atmoszférában tartják, kb. $800\text{--}1050^\circ\text{C}$ hőmérsékleten. A vasszivacsgyártás szén vagy földgáz alapú technológiával is működhet. A földgáz alapú technológia esetén a metánból Fischer-Tropsch szintézissel állítanak elő CO -t és H_2 -t, amely a redukatív atmoszférát biztosítja a vasszivacsgyártás során. A vasszivacs gyártó üzemek beruházási és működtetési költségei az integrált acélművekkel szemben alacsonyak, így a technológia számos fejlődő ország számára előnyösebb lehet, főleg ahol a koksz korlátozott mennyiségben áll rendelkezésre. További előnye az energiahatékonyság, amelyet a kis kohászati hőmérséklet biztosít. Ezek mellett számos más tényező, kapcsolódó technológia teszi gazdaságossá a vasszivacsgyártást (pl. Ausztráliában közvetlenül földgázlelőhely mellé telepítették az üzemeket) (Midres – Word direct reduction statistics, 2009).

Hogyan lehetne a kora középkori bucavaskohászat technológiája során megismerteket a modern ipar számára is hasznossá tenni? A kohómodell kísérletek előkísérletekként szolgálhatnak egy lehetséges technológia kidolgozásához. A következőkben egy lehetséges alternatív vasgyártási technológiát vázlok fel.

Első lépésben a kohósítandó érc fajlagos felületét aprítással, esetleg előpörköléssel meg kellene növelni (ez a technológiai lépés az érc aprítását és ércpörkölő gödörben történő pörkölését helyettesítené). Mint az a kohómodell-kísérletekből kiderült nagy fajlagos felület mellett az indirekt vagy CO közvetítéssel a direkt redukció a rendelkezésre álló nagy reakciófelületen gyorsan végbemegy.

Az apró szemű ércet ezután egy fűtött, nagy CO-tartalmú, redukzív atmoszférájú aknába kellene helyezni, ahol egyenletesen haladna az akna végéig (ez a technológiai lépés a bucakohászatot helyettesítené). Mire az érc az akna végére ér, a vasoxid tartalmának jelentős része fémes vassá alakul, ennek időigénye a modell kísérletek alapján az érc porozitásától, vagy az aprított érc szemcseméretétől függne. A színvassá történő redukcióhoz akár néhányszor tíz perc is elegendő lehet. A színült szilárd halmazállapotú vasszemcsék jelentős felszenülése ilyen rövid idő alatt ilyen kis kohászati hőmérsékleten nem történne meg ugyanúgy, mint ahogyan a vasbucakohászatnál sincs erre lehetőség. Tehát az akna végén színült vasszemcsékkel teli érdarabokat kapnánk, amelyekben az érc eredeti vastartalmától függően még több-kevesebb szilárd meddő található (ld. kohómodell kísérletek metallográfiai csiszolatai).

A következő lépésben a színült vasszemcsék kiválogatása, a meddő eltávolítása következne (ez helyettesítené az újraizzító tűzhelyt). Ez történhetne akár átolvasztással is, amelynek során a meddő is megolvadna és salakként elválasztható lenne. Azonban energiatakarékosabb megoldás lenne az őrlés. Az őrlés után akár mágnessel is kiválogathatók a színült vasszemcsék. Az összegyűjtött vasszemcséket ezután porkohászati eljárással formázhatnánk tömbi vassá. A porkohászat során lehetőség lenne mechanikus ötvözésre is.

A nyersvasgyártást követő acélgyártás során minél kisebb karbontartalmú acélt akarnak előállítani, annál nagyobbak a költségek. A vázolt technológia során egyszer sem lépnénk át a vas olvadáspontját, az előállított vas karbontartalma nagyon kicsi lenne. Ezt a tulajdonságát az elektrotechnikában lehetne hasznosítani.

9. ÖSSZEGZÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az elvégzett munka eredményeképpen következtetések vonhatók le, illetve ezek alapján célkitűzések tehetők a jövőbeli kutatásokra vonatkozóan:

1. Korhű módszerekkel rekonstrukciós kísérleteket végeztem: iparrégészeti leletek alapján rekonstruált, fajszi típusú beépített kohóban, rekonstruált fűjtatóreplikával és szerszámokkal, illetve az őskohász számára is fellelhető vasércekkel. A felülről a bucakohó torkába adagolt faszén és gypevasérc rétegek folyamatos süllyedése és utánpótlása egyenletes kohójárat mellett biztosítja a vasbuca kialakulását a medence alján.

A jövőben szabadon álló kohótípusokban is próbakohászatiakat kellene végezni.

2. A fanciesikái gypevasérc-lelőhelyen található érc kohósításával nyert vasbucák kovácsolás közben törékenynek bizonyultak. A petesalmi gypevasércből már kovácsolható vasbucákat lehetett előállítani, de az ezekből elkészült vastárgyak szobahőmérsékleten ridegek voltak.
3. Az anyagvizsgálatok eredményei alapján megállapítható volt, hogy a salakok, a kohósított gypevasércek és a kapott vasbucák kémiai összetétele is kissé eltér a kora középkoriaktól.

- A gypevasércek foszfortartalma nagyobb volt, mint a korabeli ércéké, ezért újabb terepbejárások során foszforban szegényebb gypevasérceket kellene keresni.
- A vasbucák karbontartalma nagyon kicsi, foszfortartalmuk viszont nagy volt. A rekonstrukciós kísérletek során nyert vasbucák törékenységének oka, hogy a gypevasércek foszfortartalma a kohászat során a vasba kerül. A foszfor 1048°C olvadáspontú vas-vasfoszfid eutektikumot képez a vassal. Ha az eutektikum megjelenik, akkor a vasbuca kovácsolás közben törékeny lesz. Ha a foszfor csak szilárd oldatot képez a vassal, akkor a vasbuca kovácsolható lesz, de szobahőmérsékleten a vasanyag ridegsége tapasztalható.

A jövőben meg kellene próbálkozni a vasbucák karbontartalmának növelésével és a foszfortartalmuk csökkentésével. Emellett meg kellene vizsgálni, hogy mekkora problémát jelenthetett az őskohászok számára a gypevasércekből a vasbucába kerülő foszfor.

- A rekonstrukciós kísérletek során kapott salakok kisebb vastartalmának oka a jobb vaskihozatal volt, amelynek következtében a salakba kevesebb vas került.

A jövőben a salakminták pontosabb vegyelemzéses vizsgálata szükséges, illetve több salakminta SEM EXAD vizsgálatával a salakok mikroszerkezetének jobb megismerése válna lehetővé

4. A rekonstrukciós kísérletek során elvégzett mérések (hőmérséklet, gázösszetétel, elegyoszlop süllyedési sebessége) eredményei alapján laboratóriumi körülmények között kohómodell-kísérleteket lehetett végezni. Az ezekből levonható legfontosabb következtetés, hogy a vas a gypvasércből szilárd fázisú redukcióval kb. 800-900°C-on már nagy mennyiségben kiszínül.

A jövőben a bucakohóban lezajló folyamatok modellezésére elvégzett kísérletet ki kell egészíteni a medencében lezajló folyamatok modellezésével.

5. A rekonstrukciós kísérletek, az anyagvizsgálatok és mérések, valamint a kohómodell-kísérletek eredményeinek összegzésével felvázolható a bucakohászat metallurgiája. Ezek szerint a torokban és az aknában a szilárd gypvasérc és a bucakohó atmoszférájának határfelületén indirekt és a CO közvetítéssel direkt redukció megy végbe. Ennek eredményeként kiszínülő vasszemcsék az akna alsó részén és a medencében kialakuló olvadt salakban összehegednek, így építve fel fokozatosan a vashucát.

A jövőben tisztázni kellene a gypvasérc porozitásának reakciókinetikai szerepét. Meg kellene vizsgálni, hogy az olvadt salak fázisból pontosan milyen módon színül ki a vas.

6. A vashucakohászati technológiára vonatkozóan megállapítottam, hogy a technológiai paramétereknek optimuma van mind a vaskihozatal, mind pedig a salak kezelhetősége függvényében. Az ideális technológiai paraméterek értékére vonatkozóan pontos adatokat szolgáltatni igen nehéz, ezért legtöbbször csak „ökölszabályokat” fogalmaztam meg. A technológiával kapcsolatosan választ adtam néhány ipartörténeti szempontból lényeges kérdésre: milyen vaskihozatazt érhettek el az őskohászok, milyen érceket kohósíthattak eredményesen és adagolhattak-e a bucakohóba salakképzőket.

A jövőben próbakohászat-sorozatokkal lehetne tisztázni az egyes technológiai paraméterek hatását a vaskihozatalra.

7. Végül bemutattam egy lehetséges modernkori alkalmazását a kora középkori vashucakohászati technológiának.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Munkámat nagyon sokan segítették, nekik ezúton mondok köszönetet:

Dr. Bán Krisztián, egyetemi adjunktus, BME: Konzulensi munkájáért és számos próbakohászaton való tevékeny részvételéért.

Dr. Török Béla, Egyetemi docens, ZMNE, ME: Konzulensi munkájáért, vegyelemzésekért és gázösszetétel-mérésekért.

Dr. Gömöri János, régész, MTA Iparrégészeti Munkabizottságnak elnöke: Tanácsaiért és az újmassai kísérleti régészeti táborban végzett táborvezetői munkájáért.

Porkoláb László, Országos Műszaki Múzeum Kohászati Múzeumának igazgatója: A 24. próbakohászat IV. Fazola-napokon való lebonyolításában nyújtott segítségért.

Gulya István és Ágoston Katalin, Országos Műszaki Múzeum Kohászati Múzeumának munkatársai: A 21-23. próbakohászatok újmassai kísérleti régészeti táboron belüli lebonyolításában való segítségért.

Farkas Gábor, a próbakohászatoknak helyet adó földterület tulajdonosa: 2003 óta tartó munkáimhoz a tanya területének rendelkezésemre bocsátásáért.

Győri Imre, MAGYARMET Finomöntőde Bt. ügyvezető igazgatója: Összsugárzásmérő pirométer rendelkezésemre bocsátásáért.

Szűcs Sándor, MAGYARMET Finomöntőde Bt. munkatársa: Vegyelemzésekért.

Dr. Fehér András, nyugdíjas főiskolai tanár, DUF: Vegyelemzésekért és gyakorlati tanácsaiért.

Dr. Grega Oszkár, egyetemi docens, ME: Vegyelemzésekért.

Sajó István, MTA Kémiai Kutatóintézetének munkatársa: Röntgendiffrakciós vizsgálatokért és gyakorlati tanácsaiért.

Portkó Mihály, BME ATT munkatársa: EDAX vizsgálatokért.

Gallina Zsolt, régész, Ásatárs Kft. ügyvezető igazgatója: Tanácsaiért.

Baranyai Viktor Zsolt: Gázösszetétel-mérésekért.

A dolgozat DVD mellékletén látható film és az újmassai kísérleti régészeti tábor az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósult meg az „Iskola a múzeumban” projekt (TÁMOP-3.2.8/08/B) keretei között.



Nemzeti Fejlesztési Ügynökség

ÚMFT infóvonal: 06 40 638 638
nfu@nfu.gov.hu • www.nfu.hu



IRODALOMJEGYZÉK

- AGRICOLA G.: *Tizenkét könyv a bányászatról és kohásatról*, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1985.
- ASM International: *Binary Phase Diagrams* (Second edition)
- BAUERMEISTER J.: *Archäometallurgische Untersuchung von Eisenschlacken aus Holtland / Kreis Leer*, Arbeit zur Erlangung des Bachelor of Science im Studiengang Geowissenschaften, Göttingen, 2005.
- ELIADE M.: *Kovácsok és alkimisták*, Cartaphilus Kiadó, Bp. 2004.
- FARKAS O.: *Nyersvasmetallurgia*, Tankönyvkiadó, Bp. 1989.
- FÜLEKY Gy.: *Geofizikai körfolyamatok* (környezetmérnök MSC-s hallgatók részére), Gödöllő, 2009.
- GALLINA ZS.: 2006. *Avar kori kohótelep Kaposvár-Fészerlakon*; Előzetes jelentés a Kaposvárt elkerülő 61-es számú főút 19. lelőhelyének feltárásáról, Somogy Megyei Múzeumok Közleményei 15. Kaposvár.
- GÖMÖRI J, TÖRÖK B.: *Technical examination of the early medieval ferrous metallurgical finds from Hungarian sites*, Archeometry 98, Proceedings of the 31st Symposium Budapest, April 26-May 3, 1998.
- GÖMÖRI J.: *Az Avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában*, Sopron, 2000, Kiadja a Soproni Múzeum Régészeti Gyűjteménye és az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága
- HECKENAST G. – NOVÁKI GY. – VASTAGH G. – ZOLTAY E: *A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban* (A honfoglalástól a XIII. század közepéig), Akadémia Kiadó, Bp. 1968.68.
- HECKENAST G.: *A Magyarországi vaskohászat története a feudalizmus korában*, Akadémia Kiadó, Bp. 1991.
- JOHANNSEN O.: *Geschichte des Eisens*, Düsseldorf, 1953.
- KERPELY A.: *Adatok a vas történetéhez Magyarországon*, Bp. 1898.
- KRONZ A.: *Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen - Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken*. Dissertation, 1997.
- KANÁSZ T.: *A bucavas gyártására irányuló kísérletek és azok eredményeinek ismertetése*, TDK dolgozat, Miskolci Egyetem, 2005.
- KOVÁCS K.: *Korrózióvédelem*, Bp. 1969, Kiadó: ÉGSZI
- Midrex – *Word direct reduction statistics*, 2009
- NÉMETH M.: *A fahulladékok energetikai hasznosításának bemutatása a HALEX 25 típusú aprítékégető berendezésen keresztül*, szakdolgozat, PTE, 2006.
- REYNOLDS S. T.: *Az ipari forradalom középkori gyökerei*, Tudomány 1985/2.
- THIELE Á.: *A bucavas kora középkori előállításának korhű gyártástechnológiája a korszerű anyagtudomány tükrében*, TDK dolgozat, BME, 2009/1.
- THIELE Á.: *Az ősi vasiparhoz kapcsolódó hiedelmek*, Vallás és ember tantárgy féléves dolgozata, 2009/2.
- THIELE Á.: *A földtől a vastárgyig – a vasbucakohászat kora középkori technológiája*, TDK dolgozat, BME, 2010.
- TÖRÖK B.: *A direkt acélgyártási eljárás metallurgiai jellemzőinek vizsgálata a szakirodalom alapján*, Diplomaterv, ME, vaskohászati tanszék, 1993.
- TÖRÖK B.: *Chemical and metallographic analysis of iron ores and slags*, Študijské Zvesti Archeologického Ústavu Sav, 31, 1995.
- TÖRÖK B.: *A vasércről a vastárgyig tartó korabeli folyamatokról általában, egyetemi segédlet*, ME, 2001.

- TÖRÖK B.: *A Magyar Királyság vaskohászata a Rákóczi-szabadságharc előestélyén és idején*, Egyetemi oktatási segédanyag, ME, 2002.
- VERŐ J. - KÁLDOR M.: *Fémtan*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Bp. 1977.
- VERŐ J.: *Vasötvözetek fémtana*, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1987.
- VIDOVSKI I.: *A XVIII-XIX. században kézműves technológiával készített kovácsoltvas épületszerkezeti elemek vizsgálata*, Disszertáció, BME, 2007.
- WOLF G.: *Bau eines rennoffens und Verhütten von Eisenerz*, Göttingen, 1971.