



BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM

Közlekedésmérnöki Kar
Járműgyártás és -javítás Tanszék

**A bucavas koraközépkori előállításának korhű
gyártástechnológiája a korszerű anyagtudomány tükrében**

Szerző:

Thiele Ádám

BME Közlekedésmérnöki Kar,
Járműgyártás és -javítás Tanszék

Konzulens:

Bán Krisztián

Egyetemi adjunktus
BME Közlekedésmérnöki Kar,
Járműgyártás és -javítás Tanszék

Tudományos diákköri dolgozat
Közlekedésmérnöki Kar, Anyagtudomány szekció

Budapest, 2009. november 4.

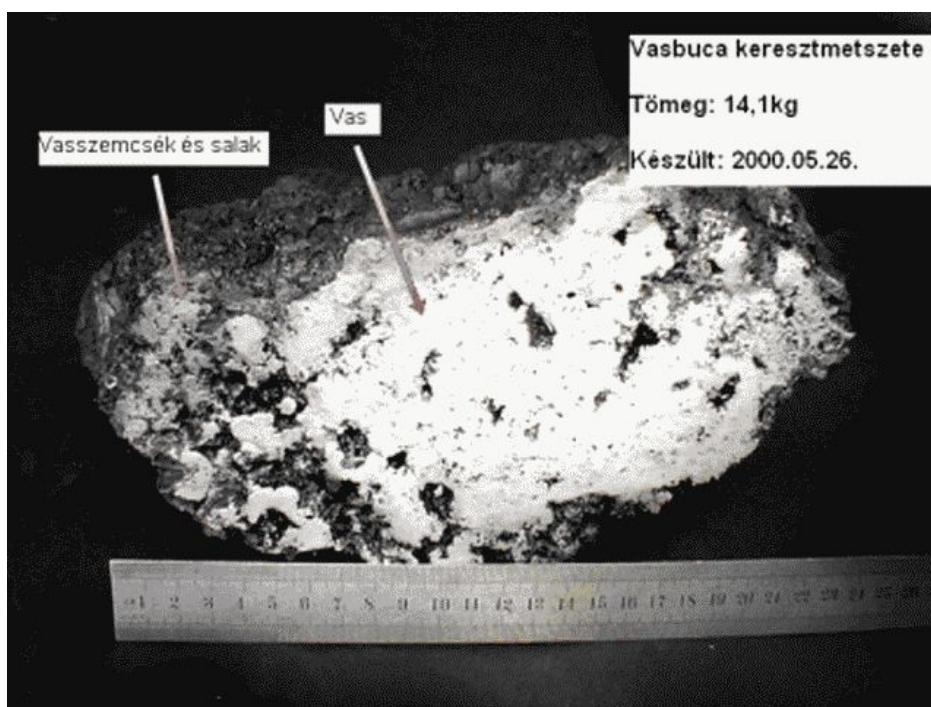
TARTALOMJEGYZÉK

I. BEVEZETÉS	3
II. IRODALOMKUTATÁS	6
II.1. A vasgyártás történeti áttekintése	6
II.1.1. Kovácsolt vastárgyak vasmeteorból	6
II.1.2. A vasgyártás kezdetei, direkt vasgyártás	7
II.1.2.1. Olvasztógödör	7
II.1.2.2. Olvasztópáholy	8
II.1.2.3. Az első bucakohók	9
II.1.3. Vasgyártás az indirekt és a direkt eljárás határán	10
II.1.4. Indirekt vasgyártás	12
II.2. A bucakemece működése	13
II.2.1. A bucavasgyártás alapanyagai	13
II.2.2. A bucavasgyártás során lejátszódó folyamatok	15
II.2.2.1. Reduciók folyamatok a bucakemencében	15
II.2.2.2. A bucaeljárás salakjának bemutatása	16
II.3. Bucavasgyártás napjainkban	18
II.3.1. Próbaolvasztások Magyarországon és külföldön	18
II.3.2. Természeti népek modern kori bucavasgyártása	21
III. CÉLKITŰZÉSEK	22
IV. A BUCAVAS ELŐÁLLÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIAI LÉPÉSEI A MEGVALÓSÍTÁS TÜKRÉBEN	23
IV.1. Ércbányászat	23
IV.1.1. Vaskörforgás a természetben	23
IV.1.2. Gyepvasérc lelőhelyek	24
IV.2. Az érc dúsítása	27
IV.3. Faszénégetés	28
IV.4. Fűjtató készítés	28
IV.5. Kohóépítés, fúvókakészítés	29
IV.6. A próbaolvasztások	31
IV.6.1. A próbaolvasztások bemutatása	31
IV.6.2. Egy ideális kohászat menete	35
IV.7. A bucavas feldolgozása	38
V. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK	39
V.1. Gyepvasérc- és salakminták vizsgálata	39
V.2. Vasrögök és vasbuca metallográfiai vizsgálata	40
V.2.1. A 4. próbaolvasztásból származó vasgolyó metallográfiai vizsgálata	40
V.2.2. A 6. próbaolvasztás vasbucadarabjának metallográfiai vizsgálata	41
V.2.3. További vasrögök metallográfiai vizsgálata	42
VI. A DIREKT VASGYÁRTÁS SORÁN LEJÁTSZÓDÓ TERMODINAMIKAI ÉS KINETIKAI FOLYAMATOK ÉRTELMEZÉSE	44
VI.1. Folyékony salakfázisban kiváló vasgolyók	44
VI.2. A vasgolyók felszenülése	46
VI.3. A vasbuca kialakulása vasgolyókból	48
VII. ÖSSZEGZÉS, EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, TOVÁBBI CÉLKITŰZÉSEK	49
VIII. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	49
IX. IRODALOMJEGYZÉK	51

I. 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 technikatörténeti, 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 anyagát. A hadtörténeti vonatkozások a koraközépkori fegyverek kontextusában szintén egyértelműek. A honfoglalás előtti magyar katonai erő létszáma 20 ezer fő körül lehetett.¹ Ha katonánként 1 kg vassal számolunk (nyílhegyek, szabja, fokos, lőszerszámok), akkor az említett sereg felfegyverzése 20 tonna vasat igényelt.

Ha a koraközépkori vasgyártásról beszélünk, akkor ez alatt bucavasgyártást kell érteni.² A *bucavas* szivacsos szerkezetű salakos vas, vagy ahogyan később erről még szó lesz, vasas salak, amelyet kis, szakaszos üzemű, faszén tüzelésű kohókban állítottak elő. Egy szerkezetében tipikus³ vascát láthatunk az 1. ábrán⁴, ahol jól megfigyelhető a szivacsos, salakos szerkezet, illetve a salakos vas vasas salakba való átmenete.



1. ábra: Egy tipikus vasbuca keresztmetszete napjainkból

A kezdetleges körülmények között a vas megolvasztásához szükséges nagy hőmérséklet elérése nem volt lehetséges, így az mindvégig szilárd állapotban maradt. Az olvadt állapot kisebb hőmérséklet mellett is létrejöhetett volna elegendően hosszú hűtési idő mellett (nagy mértékű felszenülés, ld. vas-karbon állapotára), azonban a korabeli technológia ezt nem biztosította. A vas előállításának ez a módja az ún. *direkt vasgyártás*, mert az ércből közvetlenül nyerték az acélt (kovácsvasat⁵), nem pedig a mai ismert indirekt módon nyersvasból. A bucavas gyártáshoz jellemzően *barnavasércet* (*limonitot*)

¹ Gömöri János: Óskohómúzeum Somogyfajszon

(<http://www.hermes.btk.pte.hu/letoltes/sfajsz/sfajszweb/www.znet.hu/somogyfajsz/koho.htm>)

² Magyarországon az egész középkor folyamán szinte egyeduralkodó maradt a bucavasgyártás technológiája

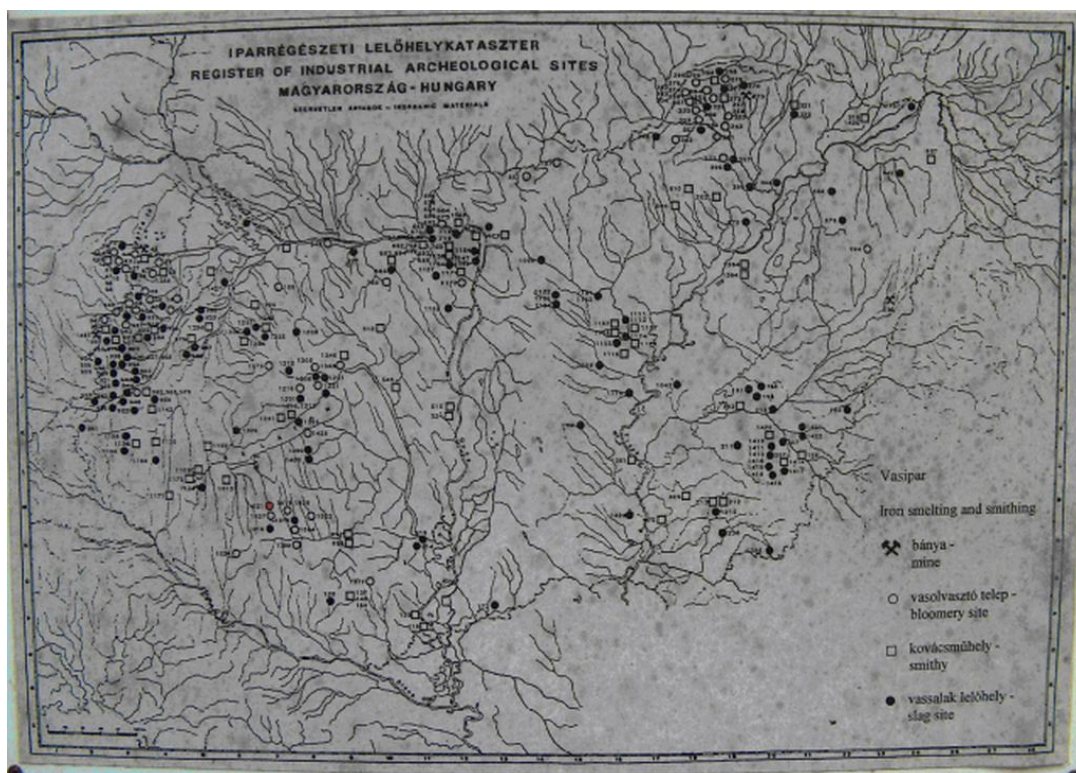
³ Azért csak szerkezetében tipikus az 1. ábrán látható vasbuca, mert a koraközépkori kohászok ennél jóval kisebb, mindössze 2-4 kg tömegű vascipót nyertek egy-egy vasolvasztás alakalmával.

⁴ <http://iron.wlu.edu/>

⁵ A kovácsvas a kovácsok által kedvelt, jól megmunkálható, könnyen hegedő, (tűzhegeszthető) kis szénttartalmú acél. A bucavas leginkább ebből állt, bár egyes részei magasabb szénttartalmúak is lehettek ld. később.

használtak fel, amelyet *gyepvasércként* (mocsárérc, tóérc, babérc, borsóérc) bányásztak külszíni fejtéssel, esetleg kezdetleges mélyműveléssel. A legtöbb kohótelepet a gypvasérc lelőhelyek közelében találjuk.

A bucavas volt minden korabeli vastermék előgyártmánya, amelyből kovácsolással (még a kohóból kivett melegében) előbb rendszerint rúdanyagot állítottak elő. Ennek további feldolgozását már nem a kohászok, hanem a kovácsok végezték. A koraközépkori vasgyártás és vassfeldolgozás nyomait Magyarországon számos helyen megtalálták, mert a vasipar jól felismerhető nyomokat hagyott maga után. Ilyenek például a salakmaradványok, amelyek a mezőgazdasági munkák során felszínre kerülhetnek. Az 2. ábra Magyarország vasiparának nyomait mutatja.⁶



2. ábra: Magyarország vasiparának nyomai

A térkép alapján számba vehetjük a korabeli vasolvasztó⁷ régiókat. A vasolvasztás klasszikus magyarországi helye a Felvidék. A másik lelőhely Kőszeg és Velem vidéke. A harmadik régóta ismert lelőhely Sopron mellett található. A Dunántúl középső részén szintén találtak elszórtan vasolvasztó telepeket.

Érdekes megfigyelés, hogy a kohótelepek többsége vízfolyás mellett, mégpedig rendszerint kis vízhozamú szakaszokon található, és ez a tendencia Európa-szerte megfigyelhető. Erre magyarázatot adhat az, hogy a kohók építéséhez és a dolgozók ivóvízszükségletének kielégítéséhez is előnyös volt a patakparti elhelyezkedés. Egyes kutatók a babonás okokat, vagy gyártástechnológiai szükségleteket⁸ is elképzelhetőnek tartják. A saját gypvasérclelőhely bejárás tapasztalatok alapján, magyarázat lehet a sekély vizű patakok kedvelésére az, hogy ezeknek medreiből könnyedén kifejthető a limonit. A patakmeder oldalfalában rendszerint ércbúvások találhatók⁹, illetve a sekély vizű patakok fenekén gyakran akár emberfej nagyságú limonit görgetegek is előfordulnak.

⁶ A Somogyfajszai Kohómúzeumban készített saját felvétel

⁷ A szakirodalomban elterjedt vasolvasztás terminológia valójában nem írja le helyesen a korabeli vasgyártást, mert mint azt a bevezetőben is említettük, a vas megolvadásáról a bucavas gyártás esetében szó sincs.

⁸ Heckenast-Nováki-Vastagh-Zoltay: A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban (A honfoglalástól a XIII. század közepéig), Bp, 1968. A tüzből kikerülő salakos bucát esetleg hirtelen vízbe merítéssel szabadították meg a salak egy részétől.

⁹ Ezt tapasztaltam gypvasérc lelőhely bejárás során a Somogyfajszon átfolyó Kácsmóna-patak és a Kálló-patak egyes folyásai esetén is. Részletesen ld. később.

A dolgozat általános célja a koraközépkori vasgyártás technológiai sorának ismertetése és értelmezése a gyakorlati megvalósítás tükrében. Ezzel a szándékkal egy ma már Európa-szerte intenzíven kutatott iparrégészeti ágazathoz az *archeometallurgiához* csatlakozik. Nyugat-Európában Magyarországgal ellentétben nagy hagyománya van a kohászatrégészetnek. Németországban például a bucavasgyártás kohász hagyományörző rendezvények keretében több kohóban párhuzamosan folyik, mintegy versengve azon, ki tud minél nagyobb tömegű, minél jobb minőségű (kevésbé szivacsos, tömörebb) vasbucát nyerni.¹⁰ Magyarországon évente szeptemberben Újmassán kerül megrendezésre a Fazola Napok a Kohászati Múzeum szervezésében. Az esemény keretein belül két éve helyt kap a bucavasgyártás is, amelyet Bartha László végez.

Cél továbbá, olyan mértékű gyakorlat és olyan mennyiségű információ megszerzése az általam végrehajtott próbaolvasztások segítségével, amelynek révén a korhú bucavasgyártás rutinszerűen reprodukálhatóvá válik, ha ismertek bizonyos peremfeltételek (ércminőség, kohó geometriai kialakítása, stb.) Ez jelenleg irodalom alapján nem kivitelezhető.

Ebben a dolgozatban viszont nem csupán a vasbuca hagyományos kohászatáról szeretnék szót ejteni, hanem az ahhoz kapcsolódó technológiákról is, így például a gyepvasérc bányászatról, faszénégetésről, fűjtató készítésről, bemutatva azt, hogy hogyan lesz „a földből egy kész termék”. Mindeközben a gyakorlati megvalósítással párhuzamosan megpróbálom értelmezni a folyamatok természettudományos vonatkozásait, kutatva a vasbuca kialakulásának kémiai és termodinamikai folyamatait, amelyet eddig egyetlen általam áttekintett irodalom sem tárgyalt kellő mélységgel. Ehhez igénybe veszem az anyagtudomány korszerű eszközeit is (metallográfia, röntgendiffrakció, összetétel-vizsgálat).

A korabeli gyártástechnológiák felelevenítésekor nagyon lényeges törekvés volt a *korhűség*. Mindenképpen igyekeztem a régiek által is elérhető anyagokkal, megoldásokkal dolgozni, még abban az esetben is, ha a munka így sokkal fáradtságosabbá vált (pl. kézi fűjtatás).

¹⁰ Bartha László szóbeli közlése

II. IRODALOMKUTATÁS

II.1. A vasgyártás történeti áttekintése

II.1.1. Kovácsolt vastárgyak vasmeteoróból

Az ember mintegy hatezer éve ismeri a fémek előállítását módját érceiből. A legkorábbi vastárgyakat az észak-iráni Tepe Sialk és az észak-iraki Samarra lelőhelyeken találták meg, ezek a Kr. e. V. évezredből valók.¹¹ Egyes helyeken a vasgyártás megelőzhette az ón és réz kinyerésének megismerését is, de ezek a korai vastárgyak kevésbé álltak ellent a korróziónak, mint a réz vagy a bronz (réz-ón ötvözet).¹² Az első vastárgyakat azonban nem kohászati eljárással készült vasból, hanem *meteorvasból* állították elő. A 3. ábrán egy vasmeteor látható.¹³



3. ábra: Vasmeteor keresztmetszete

Bár a vasmeteoritok (szideritek) a kőmeteoritokhoz (aerolitok) képes jóval ritkábban fordulnak elő a földön, a megfigyelt meteoritoknak csak 5,7%-át teszik ki, mégis sokkal több található belőlük gyűjtőknél. A vasmeteoritok adják az összes ismert meteorit 90%-át, összesen mintegy 500 tonnát.¹⁴ Ennek oka, hogy még laikusok számára is könnyen felismerhetőek, az időjárásnak sokkal jobban ellenállnak, a légkörbe való belépést nagyobb eséllyel érik túl, mint a kőmeteoritok. A vasmeteoritok jellemzően kis széntartalmúak és nagy nikkeltartalmúak, a nikkeltartalom akár 20% körül is lehet. Metallográfiai csiszolatukon többnyire *Widmannstätten-féle* szövetszerkezet látható, amelynek rácsozatát a nikkelt adja.

A legkorábbi vastárgyakat közepes nikkeltartalmú (5-10 % Ni) vasmeteoritokból kovácsolták. A Szihote Aliny-hegységben 1947-ben hatszáz krátert találtak, amelyekből 100-300 vasmeteorit darabot gyűjtöttek össze.¹⁵ Jellemző összetétel: 94% vas, 5,4% nikkelt, 0,38% kobalt. A magasabb nikkeltartalmú vasmeteoritok a korrózióval szemben jól ellenállnak, (köszönhetően a homogén ferrites szövetszerkezetnek és a kristályhatárokon megjelenő nikkelt rácsozatnak), így a belőlük készült vastárgyak a mai napig fennmaradhattak.

A vasmeteoritok tehát viszonylag nagy tömegű alapanyagot szolgáltathattak a vaskor kezdetén. Az említett 500 tonnás tömeget érdemes összevetni a bevezetőben említett 20 ezer fős honfoglalás előtti magyar katonai erő felfegyverzéséhez szükséges 20 tonnás vasigénnyel.¹⁶

¹¹ Gömöri János: Az Avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában, Sopron, 2000.

¹² H.-N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

¹³ <http://www.astronomynotes.com/solarsys/pics>

¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Iron_meteorite

¹⁵ A sok egymáshoz közeli kráter a légkörben darabjaira hulló vasmeteorit kisebb részeinek becsapódásakor keletkezhetett.

¹⁶ Természetesen az ő fegyverzetük nem meteorvasból készült, de ha csak a mennyiséget nézzük, akár kovácsolhatták volna őket abból is.

A következő idézet már átvezet bennünket a vas érciből kinyerésének korába, a bucavas gyártás kezdeteihez: „Meteorvas hullott le Indiában. Mélyre ásva a meteorit úgy izzott, mintha a kemencéből most húzták volna ki, 2,5-3 kg súlyú volt. Kovácsoláskor a kalapács ütései alatt darabokra törött¹⁷, amikor kardot és tört akartak belőle készíteni. Ekkor keverték másfajta földi vassal (2 rész égi, 1 rész földi vas) és olyan jó élű fegyvereket kaptak, mint a legjobb arab pengék.”¹⁸ Ez lehetett a *damaszkolás* egyik korai megjelenési formája, ahol az egyik összetevő a földi vas, ami alatt bucavasat érthetünk, a másik a meteorvas volt.

II.1.2. A vasgyártás kezdetei, direkt vasgyártás

Azt, hogy hogyan ismerte meg az ember az ércet tőzi úton történő feldolgozását, nem lehet pontosan tudni. Talán egy gyakori tűzrakásra szolgáló tűzhelyt több más kővel együtt vasércel is körberakta. A fa, majd faszén égése során keletkező szénmonoxid elemi vassá redukálhatta az ércrög kicsúcsosodó részeit. A tüzet esetleg szél is szíthatta, az így létrejött nagy hőmérséklet hatására az érc meddő anyagai salak formájában el is távozhattak.

Magam is megpróbáltam hasonló körülményeket reprodukálni. Ennek során izzó faszénparázsba, illetve köré helyeztem gypevasérc rögöket, aprított darabokat. Körülbelül háromnegyed-egy óra enyhe fűjtatással szítottam a tüzet. A parázskupac mellett elhelyezett ércrögökön sok változást ennyi idő alatt nem tapasztaltam, mindössze kissé megolvadt a tűzzel érintkező felületük. A parázskupac belsejében elhelyezett gypevasérc darabkák viszont látványosabb átalakuláson mentek keresztül. Ezek egy nagyobb darabbá sülték össze, és nemcsak a felületük lágyult meg, hanem teljes térfogatukban képlékeny állapotba kerültek. Az összesült rögben elemi vas jelenlétére utaló nyomot (töretben fémcsillogás, mágnissal való vizsgálat) ekkor még nem találtam, nem is foglalkoztam tovább a darabbal, egyszerűen a tűzhely mellett hagytam, kitéve az időjárásnak. Később arra lettem figyelmes, hogy az összesült rög felületén pontszerű rozsdafoltok jelentek meg, ami elemi vas jelenlétére utal. Ezek szerint a gypevasérc darabok, legalábbis a felületükön olyan mértékű redukción mentek keresztül a parázskupacon belül, aminek következtében apró (tizedmilliméteres) vasszemcsék keletkeztek. Ehhez elegendő volt az említett legfeljebb egy óra.

El lehet képzelni tehát, mi történhetett régen azokkal az ércrögökkel a tűzhely körül, amelyek egyes részei parázsba temetődtek és hosszú, gyakran ismétlődő redukciós folyamatokon mentek keresztül. Ez esetben nyilván nagyobb vasszemcsék is létrejöttek (milliméteres nagyságrendben), amelyekre elődeink már felfigyelhettek, és pusztán szórakozásból, de alakítani kezdték őket. Így olyan új mechanikai tulajdonságokat ismerhettek meg, amelyeket a kőnél, az ércnél nem tapasztaltak (pl. szívósság).

II.1.2.1. Olvasztógödör

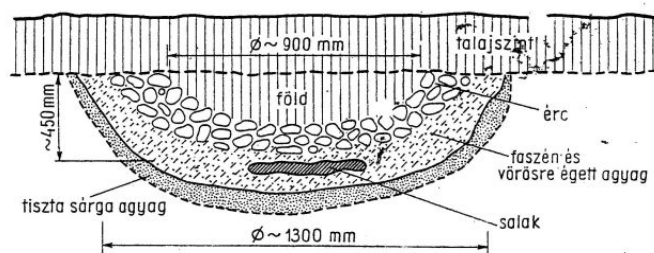
A sík vidékeken az első bucátüzeket ún. *olvasztógödörökben* élesztették (ld. 4. ábra). Ezek átmérője 300-1800mm között mozgott. Az olvasztógödörökben talált maradványok között találunk faszén, összesült ércet (ld. fent említett kísérlet), ill. salakot is. Az ilyen gödör közvetlen leszármazottja lehet az ércdarabokkal körberakott tűzhelynek.¹⁹ Mesterséges fűjtatásról valószínűleg nem beszélhetünk, csak a természetes légáram szíthatta a tüzet.²⁰

¹⁷ A törés oka nem egészen világos. Ha valóban meteorvasból dolgoztak, abban nem lehettek pl. vöröstörékenységet előidéző szennyezők (kén, foszfor), kiválóan alakíthatónak kellett volna lennie. Esetleg a darab szerkezete lehetett nem megfelelő, talán repedések keletkeztek benne a légkörbe érkezéskor. Sok vasmeteor metszetén figyelhetők meg hosszan elnyúló hajszálrepedések.

¹⁸ G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat

¹⁹ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

²⁰ De felmerül a kérdés, hogy hogyan? Ha a faszén rétegre ércet helyezünk, akkor elzárjuk azt a levegőtől. Úgy gondolom, hogy a tűzhelyben állandóan rendezgetni kellett a faszén-érc elegyet, az optimális szellőzés érdekében, illetve az érc/faszén tömegarány nagyon kicsi lehetett.

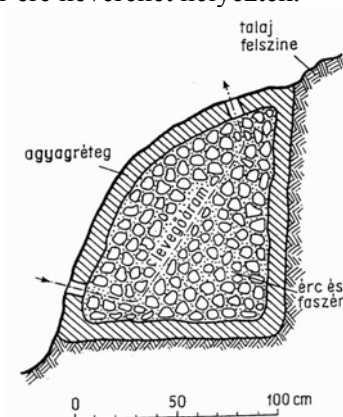


4. ábra: Olvasztógödör metszete

Egy ilyen típusú olvasztótűzhelyben a később részletezett próbaolvasztási tapasztalatok alapján számomra bizonyos, hogy nem nyerhettek mást, mint legfeljebb apró (tízmilliméteres méretű) vasszemcséket, amiket az összesült salakos ércrögökből gyűjthettek össze, kalapálhattak ki. Ezekből a kis vasdarabokból nagyobb vastárgyakat készíthettek *kovácstűzi hegesztéssel*.

II.1.2.2. Olvasztópáholy

Az *olvasztópáholyokat* már nem sík terepen, hanem hegyoldalon, domboldalon alakították ki, úgy hogy az uralkodó szélirányt is figyelembe vették (ld. 5. ábra). Erre azért volt szükség, mert az olvasztópáholy tüzeit még mindig természetes légáram szította, ezért úgy kellett tájolni, hogy az oldalát borító agyagköpenyen lévő alsó lyukakon befújhasson a szél. A felső lyukakon az égéstermékek távoztak. Az olvasztópáholyba faszén-érc keverékét helyezték.



5. ábra: Olvasztópáholy metszete

Az olvasztópáholy előrelépést jelentett a vízszintes helyzetű olvasztógödörrel szemben, mert erőteljesebb gázáramlás jöhetett létre benne a függőleges elhelyezkedés miatt. Emiatt a redukációs folyamatok gyorsabban mehettek végbe, illetve nagyobb mértékűek lehettek. Bizonyára magasabb hőmérséklet volt elérhető bennük, így a salak megolvadása is könnyebben megtörténhetett, ezzel az olvasztógödörben keletkező vasrögök méretét valószínűleg növelni lehetett.

Sajnos bővebb adatok nincsenek az olvasztópáholyról, nem tudhatjuk, vajon kerülhettek e már ki belőle nagyobb vassbucák is. Minden esetre ez a hiányzó láncszem a lapos olvasztótűzhelyek és az aknás kemencék között.²¹

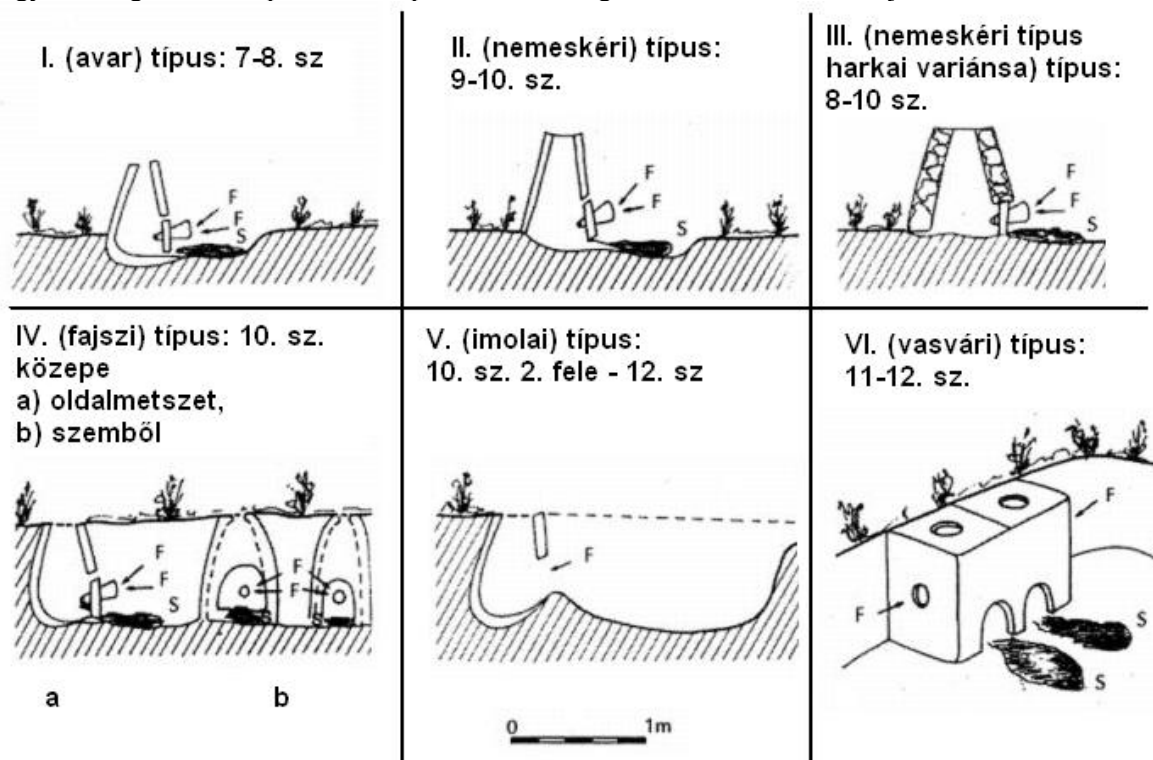
A bemutatott olvasztógödör- és páholy produktumai csak apró vasrögök lehettek és nem vassbucák. Ezek szakszerű feldolgozásával viszont készíthettek nagyobb vastárgyakat is. Ennek lényege, hogy az apró darabokat kovácstűzi hegeszteni kell. Ezzel a módszerrel dolgozott egy német kutatócsoport által bemutatott csádi kohásmester is, akinek munkájáról tanulságos összefoglaló film készült 1968-ban. A film a dolgozat DVD mellékletén található Filmek/video1 címmel és a 31'45"-től mutatja be a módszert.²²

²¹ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

²² Az eljárást magam is kipróbáltam, viszont én nem öskohászati eljárással nyert vasrögöket, hanem egyszerűen csak kisebb vasdarabokat próbáltam egyé kovácsolni. A darabok egy része elfogadható módon össze is hegedt, de ha jól alakítható darabot akarunk létrehozni, akkor mindenképpen szükséges a többszöri tűzhegesztés.

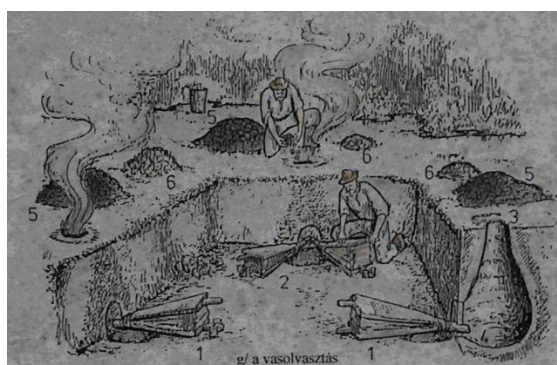
II.1.2.3. Az első bucakohók

Az első bucakohók *aknás kemencék* voltak. Az aknás kemence rendszeren henger alakú belsővel rendelkezik, melybe az ércet és a faszenet változó rétegekben (vagy keverve) halmozzák fel, s a tüzet fuvókkal szítják. Sokféle kialakítású korai bucakohó létezett, nem lehet pontosan eldönteni, vajon melyik típus alakult ki legkorábban. Voltak teljesen földbe vájt, félig földbe vájt és szabadon állók is. A Magyarországi koraközépkori kohótípusokat összefoglalva, időrendben mutatja a 6. ábra.



6. ábra: A magyarországi bucakohók típusai a korai középkorban, időrendben²³

Ezek a kohók már mind mesterséges fűtatással üzemeltek. Az ábrán „F”-fel és nyíllal van jelölve a befűvés helye és iránya, „S”-sel a kifolyt salak helye²⁴. A földbe vájt kohók rendszerint műhelygödörök oldalfalába voltak bemélyítve. Egy műhelygödör néhány tíz négyzetméter alapterületű és 60-80 cm-rel a földfelszín alá süllyesztett ázott gödör volt (ld. 7. ábra).



7. ábra: Műhelygödör és az oldalfalukban kialakított bucakohók²⁵

²³ G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat

²⁴ Az, hogy a salak mindig kifolyt a kohó elé, egyáltalán nem biztos. Pl. a 8/5. ábrán látható imolai típus esetén előbb a medence aljának színiig kellett töltődni salakkal, csak ezután volt lehetséges a salak kicsapolása. Sokszor találtak a kohó medencerészének alakját felvett „befagyott” salakmedvét a bucakemencében. Mindazonáltal a salak kifolytatása a kohóból hozzájárult a bucavas salakmentesítéséhez, vagy legalábbis a salakosságának csökkentéséhez.

²⁵ G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat

A mesterséges fűjtatást az ábrán látható módon kis fűjtatókkal végezték. Somogyfajszon hasonló műhelygödört tártak fel. A régészeti lelőhely fölé múzeumot emeltek, így ez Magyarország koraközépkori vaskohászatát legrészletesebben bemutató emlék. A somogyfajszói műhelygödőről készült képek a DVD mellékleten találhatóak: Képek/Somogyfajszói kohómúzeum.

A kohók röviden összefoglalva a következő képen működtek: A bucakemencét mindenek előtt előfűtötték, apró gallyak elégetésével, majd faszénnel töltötték fel őket. Amikor a faszénoszlop javarészt átizzott, keverten vagy rétegesen²⁶ elkezdtek beadagolni a toroknyíláson át az ércet és a faszenet. Egy réteg érc terítését néhány réteg faszén követi, ügyelve a megfelelő tömegarányok megtartására. Az elegyoszlop folyamatosan süllyed, ahogyan a faszén elég, és az érc összeolvad, így a toroknyíláson át újra és újra pótolni kell őket. Az első ércréteg terítésétől számított 5-8 óra elteltével a kohó mellfalazatát elbontják és kihúzzák a még izzó 1-3 kg tömegű bucavasat. A következő kohászat előtt újabb mellfalazatot kellett tapasztani. A kohó működése tehát szakaszos. A bekezdésben leírtakat részletesen bemutatják a DVD mellékleten található Filmek/video1 és Filmek/video2 filmek.

A bucavas erősen salakos, többszöri újraizzítással és átkovácsolással tömörítik az anyagot. Ennek során *újraizzító tűzhelyben* felmelegítik, majd a kovácsolás során a még benne lévő alacsony olvadáspontú (1000-1100 °C) salak kifröccsen, a maga után hagyott fémtiszta felületek pedig összehegednek. De nem lehet az összes salakot kikovácsolni a bucából, ezért törekedni kell a salakzárványok felaprózására, egyenletes eloszlására a munkadarabban, így csökkentve azok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt káros hatását (amely leginkább éles bemetszésésként jelentkezik a vasmátrixban). Ezért a bucát először rúddá kovácsolják, majd a rudat félbehajtva tűzihegesztéssel önmagával összehegesztik. Ezeket a technológiai lépéseket ismételtetik mindaddig, míg kellőképpen nem homogenizálták a munkadarab szerkezetét. Végül többnyire négyzetes keresztmetszetű rúdanyaggá kovácsolt előgyártmányokat készítettek. A bucavas kiemelését és átkovácsolását mutatja a 8. ábra



8. ábra: A vasbucsa kiemelése és átkovácsolása²⁷

II.1.3. Vasgyártás az indirekt és a direkt eljárás határán

A kis bucakemencékből kikerülő vasbucák mérete nem tette lehetővé, hogy nagyobb termékeket egy darabból elkészítsenek belőlük. A szakaszos üzem miatt a termelékenység nagyon alacsony volt, a középkor folyamán fokozódó igényt a vas iránt így fedezni már nem lehetett. A 12. századtól a bucakemencék elkezdtek egyre magasabbá válni, egy kohászat időtartama pedig 5-8 óráról szintén növekedni kezdett. A fűjtatás azonban még mindig izomerővel történt, a fűvósíki hőmérséklet ezért megmaradt a korábbi szinten. A fejlődés a kohászat végén kikerülő vasbucák tömegének és

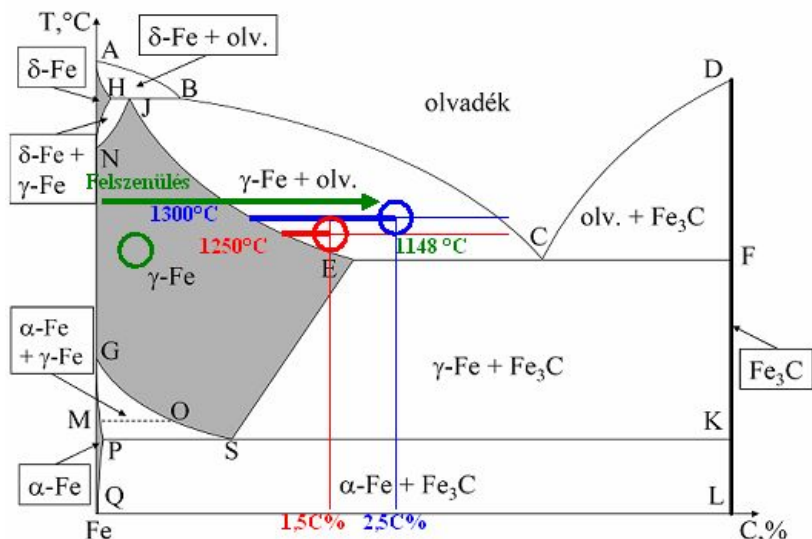
²⁶ Vajon kevert vagy réteges adagolást választottak az őskohászok? Erről a kutatók véleménye eltérő. Egyesek szerint nem szabad a mai vasgyártásnál alkalmazott réteges adagolási módszert elfogadottnak tekinteni az őskohók esetében is. Saját tapasztalatok alapján, úgy gondolom valószínűleg mindegy, melyik módszert alkalmazzuk, mert az elegyoszlop (faszén és érc elegye) mire a fűvósíkba ér javarészt átkeveredik. Ez persze csak akkor igaz, ha megfelelően vékony rétegekben terítjük az ércet és a faszenet a beadagoláskor.

A réteges adagolás mellett szól az is, hogy a napjainkban készített, a természeti népek vaskohászatát bemutató ismeretterjesztő filmekben is a réteges adagolást figyelhetjük meg (ld. DVD melléklet video1, video2).

Még egy érv a réteges adagolás mellett: ha követjük a korhű technológiai sort, azaz az ércet pörköljük a kohóba adagolás előtt (ld. IV.2.), akkor a pörkölés során óhatatlanul faszén-érc keveréket állítunk elő, így az ércet faszénnel keverten helyezzük a kohóba, bár ez a keverés kis faszén/érc tömegarány mellett történik.

²⁷ G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat

Az igazi előrelépést a *vizikerekek* vasgyártásban történő alkalmazása indította el. A vasipar volt az egyik legfontosabb európai ipar, amelyet a vízikerek és a *bütyköstengely* segítségével részben gépesítettek.²⁹ Az izomerő helyett immáron vízikerekkel hajtották meg a kohók tüzének szítására szolgáló fűtatókat. A kohók méretei így még tovább nőhettek, a pocha átmérője és a kohó magassága is nagyobb lett, kezdetben 3-4 méteres. A kohóba befűjt levegő térfogatárama tehát megsokszorozódott. Ennek következtében elkezdett növekedni egy korábban nemkívánatosnak tartott „melléktermék” mennyisége, a *nyersvasé* (*pigiron, disznóvas*). A jelenség magyarázatához szükségünk van a vas-karbon állapotábrára (ld. 9. ábra).



Ha feltételezzük, hogy a kohóban állandó nagy hőmérsékletet tudtak tartani intenzív fűtatással, pl. 1250°C-ot, akkor a most már hosszú kohászati idő alatt a keletkezett vasbuca kellőképpen felszenülhetett (párhuzamot vonhatunk a *cementálással*), pl. 1,5%-os karbontartalomra (ezt az állapotábrába húzott piros vonalpárok jelzik). A felszenülés mértéke tehát a kohóban eltöltött időtől és a kohóban uralkodó hőmérséklet nagyságától függ (ugyanis nagyobb hőmérsékleten a felszenülés sebessége is nagyobb). Az elérhető hőmérséklet nagysága pedig a fűtatási intenzitással áll összefüggésben. A *kónóda szabály* szerint ebben az állapotban a vastag pirossal jelölt szakasznak megfelelő arányú olvadt vas található a szilárd buca mellett. Ha a hőmérséklet és a kohóban töltött idő tovább nő (ezt az állapotábrába húzott kék vonalpárok jelzik, 1300°C és 2,5%C értékpárok), akkor a vastag kék szakasznak megfelelően jóval nagyobb mennyiségben kapunk olvadt vasat. Az olvadt vas a kohóból nyersvas (C% $\approx$ 4,3) formájában csapolható ki. A régebbi kis teljesítményű bucakemencékben elérhető viszonyokat az állapotábrába rajzolt zöld kör mutatja, ehhez képest látható, hogy a technikai fejlődés során az állapotábrában jobbra felfelé vándorolunk. Korábban a nyersvasat, mivel kovácsolni nem lehet, nemkívánatos mellékterméknek tartották. Később úgy jártak el, hogy a vasbuca és a salak eltávolítása után a nyersvasat a kemence fenekében fűtató szél hatásának tették ki, így a

²⁹ Terry S. Reynolds: Az ipari forradalom középkori gyökerei, Tudomány 1985/2. Ekkoriban alakultak ki a vasverő hámorok. A kívül elhelyezett vízerkező tengelye nyúlt be és vezetett végéig a hámor épületében. A tengelyre büttyöket erősítettek, így lehetővé téve az alteráló mozgást végző büttyöskalapácsok mozgását és a fűtatók működtetését.

karbontartalmának jelentős részét elveszítve acél minőségűvé, esetleg kovácsvassá vált.³⁰ A karbon kiégése exoterm, hőtermelő folyamat, így az olvadt állapot fenntartásának energiaigénye kissé csökkenhet. Végül is ez az eljárás, a kohászat akkori szintje átmenetet jelent a direkt és indirekt vasgyártás között, de a szakaszos üzem még mindig fennállt.

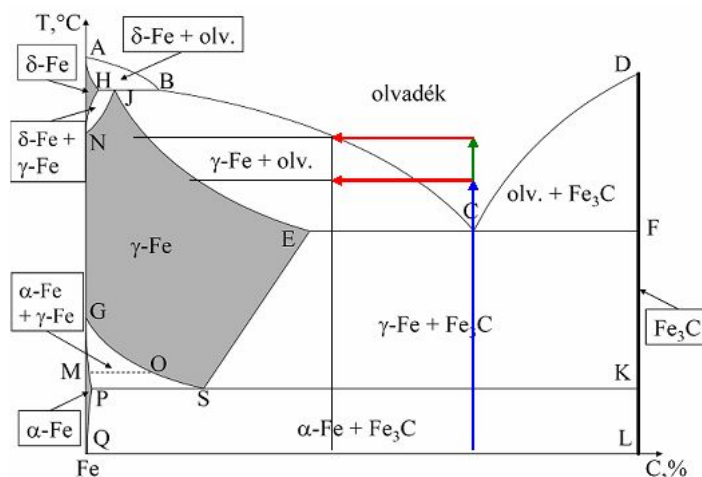
II.1.4. Indirekt vasgyártás

A nyersvas kovácsolható vassá való feldolgozásában szerzett ismeretek nyomán, a kohóban uralkodó hőmérséklet és a kohászati idő további növelésével már csakis nyersvasat kezdtek előállítani. Ebből a kezdetleges kohóban frissítés módszere helyett *készeléssel* készítették kovácsolható vasat, azaz a következő képen jártak el: A folyékony nyersvasat kimerték a kohóból, vagy kifolyatták és megvárták míg megdermed. A nyersvasat ezután *frisselő tűzhelyen* újból megolvasztották, esetleg apró vasérc rögökkel keverve, fűjtató szél hatásának tették ki, így kiégetve belőle a karbon.

Az indirekt vasgyártás megismerésével a kohók termelőképessége aránytalanul felfokozódott, ugyanis nem kellett többé szakaszos üzemből folytatni a kohászatot. Az aknás kemencéket ezután már olyan magasra építették, és olyan erősen fűjtatták, hogy kizárólag olvadt nyersvas keletkezzen benne. Ha a nyersvasat, ahányszor a kohó medencéje megtelt, lecsapolták, és az ércet meg faszénre rendesen utánpótlták, akkor a kohó üzemeltetése folyamatosná válhatott, és mindaddig nem kellett megszakítani a munkát, míg a falazat tönkre nem égett. Ezeket a zárt mellű, csak nyersvasat szolgáltató kemencéket nevezzük *kisolvasztónak* (*szélolvasztónak*), és először a 15. század elején jöhettek alkalmazásba. Eleinte olyan magasak voltak, mint a nagyobb bucakemencék (5-6 méter), csakhogy a mellét teljesen elzárták, és jóval erősebb széllel fűvették.

A megolvasztott és bizonyos időközönként lecsapolt nyersvasat vasmintákba, vagy nedvesen összeálló homokformából készült mintákba eresztették, és mint könnyen kezelhető lapos vagy cipő alakú darabokat raktározták. A híg folyós nyersvasat természetesen nemsokára *öntött vastárgyak* készítésére is felhasználták, de kezdetben csak ágyúkat és ágyúgolyókat (15. század vége) öntöttek belőle.

A technikai fejlődés következő foka a *nagyolvasztó* és a koksztüzelés megjelenése volt. A nagyolvasztó működése már közismert, ennek részletes bemutatásától eltekintek. Néhány eljárást azonban még meg kell említeni a nyersvas kovácsolható vassá való feldolgozásában a történeti folytonosság érdekében. A készelést a *kavaró eljárás* követte (19. század közepe). A kavaró frissítési módszer magyarázatához ismét szükségünk van a vas-karbon állapotábrára (ld. 10. ábra).



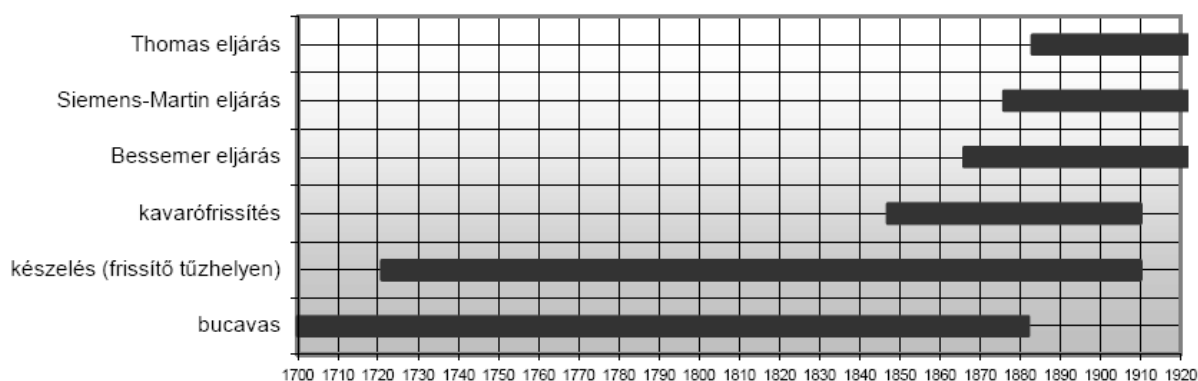
10. ábra: A kavaró frissítési eljárás értelmezése a metastabil vas-karbon állapotábrában

A kavarós eljárás során a nyersvasat téglában tartották olvadt állapotban (felhevítés egyenese a diagramban kék színnel). A munkát egy hosszú vasrúddal végezték. A kavarás során az olvadt nyersvas oxigénnel való érintkezése nagyobb felületen zajlódhatott le, így a karbontartalom fokozatosan csökkenhetett (a széntelenedés piros nyíllal jelölve). Egy bizonyos C%-ot elérve auszteniszemcsék kezdtek kiválni a kavarásra használt vaspálcán, amely a kristályosodásnak

³⁰ Kerpely Antal: Adatok a vas történetéhez Magyarországon, 1898

kiindulópontot szolgáltatott. Az ausztenitszemcsék karbontartalma az olvadék hőfokától függött, mégpedig a hőmérséklet emelésével karbonban szegényebb ausztenitszemcsék váltak ki a vasrúdon (ld. zöld kiegészítő nyíl, és a hozzá tartozó piros nyíl). A kavarást addig folytatták, amíg a vasrúdra elég nagy mennyiségű acéltömböt nem duzzasztottak. Ezután a rudat nyélnek használva kiemelték a tömböt a tégelyből és átkovácsolták.

Az acélgyártás következő lépcsőfokai a Bessemer, a Siemens-Martin és a Thomas-eljárás már szintén közismertek, így ezeket itt nem mutatom be. Az indirekt vasgyártás elterjedése mellett azonban az olcsó és könnyen kezelhető bucakemencék még sokáig urai maradtak a vastermelő vidékeknek, pl. Gömör megyében még 72 volt belőlük a 19. század elején is. A 11. ábrán összefoglalva láthatók a bemutatott acélgyártási módok.



11. ábra: A magyarországi acélgyártás a 18-19. században³¹

Az ábra időskáláján már nem megjelenő korai vasgyártási szakaszokat a következőképpen szokás összefoglalni:

A Hallstatt és La-Tène kor (i.e. 7-1. sz.)

A római kor (i. sz. 1-4. sz.)

A népvándorlás kora (5-8. sz.)

A szláv és magyar vaskohászat kora (9-13. sz. közepe)

A német kolonizációs vaskohászat kezdete (13. sz. második fele és 14. sz. első fele)

Ezek után már többé-kevésbé átfogó képünk van a Magyarországi vasgyártás fejlődéséről, látjuk hogyan alakult ki az évszázadok, évezredek során a régi technológia kis változtatásával a mai modern vasgyártás. Az is kiderült, hogy a vasgyártási eljárások közül a direkt vasgyártás, a bucavas gyártást végezték a leghosszabb időn keresztül.

II.2. A bucakemece működése

II.2.1. A bucavasgyártás alapanyagai

A bucakemecében lejátszódó folyamatok megértéséhez mindenképp tisztázni kell, milyen anyagokat használtak fel a régi idők kohászai.

Három anyagról kell szót ejtenünk: a gypvasércről, a faszénről és a befűjt levegőről. A leletek szerint a vasércásványaként főleg

- hematitos (Fe_2O_3)
- hamatit-limonitos (Fe_2O_3 és $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- hematit-geotites (Fe_2O_3 és $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

ércet bányásztak. Az ércek azonban több-kevesebb kísérővegyületet, *meddő anyagot* tartalmaztak, ami a kohászat során szintén a kohóba került és salakként kezelni kellett. Példaként néhány bucakemence körül talált érc összetétele:

³¹ Vidovszky István: A XVIII-XIX. században kézműves technológiával készített kovácsoltvas épületszerkezeti elemek vizsgálata

Vasérc neve	%	Fe	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	H ₂ O	P ₂ O ₅
Észak borsodi		47,84	67,83	19,87	3,64	4,70	0,27	0,59	1,38	-
Soproni		35,35	49,31	35,44	1,46	1,79	3,87	0,60	6,45	-
Rinya-pataki		49,00	70,00	4,90	2,20	0,30	2,70	0,40	13,63	5,3

1. táblázat: Jellemző vasérc összetételek³²

A középkori lelőhelyen talált érc a ma használt vasérccekhez képest kisebb vastartalmúak, porózus, réteges szerkezetűek. A porózus szerkezetből adódó nagy fajlagos felület a redukációs folyamatok intenzitását növeli. A talált érc *hidrátvizet* igen kis mennyiségben tartalmaznak, de kvarc általában jelentős mennyiségben fordul bennük elő. A hidrátvíz tartalmat *pörköléssel* távolították el, ezzel mintegy dúsítva az ércet. A pörkölést, melynek lényege az apró darabokra tört érc faszénparázson való hevítése, később részletesen bemutatom.

Az eredményes bucavas gyártáshoz legalább 40%-os vastartalom szükséges, mert az ércben lévő vasnak fedeznie kellett a buca anyagát és a salakba kerülő nagy mennyiségű vasvesztést is.

A bucakemence másik alapvető alapanyaga a faszén. A faszén végzi a vasoxidok redukcióját a nagyobb hőmérsékleteken. A megvizsgált megmaradt korabeli faszéndarabok döntő többsége kocsányos vagy kocsánytalan tölgyből származik. A faszén minimális kéntartalma szintén a későbbi melegkovácsolhatóság egyik alapvető feltétele. Minél lazább szerkezetű volt a fa anyaga, annál nagyobb kémiai aktív felülettel rendelkező és jobb gázátbocsátó képességű faszén készült belőle. A faszénnek nem csak tüzeléstechnikai jelentősége volt, hanem szerepet játszott a salak összetételének módosításában is. A faszén szénttartalmának kiégése után ugyanis fahamu marad vissza, amely jelentős alkáliföldfém tartalommal rendelkezik. A bükkfaszén és hamuja összetételét a 2. táblázat mutatja be:

Bükkfaszén összetétele (%)		C		H		O + N		N		Nedvesség
		81,78		3,17		3,14		0,10		3,83
Ebből a fahamu összetétele (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn	CaO	MgO	K ₂ O + Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	
	15,04	5,90	13,57	0,46	24,99	10,25	4,62	0,25	18,50	

2. táblázat: A Bükkfaszén és hamuja összetétele³³

A bucavasgyártás során az érc meddő anyagiból keletkező salak összetételét a bükkfaszén hamujának láthatóan magas CaO – tartalma kedvezően módosíthatja. A CaO a salakban 12%-os mennyiségig olvadáspontot csökkent, így ha az ércben egyébként nagyon kevés van belőle, akkor a fahamából pótlódhat.

A faszén/érc tömegarány meghatározásának a kohó gazdaságos üzemelése szempontjából (ne legyen túl nagy a faszén fogyasztás), illetve a megfelelő hőmérséklet fenntartása miatt van jelentősége. Szakirodalmi adatok alapján ez az arány 2:1 körül volt, de a középkor későbbi századai során a fejlettebb vasiparral rendelkező vidékeken (pl. Stájerország) 0,8-as arányt is elértek.

A harmadik „alapanyag” a befűjt levegő. A levegő oxigéntartalmának és a faszén szénttartalmának reakciójából szénmonoxid keletkezik, ez végzi a vasoxidok redukcióját alacsony hőmérsékleteken. Ennek a technológia szempontjából legfontosabb paramétere a térfogatáram. Ha kis térfogatárammal dolgozunk, nem érünk el elegendően nagy hőmérsékletet, ha túl nagygal, akkor túl nagy (nem korhű) hőmérsékleten nemkívánatos pigiron keletkezhet, illetve káros, oxidáló atmoszféra alakulhat ki a fűvőövben, ami a már kialakult vasszemcséket visszaoxidálhatja.³⁴ Az ideális hőmérséklet 1100-1300 fok körül lehet. A magas hőmérsékletet a salak híg folyós állapotba hozása teszi leginkább szükségessé. A befűjt levegő korabeli térfogatáramára, mennyiségére utaló irodalmi adatot nem találtam. A

³² Kanász Tamás: A bucavas gyártására irányuló kísérletek eredményeinek bemutatása

³³ Adatok: H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

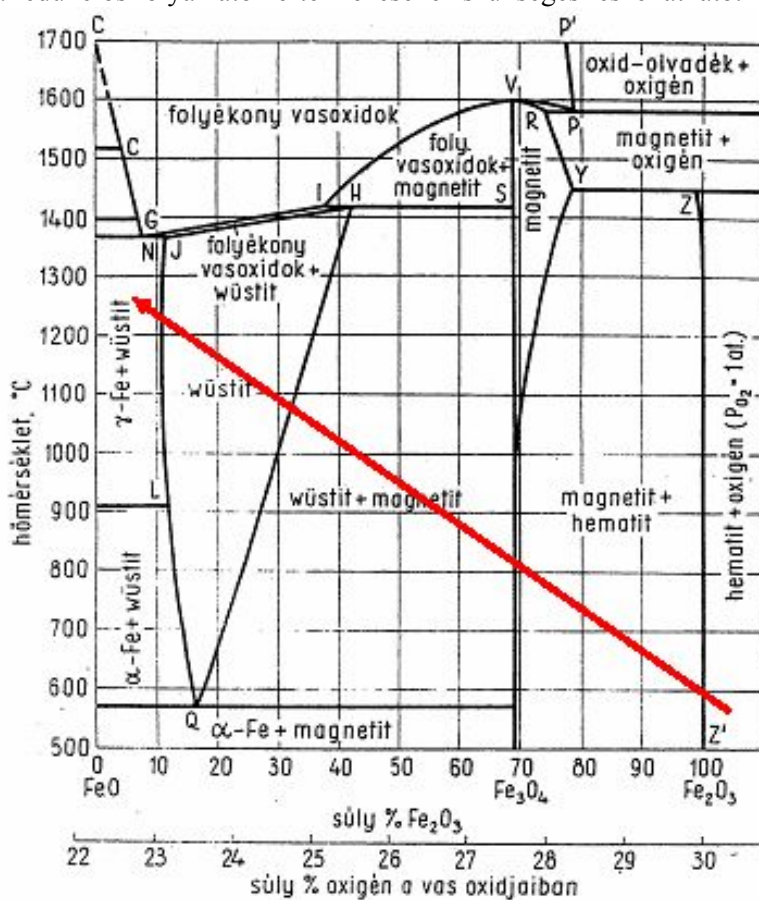
³⁴ A visszaoxidáció, úgy gondolom, erőteljesen nem mehet végbe, mert a vasszemcsék salakba vannak ágyazva, és a vascacát is nagyrészt salak veszi körbe.

napjainkban végzett próbaolvasztásoknál alkalmazott levegőmennyiség a régiekhez hasonló kohógeometria mellett 600-1000 liter/perc. Ha régészeti feltárások során Magyarországon találtak volna eredeti koraközépkori fűtatókat, viszonylag könnyen meghatározható lenne a térfogatáram. Saját tapasztalatok alapján úgy gondolom, már néhány száz liter levegő befűtésével is eredményes lehetett a kohászat. De a megfelelő hőmérséklet elérését nemcsak a befűt levegő nagy mennyisége, hanem a kéményhuzat is segíti.

II.2.2. A bucavasgyártás során lejátszódó folyamatok

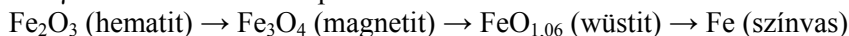
II.2.2.1. Redukciós folyamatok a bucakemencében³⁵

Az ércalapanyag bemutatásánál láthattunk, hogy az ércek nagy részét Fe_2O_3 teszi ki. Ennek színvassá történő redukciója zajlik a kohóban. Ha az ércet pörkölésnek vetik alá a kohósítást megelőzően, akkor mind a tapadt, mind pedig a kötött (hidrátvíz) nedvességet eltávolítják, így dúsítva azt. Egyenlőre tekintsünk el a meddő anyagok jelenlététől, és vizsgáljuk meg a 12. ábrát, amelyen a Fe-O fázisdiagramnak a redukciós folyamatok értelmezéséhez szükséges része látható.



12. ábra: Fe-O fázisdiagram

Kövesük végig a hematit színvassá történő redukcióját a diagram alapján! Látható, hogy a hematit oxigénleadása már 570°C alatt végbemegy és *magnetit* keletkezik. További redukció esetén 570°C feletti hőmérsékleten a magnetit *wüstit* alakul, majd 900°C alatt tovább redukálódik α -Fe-sá, 900°C felett γ -Fe-sá. A redukció lépcsőfokai tehát:



A kémiai súlyviszonynak megfelelő FeO képlet helyett $\text{FeO}_{1,06}$ wüstit fázis van jelen, ennek területét a JHQ mező jelzi.³⁶

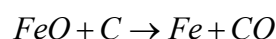
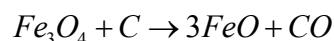
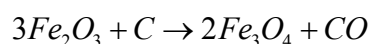
³⁵ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

³⁶ A 12. ábra alapján látható, hogy a wüstit oxigénoldó képessége jelentős a magnetithez képest.

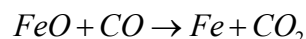
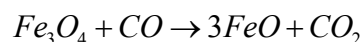
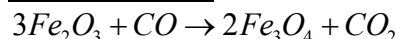
A diagramba berajzolt piros nyíl a hematitos érc állapotát mutatja, ahogyan a kohóban egyre magasabb hőmérsékleten színvassá redukálódik.

A redukció lehet direkt és indirekt, azaz történhet:

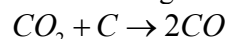
Karbonsalakkal:



Szénmonoxiddal:



A szénmonoxiddal való reakció a torokgáz CO tartalmával zajlik, alacsony, 400-600°C-os hőmérsékleten. Magasabb hőmérsékleten, 750°C felett, a karbon redukál. Az égési zónában képződött széndioxid magas hőmérsékleten az izzó szénrel reagálva a következő képen bomlik:

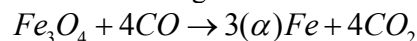


Ez az ún. *Boudouard-reakció*, amely a torokgáz magas CO koncentrációját biztosítja.

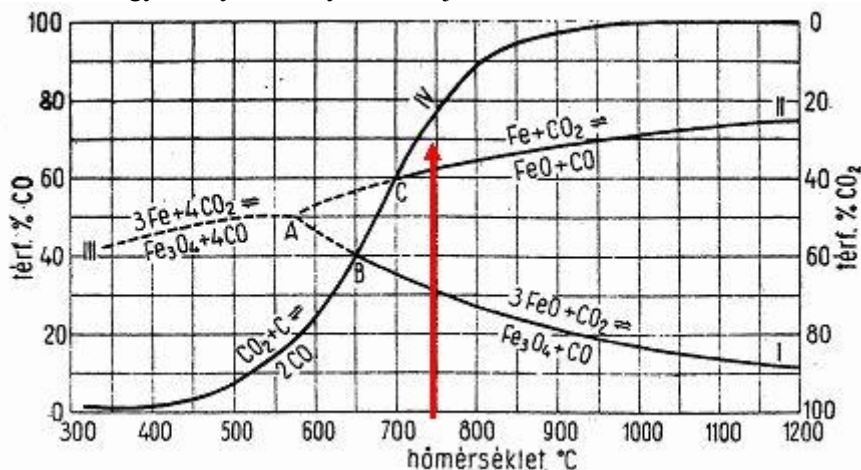
Meg kell említeni továbbá, hogy alacsony hőmérsékleten, 570°C alatt a wüstit nem stabil, magnetitre és színvasra bomlik a következő reakcióegyenlet szerint:



A keletkező magnetitet ezen a hőmérsékleti tartományon a szénmonoxid színvassá redukálja:



Az indirekt redukciók egyensúlyi viszonyait mutatja a 13. ábra:



13. ábra: A vas indirekt redukciójának egyensúlyi vonalai

Az ábráról leolvasható, hogy a torokgáz adott térfogatszázalékos szénmonoxid tartalma és adott hőmérséklet mellett milyen reakciók zajlanak le. Kövessük végig a piros nyíl által érintett állapotokat! Pl. 740°C-os hőmérsékleten, ha egyre növekszik a CO koncentráció, akkor kezdetben (30 térf.% CO-ig) magnetit tart egyensúlyt a jelölt összetételű torokgázzal. Ha a CO koncentráció tovább nő, akkor 60 térf.% CO-ig már wüstit van jelen, e felett pedig színvas jelenik meg. A diagramban látható IV. számú görbe a Boudouard-reakciót mutatja, látható, hogy a hőmérséklet emelése a CO megjelenésének kedvez.³⁷

II.2.2.2. A bucaeljárás salakjának bemutatása³⁸

Ejtsünk néhány szót az ércel bikerült salak kezeléséről! A salak kezelése egy nagyon sarkalatos pontja az őskohászati technológiának. A próbaolvasztások során a legtöbb megoldandó problémát ez vetette fel. Bartha László elmondása alapján ismerkedtem meg a koraközépkori vasgyártás

³⁷ A fúvóövi hőmérséklet emelkedésével a torokgáz CO-ban dúsulni kezd, a redukációs folyamatok szempontjából egyre kedvezőbbé válik az atmoszféra. Ez a próbaolvasztások során úgy vehető észre, hogy a torokgáz egy kis idő elteltével meggyújtható. Az égő CO lángja vörös. Ha a láng kialszik és nem gyújtható meg újra az a kohó nem megfelelő üzemét jelzi. Ezen kívül még sok „tapasztalati üzemi jellemzőt” sikerült kiismerni a próbaolvasztások során.

³⁸ Dr. Török Béla: A vasértől a vastárgyig tartó korabeli kohászati folyamatokról általában

salakkezelési problémáit is jól jellemző szólással, miszerint: „Jó salakot kell csinálni, a vas magától jön”. A salakkezelés a hematit színvassá való redukciójának megtörténte után már a salak bucától való elválasztását jelenti, aminek körülményei szakirodalom alapján világosak. A bucakohó működésének tisztázásában a hiányzó láncszem a salakos közegben végbemenő redukciós folyamatok mibenléte, amelyekre részletes irodalmi leírást nem találtam. Ezek értelmezése a próbaolvasztásokkal nyert ismeretek alapján talán már lehetséges.

A salakkal kapcsolatos folyamatokat most a régészeti lelőhelyeken megtalált minták és az irodalom alapján próbálom megvilágítani. A bucagyártás folyamatáról fizikai-kémiai és metallurgiai szempontból a salakleletekből tudunk meg a legtöbbet. Az ércek nagy SiO_2 tartalma miatt azok bázikussága (CaO/SiO_2) igen kicsi, a magas SiO_2 -tartalom viszont lehetővé tette a tiszta állapotban 1170°C olvadáspontú *fayalit* ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) keletkezését a salakban, amely olvadáspontját a többi (kis mennyiségű) salakalkotó oxid kb. $\pm 100^\circ\text{C}$ -kal változtathatta meg. Így a kézi fűjtással a bucakemencében elérhető $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$, legfeljebb 1300°C -os olvasztási hőmérsékleten képződhetett folyékony salak.

Az olvasztásból származó salakok szerkezet és szín alapján rendszerint megkülönböztethetők ún. *folyósalakként* és *kemencesalakként*. A folyósalak jól átolvadt, gyakran feketén csillogó felületű, nagy sűrűségű salak, amelyben kisebb gázlunkerek találhatók. Az olvasztás során ez a salak rendszerint kifolyt a kemencéből és annak előterében, a salakgyűjtő gödörben található meg. A kemencesalakok kisebb-nagyobb, világosabb barnás-vörös, kisebb sűrűségű, erősen tagolt, szivacszerű darabok. A nevük arra utal, hogy rendszerint a kohósítás végéig a kemencében, a buca közelében maradtak és gyakran szennyezték azt. A kemencesalak Fe_2O_3 -tartalma általában nagyobb, mint a folyósalaké, ami a fűvővi reoxidáció következménye, a SiO_2 tartalma viszont kisebb, ami annak tudható be, hogy a SiO_2 a fayalit alkotójaként hamar elfolyik a vasbuca környezetéből.

Az eddigi ismereteink alapján hozaganyagokat, amelyek a salakképződést módosíthatták volna nem használtak.³⁹ A bucavas gyártáshoz a fent elmondottak alapján viszont megállapítható, hogy a savanyú (magas SiO_2 tartalmú) ércek lehettek a kedvezők, mert csak az ilyen ércekből keletkezhett alacsony olvadáspontú fayalitos salak. Néhány feltárt salakminta összetételét mutatja a 3. táblázat.

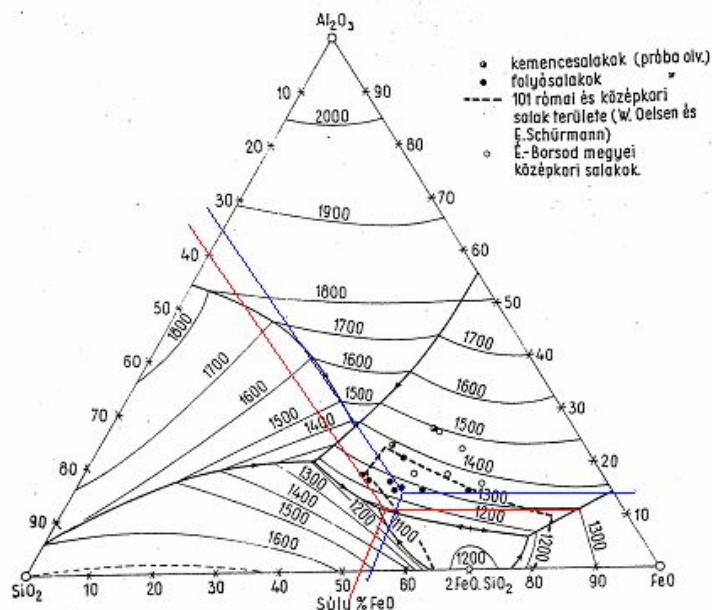
Jel	ΣFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	P_2O_5
1	42,80	51,33	4,34	27,06	7,24	4,22	1,75	3,30	-	0,50
2	27,50	33,06	2,69	36,67	11,76	7,13	2,99	4,10	-	0,61
3	47,12	47,51	14,57	23,41	3,94	2,86	0,84	0,92	1,39	0,404
4	3,08	0,88	3,42	73,49	8,86	10,13	1,36	0,26	0,27	0,74
5	42,49	52,39	2,53	26,14	6,86	1,28	0,83	4,26	1,40	0,318
6	38,75	31,64	20,24	30,16	6,06	1,79	0,77	1,50	1,32	0,22
7	43,99	43,63	14,41	25,74	4,05	4,17	3,70	3,98	-	-
8	15,05	12,79	7,31	68,14	4,03	5,66	1,60	0,26	-	-

3. táblázat: Jellemző vasérc összetételek⁴⁰

A táblázatban jól látható a salakok egy részének (1,3,5,7) fayalitos összetétele, ezek mind folyósalakok. A kemencesalakok (4,6,8) a fayalit összetételétől többé-kevésbé eltérnek, ebből adódhat a magasabb olvadáspont. A 2. minta szintén folyósalak, ennek oka kissé nehezebben értelmezhető. A salakok összetételét legjobban a $\text{FeO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3$ hármas (ternér) diagram közelíti meg (ld. 14. ábra).

³⁹ Gyakran kerül szóba meszes kőzetek szándékos adagolása, ami viszont több okból sem előnyös. A CaO (égetett mész) keletkezése CaCO_3 -ból (mészkőből) egyrészt endoterm folyamat, hőelnyeléssel jár, ezért hűti a kohót. Másrészt a CaO csak 12%-os mennyiségig csökkenti a fayalit olvadáspontját, ezen felül jelentősen emeli (pl. 40% CaO –dal már 1300°C)

⁴⁰ Kanász Tamás: A bucavas gyártására irányuló kísérletek eredményeinek bemutatása



14. ábra: A $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ rendszer olvadáspontjainak izotermái⁴¹

A diagramban kemencesalakok és folyósalakok is ábrázolva vannak (nem a 2. táblázat elemei). Itt is leolvasható az előbbi megállapítás, miszerint a fayalitos összetételhez közel álló salakok olvadáspontja kisebb az attól összetételben távol álló salakok olvadáspontjánál. A diagramba berajzolt piros vetítővonalak megmutatják az ideális, kis olvadáspontú salak összetételét, amely az 1100°C-os izotermákon belüli eutektikálisok találkozásánál van. A diagramból kiolvasható legalacsonyabb olvadáspontú salak a következő összetételű: 55% FeO , 40% SiO_2 és 10% Al_2O_3 . Ezek szerint mindenképpen kívánatos a felhasználásra kerülő érc Al_2O_3 -tartalmának alacsony szinten tartása,⁴² de a megfelelő, nem túl magas Al_2O_3 tartalom tovább csökkentheti a fayalitos összetétel 1170°C-os olvadáspontját. A kék vetítővonalak mutatják a gyakori folyósalak összetételét. A diagramból leolvasható továbbá, hogy a jelölt folyósalakok olvadáspontja 100-200°C-kal alacsonyabb a kemencesalakokénál.

Eljutottunk tehát az ércről a színvasig és megismertük a bucaeljárás salakjainak alapvető tulajdonságait, bár a buca kohóban lezajló folyamatok csak elnagyolva kerültek bemutatásra. Sajnos a mai nagyolvasztóknál szerzett ismeretek nem ültethetők át egy az egyben a buca kemencékre is. Probléma pl. a direkt és indirekt redukció menetének pontos tisztázása a buca kohóban, figyelembe véve a nagy mennyiségű salak jelenlétét is. Kérdéses a torokgáz által létrejött indirekt redukció mértéke, ill. az, hogy pontosan milyen a lezajló folyamatok kinetikája. A kérdések tisztázására a kísérleti eredmények ismertetése után tesztek próbát, ugyanis a rosszul sikerült és a jól sikerült próbaolvasztások is érdekes információkkal szolgálnak a buca kemencében lezajló folyamatok értelmezéséhez.

II.3. Bucavasgyártás napjainkban

Ha a napjainkban zajló buca vasgyártásról beszélünk, meg kell említenünk a technológia feltárására irányuló hazai és külföldi próbaolvasztásokat, illetve az eljárás természeti népek által ma is történő alkalmazását.

II.3.1. Próbaolvasztások Magyarországon és külföldön

Magyarországon a Lenin Kohászati Művek kutatói végeztek a '60-as évek elején egy 5 kísérletből álló próbaolvasztás sorozatot imolai típusú kohóban. Érc-alapanyagként kezdetben szovjet (Krivoj

⁴¹ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

⁴² Az Al_2O_3 jellemzően agyagos érc esetén magas.

Rogi) vörösvasércet, majd rudabányai ankretitet, végül az imolai régészeti lelőhelyen talált eredeti hematitos ércet használták. A próbaolvasztások kezdetben sikertelenek voltak, de az imolai ércből előbb apróbb vasrögöket, majd vasbucát is sikerült előállítani. A kísérletek során torokgáz összetételt, fűvőövi hőmérsékletet és levegőáramot is mértek. A kutatók igyekeztek az eredeti technológiával dolgozni, annak részleteit feltárni, bár a felhasznált érceket nem pörkölték, és a fűjtatást is elektromos kovácstűzi fűjtatóval végezték.⁴³

1992-ben nemeskéri típusú kohóban először történt próbaolvasztás. Ez volt a második próbaolvasztás az LKM-kísérletek óta. Gyenge minőségű (49% Fe_2O_3) limonitos ércel dolgoztak, amelyet pörkölték. 10 kg érc kohósításához 20 kg faszenet használtak fel, az olvasztás 11 órán át tartott, de nagy hőmérséklet nem sikerült tartósan elérni (1000°C-körül mozgott). Eredményül nagyrészt redukálatlan ércből álló összesült salakot kaptak, amelyben helyenként vasszemcséket, vasrögöket találtak. Ezt a tömböt egészében felhasználták a második próbaolvasztásuk alkalmával, emellett a kohóba adagoltak további 10 kg ércet 12 kg faszénrel. A próbaolvasztás során 850-1150°C közötti hőmérsékletet sikerült tartani. 10 óra elteltével vasszivacsot kaptak, amelyet azonban kis vastartalmánál fogva egészében kovácsolni nem tudtak.⁴⁴

A bucavasgyártás technológiájának feltárását célzó Tudományos Diákköri munka született a Miskolci Műszaki Egyetemen 2005-ben.⁴⁵ Kanász Tamás a TDK dolgozat készítője konzulensével nemeskéri típusú kohóban kezdték meg a próbaolvasztásokat egy régészeti lelőhelyen megtalált töérccel dolgozva. Két sikertelen kísérlet után, amelyeket leginkább a kemence tönkremenetele ill. salakkezelési problémák jellemeztek, nem történelmi kohótípussal folytatták a próbaolvasztásokat. A bucavasgyártást két lépésre bontották, elsőként az ércet redukálták mintegy 20 órás kis intenzitású fűjtatással, majd a kapott redukált vasrögökkel teli salakot újabb kohósításnak alávetve a salak kifolytatását végezték el 1-1,5 órás intenzív fűvátás mellett. A salak folyósítására SiO_2 , CaO és fahamu keverékét használták. A kísérletek során a fűvőövi hőmérsékleteket mérték. Bár az eredeti technológiát feltárni nem sikerült részleteiben, de egy 1,43 kg-os vasbucát nyertek a harmadik próbaolvasztás alkalmával, amelyet át is tudtak kovácsoltatni. Az ércet ők sem pörkölték, és szintén elektromos fűvátással dolgoztak. A negyedik próbaolvasztás ismét sikertelen volt és újabb kérdéseket vetett fel.

Bartha László az újmassai Fazola Napok keretében évente végez bucavasgyártást 2007 óta. Az ő bucakemencéje német típusú ún. *rennoffen*, amelynek jellegzetessége a medence alatt megásott salagködör. Ezt tudja a salak a faszéneken át lecsöpögve felölteni, így elválva a bucától. Ez a salakkezelés általam ismert legjobb megoldása, de a magyarországi bucakohóknál ilyen salagködör nem volt. A próbaolvasztásokat kezdetben hematitos szovjet ércel végezte, de annak nem megfelelő összetétele és szerkezete miatt csak összesült salakot kapott. A második próbaolvasztás során Debrecen mellől, Fancsikáról összegyűjtött gyepvasércet használt fel és a 6 órás kohászat alatt 1,1 kg-os vasbucát nyert, amit a helyszínen át is kovácsoltak. A harmadik próbaolvasztás ismét sikertelen volt, bár ugyanolyan kohóban, ugyanazzal az ércel dolgozott, mint a sikeres második kísérlet esetén. Az alapvető probléma itt az alacsony fűvőövi hőmérséklet volt, amely alig ment 1000 fok fölé, illetve az érc vastartalma is elmaradt a kívánatostól. Bartha László sem pörkölte az ércet és a fűvátást elektromos ventillátorral végezte. A TDK dolgozat DVD mellékletén található film (Filmek/video3) bemutatja Bartha László 2. sikeres próbaolvasztását és a nyert bucavas átkovácsolását.

Más magyarországi bucagyártásra irányuló kísérletet nem ismerek, nem találtam rá irodalmi utalást. Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy az eddigi magyarországi próbaolvasztásokkal a hazai koraközépkori vaskohászat technológiáját feltárni még nem sikerült. A megismételhető módon történő vasbucagyártás szintén várat még magára.

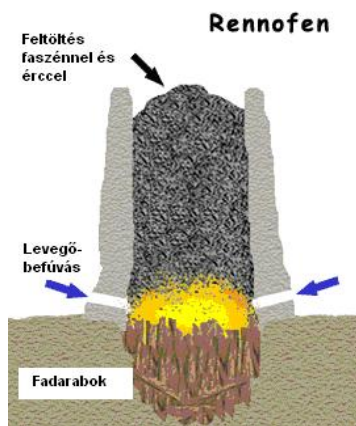
Viszont néhány szót kell ejtenünk a *rennoffen* típusú kohók (ld. 15. ábra) salakkezeléséről, mint a salakprobléma legjobb megoldásáról. Ebben a kohótípusban tehát salagködör található a medence alatt. Mivel a fűvőöv síkja a talajszinten van, a salagködörben nem alakul ki oxidáló atmoszféra, így a bele került apró fadarabok vagy faszén nem éghet el. Az apró fadarabok végül természetesen elszenesednek, de a faszén megtartja a felette lévő elegyoszlop súlyát, illetve megengedi a salaknak,

⁴³ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

⁴⁴ G.J.: Az avar kori és árpád-kori vaskohászat

⁴⁵ Kanász Tamás: A bucavas gyártására irányuló kísérletek eredményeinek bemutatása

hogy rajta keresztülszivárogya elválhasson a nagyobb vasrögöktől, és azokat szintén megtartva bucává engedi hegedni. A salagödörnek van egy optimális mérete, ugyanis a lefelé szivárgó salak fokozatosan dermed meg, ahogyan a fúvóvtól távolodva csökken a hőmérséklet, ezért a salak dermedéséig megtett útjánál felesleges mélyebbnek kiképezni. Sekélyebb azért nem lehet, mert túl hamar megtöltődne, így a salakszint elérhetné a fúvókákat, és befolyva rajtuk megdermedne, meggátolná a további levegőbefúvást.



15. ábra: A rennofen

A külföldi próbaolvasztásokról sok adat található az interneten. Általában elmondható, hogy külföldön már megoldott a viszonylag nagyméretű, tömör, kovácsolható vasbuca előállítás, bár a technológia a kísérletek többségében nem korhű. Az internetes oldalak közül egyet emelek ki. Itt a bucavasgyártás technológiai paramétereit táblázatos formában, sok próbaolvasztást bemutatva ismertetik. A kísérleti eredményekből rövid következtetéseket vonnak le.⁴⁶ Ez az oldal az egzakt adatokkal sok segítséggel szolgált. A 4. táblázatban példaként az oldalon ismertetett sikeres kísérletek egyikét emelem ki.

Dátum: 2006 márc.
Kohó: 35 -ről 30 cm-re lefelé kúposodó, 85 magas
Fúvóka: 25 mm belső átmérőjű kerámiacső
Fúvóka elhelyezése: 15 cm-re a medence aljától, 6 cm-re benyúlva a kohóba 22,5°-ban lefelé irányulva
Fűjtetés: elektromos fűjtató
Levegőmennyiség: 740 l/m
Faszén: 84 kg keményfaszén
Faszén adagolás: kb. 7 percenként 2 kg szén
Érc: 45.5 kg hematitos érc
Érc adagolás: 7 percenként növekvő mennyiségben (0,5-2,8 kg-ig)
Olvasztás időtartama: 4 és ¾ óra (+ előmelegítés)
Eredmény: 22 kg –os buca (nagy széntartalmú acél)



4. táblázat: Egy sikeres külföldi próbaolvasztás technológiai paramétere

Úgy gondolom, nagyon lényes lenne a koraközépkori vasgyártási technológia felelevenítése során a lehető legnagyobb korhűségekre való törekvés. Kritikai észrevételként a magyarországi és külföldi próbaolvasztásokkal kapcsolatban megjegyzem, hogy az elterjedt gépi fűjtással a kohászat leglényegesebb elemét változtatjuk meg, ennek alkalmazásával nem vonhatunk le valódi következtetéseket az így kapott eredményekből.⁴⁷

⁴⁶ <http://www.warehamforge.ca/ironsmelting/smelt/index.html>

⁴⁷ G.J.:Az avar kori és árpád-kori vaskohászat.. c. könyvében szintén ezen az állásponton van

II.3.2. Természeti népek modern kori bucavasgyártása

A koraközépkori vasgyártáshoz ma leginkább a természeti népek vaskohászata lenne hasonlítható. Az általuk végzett olvasztásokból lehet megtudni a korhű technológiára vonatkozóan. Bár kohóik felépítése eltér a Magyarországon talált korai bucakohóktól, bizonyára nem hatottak rájuk olyan „tévútra vezető ismeretek”, amiket a mai nagyolvasztók működésének analógiájára akarnának az őskohászatra erőltetni, ellentétben a nyugati próbaolvasztásokkal. Ha tehát célunk a koraközépkori korhű bucavasgyártás technológiájának felelevenítése, mindenképpen jobb támpontot nyújt ehhez a természeti népek kohászata, mint a modern kori próbaolvasztások.

1963-ban német kutatócsoport járt Csádban, ahol egy ottani koházmester munkáját dokumentálták. A teljes technológiai sorról filmet készítettek, amelyben a faszén égetéstől kezdve a vastárgy elkészültéig mutatják be a lépéseket. A csádi koházmester által használt kohó a már említett rennoffenhez nagyon hasonló. A kohó kb. 1,5 méter magas, a salakgödör további 1 méter mély. A felhasznált ércről a filmhez melléklet hivatkozás nem tartalmaz információt, de a film alapján valamilyen limonitos barnavasércről lehet szó. Az ércet a kohóba helyezés előtt nem pörkölik, de a kohó elég magas ahhoz, hogy a kiszélesedő torok felső szakaszán lassan süllyedő érc pörkölődése megtörténhessen. Az ércet és a faszenet rétegesen adagolták be a kohóba. Az olvasztást megelőzően kb. 1 órán keresztül előfűtik a faszénnel feltöltött kohót. Az első réteg érc feltételétől számított 3,5 órán keresztül szakaszosan folyt a süllyedő elegyoszlop utánpótlása faszénnel és ércel. Ezután megvárták, amíg az elegyoszlop leég a fűvőövig, ez további kb. 2 órát vett igénybe. A kohót másnap reggelig hagyták kihűlni, majd szétverték, és kiemelték belőle az inkább összesült salakot, mint vasbucát. Ezt szétverve kiválogatták belőle a kisebb vasrögöket, amelyeket a II.1.2.2. pontban leírtak szerint tűzihegesztettek.⁴⁸

A következő olvasztást, amit bemutatok egy Etióp kovácmester végezte már napjainkban (talán 2007-ben). A filmből kiderült, hogy ez volt az utolsó olvasztása, mivel a közelből már könnyebb lesz fémhulladékot beszerezni, mint a körülményes kohászatot végezni. A koházmester a rennoffenhez hasonló kohóban dolgozott, salakcsapolásra neki sem volt szüksége. A felhasznált érc minőségére most sem tudunk pontos választ adni, a film erre nem tért ki, de szintén valamilyen barnavasércről lehet szó. A kohászat időtartamára sincs pontos adat, kb. fél napos lehetett. A faszenet és az ércet itt is rétegesen adagolták a kohóba az elegyoszlop süllyedésének megfelelően. A kohót másnapig hűlni hagyták, majd a kiemelt salakdarabokból kikalapálták a vasrögöket. Tömör vasbucáról itt sem beszélhetünk, a vasdarabokat, bár a film nem mutatja, valószínűleg a csádi koházmesterhez hasonlóan kovácstűzi hegesztéssel egyesít.⁴⁹

⁴⁸ G. Wolf: Bau eines rennoffens und Verhütten von Eisenerz, Göttingen 1971 és DVD melléklet Filmek/video1

⁴⁹ DVD melléklet Filmek/video2

III. CÉLKITŰZÉSEK

1. Elsődleges célom a bevezetőben is említett koraközépkori bucavasgyártás hazai technológiájának felelevenítése, megismerése volt, ezért igyekszem az irodalomkutatás alapján felvázolt korhű eljárások minél pontosabb rekonstruálására. A hazai technológián a Magyarországon feltárt kohótípusokban végzett próbaolvasztásokat, és magyarországi gyepvasérc lelőhelyek felkeresését értem.

2. Munkám legfontosabb célja a bucavas előállítása volt azzal a feltétellel, hogy az eredeti módszerektől legfeljebb kis mértékben térjek el (csak annyira, mint amennyire arra a régieknek is lehetősége nyílt).

3. A reprodukálhatóság, azaz a bucavas előállításában olyan jártaságot szerezni, amellyel legalább egyazon lelőhely ércét ismételten sikeresen kohósítani tudjam.

4. Fontos célkitűzés volt, hogy a reprodukálható technológia minden olyan részletét dokumentáljam, amely az irodalomból hiányzik, és csak tapasztalati úton szerezhető meg. Ezzel segítve a későbbi reprodukálhatóságot, és olyan információt szolgáltatva, amelyek csak régészeti és elméleti úton nem szerezhetők meg.

5. A bucaeljáráshoz kapcsolódó technológiákat szintén szeretném feltárni, megvalósítani, részben az irodalom alapján, részben a menet közben szerzett információk felhasználásával. Gondolva itt a faszén égetésre, ércpörkölésre, fűjtató készítésre.

6. A próbaolvasztások tapasztalatai alapján a bucakemencében lejátszódó folyamatok termodinamikai értelmezése, kicsit közelebb jutva a részletek megértéséhez.

IV. A BUCAVAS ELŐÁLLÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIAI LÉPÉSEI A MEGVALÓSÍTÁS TÜKRÉBEN

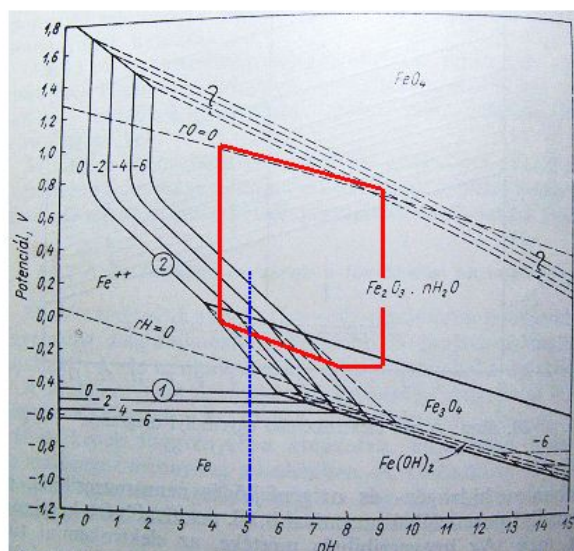
IV.1. Ércbányászat

IV.1.1. Vaskörforgás a természetben⁵⁰

A vaskörforgás a természetben ugyanolyan körfolyamat, mint a közismert víz- vagy szénkörforgás.

A gypvasérc keletkezéséhez vezető folyamatok közül kettőt említek meg. A vas főleg humát alakban,⁵¹ kolloid oldatként vándorol a talajban. A Fe^{3+} humátot a mikroorganizmusok (*vasbaktériumok*) bontják el és hoznak létre belőle limonitot. Így részben bakteriális hatásra, részben pedig a pH növekedésének kémiai kicsapó hatása miatt jönnek létre a szárazföldön babérc, a mocsarakban gypvasérc és mocsáérc.

Részben a pH változása játszik szerepet a másik vasércképződési folyamatban is. Az oldott vasban gazdag vizek vastartalma kiválik lúgosító és oxidáló hatásra. A természetes vizek elvasasodását vízben oldódó vasvegyületek okozzák. Ha a vasoldat szabad oxigénnel találkozik, akkor ferrihidroxid alakban kicsapódik, és abból limonit keletkezik, amely már a további oxidációnak ellenáll. A vas megjelenési formáit a 23. ábrán látható vas-víz rendszer pH-potenciál diagramja (*Pourbaix-diagram*) szemlélteti. Az ábráról a fent leírt keletkezési módok is levezethetők.



16. ábra: A Fe-H₂O rendszer pH-potenciál diagramja⁵²

A diagramba berajzolt piros poligon a Föld felszínén kialakuló leggyakoribb pH-V állapotokat mutatja. Az ábrából látható, hogy fémes vas csak csekély redoxipotenciálokon, pl. 10⁻² Mólos hígításban -0,44 volt alatt létezhet, így főleg csak a Föld mélyben, de nem a felszínén. 10⁻² Mólos koncentrációnál oldott vas (Fe^{2+} - és Fe^{3+} -alakban) -0,44 volt redoxipontenciál felett savas közegben van jelen, de az ábrán látható, hogy a vas kiválásának kedveznek az oxidációs viszonyok és a lúgos közeg. Savas patakokban, vízfolyásokban, mint természetes szellőző vizekben a redoxipotenciál 0,25-0,3 volt értékű, tehát magas oldott vastartalom alakulhat ki, amelyből az említett kicsapódást segítő körülmények között egyes helyeken limonitos érc keletkezik. Az ábra alapján a savas vizű patakokban lejátszódó vasoldás a berajzolt kék szaggatott függőleges mentén is magyarázható. Ha a pH 5-körűli, akkor a színtvasat, pl. termésvasat a hidrogénionok korrodálják, oxidálják, így Fe^{2+} és H_2 keletkezik, ugyanis a hidrogén elektródpotenciálja magasabb a vasénál az adott pH mellett. A hidrogén elektródpotenciálját az $rH=0$ ferde egyenes szemlélteti (1 atm. hidrogénnyomás mellett), amely 5 pH-nál minden vasion aktivitás esetén a vas elektródpotenciálja felett van.

⁵⁰ Dr. Füleky György: Geofizikai körfolyamatok (környezetmérnök MSC-s hallgatók részére)

⁵¹ A humátok olyan szerves makromolekulák, amelyek speciális komplexképző tulajdonsággal rendelkeznek.

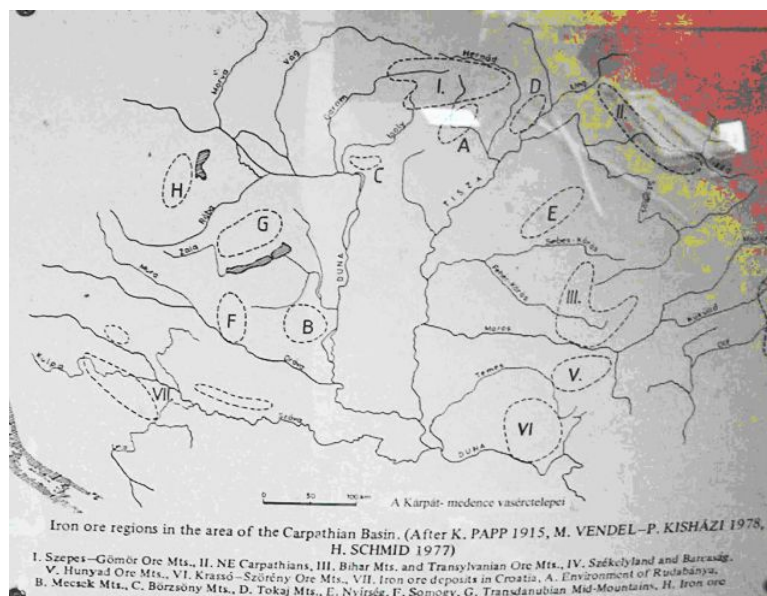
⁵² Dr. Kovács Klára: Korrózióvédelem

Összefoglalva a fentieket, a gyevasércet korábbi vagy jelenleg is mocsaras, pangó vizes helyeken, illetve vasas vizű patakok közelében találhatunk. Néhány gyevasérc lelőhelyet a következőkben mutatok be.

IV.1.2. Gyevasérc lelőhelyek

Amikor 2008 novemberében az őskohászat kutatásába belekezdtem az első megoldandó probléma a gyevasérc keresés volt. Gyevasérccel legelőször Molnár József fancsikai kovácsmester műhelyében találkoztam egy műhelylátogatás alkalmával. Ő a környékről szedett össze Bartha László próbaolvasztásaihoz megfelelő mennyiségű ércet, amely mint később kiderült, meglehetősen jó minőségű, bucakohászatra alkalmas volt.

De hol található Magyarországon a bucavas gyártáshoz megfelelő alapanyagul szolgáló gyevasérc lelőhely? Vegyük szemügyre a 17. ábrát, amelyen a kárpát-medencei gyevasérc lelőhely régiókat láthatjuk.



17. ábra: Gyevasérc lelőhelyek a Kárpát-medencében⁵³

Az ábrán látható gyevasércek közül én legelőször a nyírségit (az ábrán az „E” terület) kerestem fel, mert ez esett legközelebb a lakóhelyemhez. Internetes információk és geológus ismerős tanácsa alapján látogattam meg a Kék-Kálló patak völgyét, ahol gyevasérc lelőhelyre találtam. A gyevasérc megtalálása ezen a lelőhelyen igen nehéz, ugyanis a talajszinten nem látható jellegzetes ércbívás. Hosszú ideig tartó terepbejárás során lettem figyelmes egyes helyeken a vakondtúrákban kibukkanó vasborsókra. Az ércrögöket tartalmazó vakondtúrák többsége a Kék-Kálló patak egy vékony mellékerének partoldalában volt. A partfal megbontásával nagyobb ércdarabokat lehetett a földből kifordítani, így néhány óra alatt hozzávetőlegesen 50 kg gyevasérccet gyűjtöttem össze. A Kék-Kálló völgyében a gyevasérc lelőhelyen készített képek a DVD mellékleten a Képek/Gyevasérc lelőhelyek/Kék-Kálló völgye mappában találhatóak.

A Kék-Kálló völgyében talált gyevasérc összetétele végül nem bizonyult megfelelőnek, egyetlen vele végzett próbaolvasztás sem volt sikeres, csak apró vasgolyócskák keletkeztek belőle. Ebből arra következtettem, hogy valószínűleg túl kicsi lehet a vastartalma. Emellett a salakja sem volt jól kezelhető, magas olvadáspontú, nagyon viszkózus volt.

Ekkorra már Bartha László sikeres olvasztást végzett a fancsikai ércel, így én is megpróbáltam a Fancsikai, a helyiek által „vasereknek” nevezett vízfolyások partoldalából összeszedni a jó minőségű gyevasérccet. Fancsika mintegy 30km-re található a korábban említett Kék-Kálló völgytől. A lelőhely megtalálásához Bartha László pontos útmutatást adott. A fancsikai Bodzás-ér partfalában ércbívás

⁵³ A Somogyfajszai Kohómúzeumban készített saját felvétel

található, amelybe a korábbi mederkotrások alakalmával belemartak és az iszapos talajjal együtt a part mindkét oldalára kihánytak.

A környékbeliek elmondása szerint Fancsikán sok helyen található „vaskő réteg” a föld alatt kis mélységben, amelybe gyakran beleütköznek mélyszántáskor, kútásáskor, stb. A réteg vastagsága nem egyenletes, van ahol teljesen eltűnik, de van ahol több 10cm vastagságban mutatkozik. A Bordás-ér medrébe egy alkalommal lemásztam, és a partfalat megászva a talajrétegekről kapával metszeteket készítettem. Ezeken nagyon jól látszottak a talajban kialakult vízjáratok, a növényi gyökerekre kivált limonitos cseppkőszerű képződmények. Ezekről és a lelőhelyről készült képek a DVD melléklet a Képek/Gyepvasérc lelőhelyek/Fancsika mappában találhatók.

A Fancsikán található gyepvasércnek külsőleg teljesen megegyeznek a Kék-Kálló völgyével, de attól különböző összetételűek. Nem minden Fancsikán előforduló érc alkalmas a kohósításra. A próbaolvasztások során sikerült kitapasztalni, milyen kinézetű és szerkezetű érc a megfelelő. A jó érc az, amely nagyjából diónyi, lúdtójásnyi méretűek és felületük rücskös. Ezeket kell a földből kikaparni, majd félbe törni. Ha a törés nehéz, a töret szilánkos, a szerkezet nem porózus, akkor mindegy milyen töretet látunk, az érc nem jó. Ha a töret minél nagyobb felületen fekete, szürkés-kék akkor a legjobb minőségű a gyepvasérc, de én azokat a darabokat is felhasználtam, amiknek a felületét legalább 50%-ban feketének, szürkés-kéknek láttam.⁵⁴ Egy jó és egy rossz minőségű érc töretét mutatom a 18. ábrán.



18. ábra: Jó (felső) és rossz (alsó) gyepvasérc törete

A felső két fél a jó minőségű gyepvasérc darabja. Látható, hogy a belseje szinte homogén szürkés-kék. Itt az érc töretének kerülete vastagon barnás színű, nagyrészt meddő anyagból, SiO_2 -ból áll, kisebb részt limonitból, így a kohósítás során szinte csak salak képződik belőle. Ha ezt a részt is felhasználjuk, akkor a vaskihozatalunk jelentősen romlik, ugyanis a SiO_2 2FeO -val képi a folyósalak fayalitját, eszerint ha sok SiO_2 -ot tartalmaz az érc, akkor sok fayalit keletkezik, ami folyósalak formájában elviszi a vasat (ld. II.2.2.2.), így a buca keletkezéséhez kevesebb színvas áll rendelkezésre. Törekedni kell tehát az olyan gyepvasérc darabok kiválogatására, amelyek törete nagyobb részt szürkés-kék. A fent leírtak alapján már érthető, miért nem használható fel az alsó két gyepvasérc darab.

Amikor gyepvasércet gyűjtöttem Fancsikán, mindig volt segítségem is. Ketten kb. óránként 10 kg ércet tudtunk kitermelni, a munka nagyon haladatlan, fáradságos volt. A kitermelt ércet csak mintavételes ellenőrzéssel vizsgáltuk, hogy megfelelő minőségű-e. Ez minden alkalommal nagyon sok rossz összetételű darab begyűjtésére vezetett, a későbbi válogatás és aprítás során mintegy kétharmada az összegyűjtött ércnek veszendőbe ment. A további ércgyűjtéseket egybe kell kötni sokkal részletesebb előválogatással is, a régiek bizonyára szintén így járhattak el.

⁵⁴ Sok olyan ércet lehet találni, aminek a törete szintén szürkés-kék, de nagyon nehéz széttrönni. Ezek túlságosan kvarcos rögök, nem szabad őket felhasználni. A 7. próbaolvasztás alkalmával csupa ilyen ércel dolgoztam (mintegy 11 kg-nyit kohósítottam), de az eredmény teljes kudarcc volt, a vastartalma ennek az ércnek kicsi, a salakja nagyon nehezen olvad.

A harmadik lelőhely, amit bemutatok a 24. ábra „F” jelzésű somogyi régiójában található. Irodalom szerint Somogyszob és Nagyatád között van Magyarország legjobb minőségű gyepvasérc lelőhelye, ahol a minőség alatt a magas vastartalmat kell érteni.⁵⁵ A kb. 1,5-2 méter mély patakmeder két oldalában mintegy fél méter vastagságú érc kibúvás volt megfigyelhető. A patakmederben emberfej nagyságú gyepvasérc görgetegeket mozgatott a víz, amelyek feltételezhetően korábbi áradások alkalmával a partfalból kitöredezve, vagy a patakvíz alámosó hatása miatt kerülhettek a mederbe. A gyepvasérc összetétele nem mindenhol volt megfelelő. A már korábban említett nagyrészt szürkés-kék töretű ércet kerestem itt is, viszont ezekben az ércekben ez a szürkés-kék színezet nem olyan homogénen jelentkezett, mint a fancsikai ércben, hanem sötétvörös mátrixban vékony erek formájában. Más részein viszont az érc világosabb színű volt, az ilyeneket a fancsikai lelőhely tapasztalatai alapján már az aprítás során kiválogattam, és nem használtam fel a későbbi kohósításra.



19. ábra: Somogyszobi gyepvasérc törete (a baloldal kellően „vasas”)

A 19. ábrán látható gyepvasérc rög fej nagyságú, baloldala megfelelő minőségű, jobboldala nem. Az érc szerkezete a fancsikaihoz hasonlóan porózus, de jóval nagyobb lyukak találhatók benne, így meglepően könnyűek még a nagyméretű darabok is. A patakmederből gond nélkül kitermelhető a gyepvasérc, de ügyelni kell arra, hogy csak a megfelelő töretű darabokat szállítsuk el. Somogyszobon második ottjártam alkalmával 30 perc alatt 200 kg ércet tudtam összeszedni, jóval kevesebb munkával mint Fancsikán, de az aprítás során ebből mindössze 80 kg-nyi bizonyult kohósításra alkalmasnak.

Somogyszobon a helyiek elmondása szerint minden patakmederben található több-kevesebb gyepvasérc. Említettek továbbá egy őslápot, amely a falutól nem messze található. A gyepvasérc keletkezési helyeinek leírásánál tárgyalt pangó vizes terület is szóba került, így az ősláp ideális célpont lenne egy következő gyepvasérc keresés alkalmával.

Még egy lelőhelyről kell említést tenni. A somogyfajszói kohómúzeumtól nem messze a Korokna-patak medrében is kutattam gyepvasérc után.⁵⁶ Gazdaságosan kifejtendő érc telérre nem találtam, nagyobb gyepvasérc rögöket azonban sikerült a mederfalból kifordítani. Erről ld. DVD melléklet Képek/gyepvasérc lelőhelyek/Korokna-patak

Összességében elmondható, hogy a legrosszabb minőségű gyepvasérc a Kék-Kálló völgyben volt, vastartalma kicsi, salakja szinte kezelhetetlen. A fancsikai már bucaeljáráshoz alkalmas, de sok salakot ad, belőle rossz a vaskihozatal. A Somogyszobi érc a legjobb minőségű. A 9. próbaolvasztás során az innen kitermelt ércel dolgoztam, és kiderült, hogy a vastartalom valóban jóval magasabb, mint a fancsikai érc esetében, illetve folyósalak csak kis mennyiségben keletkezett. Sem a Kék-Kálló völgyi, sem pedig a fancsikai lelőhely nem történelmi lelőhely⁵⁷, azaz nem találtak arra bizonyítékot, hogy a korai középkorban nagy mennyiségben használták volna a környék érceit és kohótelepet sem tártak fel ebben a régióban. Ezzel szemben a Somogyszob és Nagyatád között húzódó gyepvasérc lelőhelyről folytattak kitermelést a régiek.

⁵⁵ Somogyfajszói kohómúzeumban az egyik információs leírásban említik.

⁵⁶ Beier László a somogyfajszói kohómúzeum gondnokának elmondása alapján

⁵⁷ Egy fancsikai téhépásztor említette, hogy ismeretei szerint az 1848-49-es szabadságharc idején a vasigény fedezésére kohósították a helyi gyepvasércet is.

IV.2. Az érc dúsítása

A kibányászott ércet többnyire jelentős meddő anyag tartalommal szállítottam el a lelőhelyről. Az érc dúsítását feltétlenül el kell végezni a kohósítás előtt. Ezt három lépésben tesszük.

Az első lépés az érc *mosására*, amire (mivel minden esetben vízfolyás mellett találtam) már helyben lehetőség volt. Ezzel a művelettel a meddő anyag nagy részét (agyagot, homokot, sarat) el lehetett távolítani a felületről. Úgy jártam el, hogy a fonott kosárba tett ércdarabokat a patakvízbe merítettem és ide-oda mozgattam. A mosás főleg a nagyobb fajlagos felületű apró szemű fancsikai és Kék-Kálló völgyi ércnél volt fontos, a Somogyszobi érc kis fajlagos felülete miatt kevés megtapadt sárral, iszappal volt szennyezve.

A következő lépés az *aprítás* volt. Ez nem nevezhető a klasszikus értelemben vett dúsításnak, de mivel az érc válogatását is ekkor végeztem el, én ide sorolom. Az aprítás során ugyanis sokszor egyazon darab gyepvasércnek sem volt minden része megfelelő a kohósításhoz, pl. ld. 19. ábra. Általában az egy alkalommal összeszedett ércnek harmada, negyede volt kellően jó minőségű. Kb. 2-4 cm-es darabokra törtem össze a rögöket, de több szakirodalmi leírás szerint is⁵⁸ az aprítás foka ennél nagyobb kellett volna, hogy legyen. Nekem viszont az derült ki, hogy az érc porózus szerkezete miatt, a lúdtojásnyi méret alá menni sem igazán szükséges. A természeti népek kohászatát bemutató filmekben is néhány csak cm-es méretig aprítják az ércet. Az igazán jó szerkezetű, porózus darabokat sokszor már kézzel is törni lehetett.

A harmadik, befejező művelet az aprított érc *pörkölése*. Ennek során egy ércpörköltő gödörben faszén parázson hevítjük az ércet abból a célból, hogy a kémiaiilag kötött hidrátvíz tartalom nagy részét még a kohóba helyezés előtt eltávolítsuk belőle, így tovább dúsítva azt. Arra, hogy a régiek is végeztek pörkölést, bizonyítékot nyújtanak a feltárt kora középkori kohótelepeken talált *ércpörköltő gödrök*.⁵⁹ Az érc pörkölését a következőképpen végeztem: Ástam egy tányér alakú kb. 1 méter átmérőjű mélyedést a földbe, amit agyaggal 1-2cm vastagon kikentem. Erre azért volt szükség, hogy sima felületet kapjak, így a későbbiekben a pörkölt érc nem keveredhet össze földdel, agyagdarabokkal. A kikent aljzatú gödörben akkora tüzet raktam, ami után elegendően sok izzó parázs maradt vissza a pörköléshez. Minden esetben az aznapi kohósításra szánt előre megtört érc teljes mennyiségét egyszerre pörkölttem meg. Ez általában 10-14 kg között volt. Tapasztalat szerint a pörköléskor megfelelő parázs (faszén) érc arány 1:1 térfogat (!) arány körül van, de a parázs javára eltérni természetesen nem árt. Az aprított ércet össze kell keverni a gödörben az izzó parázzsal, és néhány órán át hagyni, hogy a pörkölődés megtörténjen.

A pörkölés során a vasérc látható változáson megy keresztül, így az eredményesség szemmel is ellenőrizhető, ugyanis az eredetileg barna színű limonit hematittá pörkölődik, ezt vörösre színeződés kíséri, ld. 20. ábra.



20. ábra: A pörkölés eredményeképpen vörösre színeződő érc

⁵⁸G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat és H.-N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

⁵⁹G. J.: Az Avar kori és Árpád kori vaskohászat

A pörkölés során emellett más kohósítás szempontjából hasznos folyamatok is végbemennek, amelyek közül most négyet emelek ki. Néha megfigyeltem a limonit magnetitté redukálódását már az ércpörkölő gödörben. Ez úgy jelentkezett, hogy mágnessel közelítve az ilyen gyevasérc darabokhoz enyhe vonzást tapasztaltam. Tehát az egyik fontos folyamat az érc előredukálása.

Az érc emellett a gödörben hamuval is keveredik. A II.2.1. pontban leírtak szerint a fahamunak jelentős CaO tartalma van, amely a fayalit olvadáspontját csökkenti (hacsak nem már eleve túl nagy mennyiségben van jelen az ércben, de ez a somogyszobi ércet leszámítva nem volt jellemző). A 20. ábrán látható, hogy a pörkölt ércdarabok felületét fahamu borítja. Az ércpörkölő gödörben sokszor több marék fahamu is visszamarad, amely az ércel keveredhet. Ha a régiek az érc fahamuval való keverését a kohósítás során tudatosan nem is végezték, minden bizonnyal a pörkölés során bekerült fahamu segíthette a munkájukat.

A harmadik hasznos jelenség az ércdarabok keveredése a faszénnel. A II.1.2.4. pontban felvetett kérdés, hogy vajon rétegesen, vagy faszénnel keverve adagolták-e a kohóba az ércet, pörkölés esetén értelmét veszti.

Az ércpörkölőből kikerült elegy előmelegítve kerül a kohóba, az érc közötti faszén még a kohászat végén, 4-5 óra elteltével is parázslík. A kohó hőtechnikai folyamatai szempontjából, úgy gondolom ez mindenképpen előnyös.

Bár az érc pörkölésére a természeti népeknél a DVD mellékleten bemutatott két film alapján nem látunk példát, a fent említett járulékos folyamatok miatt mindenképpen érdemes elvégezni. Meg kell jegyezni, hogy a pörkölődés végül is a kohó torokrészének felső szakaszán végbemegy, de ott koránt sem tartózkodik olyan hosszú időn keresztül az érc, mint az ércpörkölő gödörben tenné. Ha a kohó magas, a torokrész hosszú, akkor a pörkölődés is hosszabb ideig tarthat, de ilyen magas kohókra csak a bemutatott filmekben látunk példát, a hazánkban feltártak ennél jóval kisebbek voltak.

Az ércpörkölésről további képek találhatóak a DVD melléklet Képek/Pörkölés mappában.

IV.3. Faszénégetés

A kohászat jelentős faszénigényét a régiek faszénégető boksákból fedezték. Faszénégető boksák helyét néhány kohótelep körül szintén megtalálták.⁶⁰

A hagyományos módon, faszénégető boksában sikerrel végeztem a faszénégetést, de a dolgozat terjedelme nem teszi lehetővé az eljárás részletes ismertetését. A kezdeti próbaolvasztások során fedezni tudtam saját égetésű faszénnel a szükséges tüzelőanyag mennyiséget. A faszénfogyasztásra óránként 7-8 kg szénnel számolhattunk, így próbaolvasztásonként kb. 25-30 kg szén kellett. A későbbi olvasztások faszénigényének fedezésére már kereskedelmi forgalomban kapható bükkfaszenet használtunk. A faszénégetésről a DVD mellékleten további képek láthatók a Képek/Faszén égetés mappában.

IV.4. Fűjtató készítés

A korszépkori kohók többsége már nem természetes huzattal működött, mesterséges fűjtásra volt szükség a salak kifolytatásához elegendően magas hőmérséklet eléréshez.

A DVD mellékleten látható természeti népek kohászatát bemutató filmekben egy bőrtömlő-szerű fűjtatót és egy fölbe ásott, kecskebőrrel borított kerámiaedény fűjtatót ismerhetünk meg. Ezek egyenként teljesítménye bizonyára még a 100 liter/ perces térfogatáramot sem érte el, bár mindig többet használtak belőlük.

Nekem is el kellett készíteni tehát egy korhű koraközépkori fűjtatót. Támpontként a somogyfajsi kohómúzeumban kiállított replikára és Georgicus Agricola: De Re Metallica című könyvére hagyatkoztam. Követelményként a fűjtónak legalább 400 liter/perces levegő térfogatáramot kellett biztosítani. Ezt a levegőmennyiséget a külföldi próbaolvasztási leírások alapján határoztam meg.⁶¹ Az elkészült fűjtató a 22. ábrán látható. További képek találhatóak a fűjtatókészítésről a DVD melléklet Képek/Fűjtató készítés/Kisfűjtató készítés mappában.

⁶⁰ Gallina Zsolt: Avar kori kohótelep Kaposvár-Fészerlakon

⁶¹ <http://www.warehamforge.ca/ironsmelting/smelt/index.html>

A kezdeti próbaolvasztások alkalmával ezt a fűjtőt használtam. Egy fúvásra kb. 20 liter levegőt fűjt ki, így intenzív fűjtás esetén (percenként 30 pumpálás) a térfogatáram elérte a 600 liter/perces értéket, azonban a munka nagyon kimerítő volt, hosszasan ilyen intenzitással nem lehetett fűjtetni. Kénytelen voltam áttérni egy nagyobb fűjtatóra, ami kevésbé intenzív fűjtás mellett is produkált hasonlóan nagy térfogatáramot. Ez egy 110 éves kovácsfűjtató volt, amit korábban újítottam fel (ld.21. ábra).



21. Kovácsfűjtató használata a hatodik próbaolvasztáson

A kifűjt levegő térfogatáramát a fűjtató felső lapjára elhelyezett súlyokkal lehetett szabályozni. Ha nagyobb súlyt helyeztünk fel, a térfogatáram nőtt. Általában súly nélkül vagy 10kg-os súllyal fűjtattunk. A próbaolvasztások előrehaladtával egyre inkább világossá vált, hogy nincs szükség olyan nagy levegőmennyiség befűtésére, mint azt kezdetben gondoltam, így a későbbiekben a kisebbik (korhű) fűjtatóra való visszatérést tervezem. A fűjtató készítéséről, felújításról képek láthatók a DVD mellékleten.

IV.5. Kohóépítés, fúvókakészítés

A kohótelepeken feltárt kis bucakemencék általában durva szemcséjű homokkal, esetleg kavicsokkal soványított agyagból készültek.⁶² A próbaolvasztásoknak helyéül egy Karcag határában lévő tanya szolgált. A tanya területén korábban téglagyár volt, a megtalálható agyag kiváló minőségű. Ezzel az agyaggal kezdtem dolgozni, először soványítás nélkül, de a száradás során jelentkező repedések miatt a zsíros agyagot durva szemű homokkal, fővénnel kellett soványítani. Az agyagot és fővényt megközelítőleg 1:2 tömegarányban kevertem össze egy sárvető gödörben, így általában még 3-4 cm falvastagságoknál sem zsugorodott annyit száradáskor, hogy repedés keletkezzen rajta, nagyobb vastagságok esetén azonban már igen. Ezt úgy lehetett megakadályozni, hogy földnedves állapotban kellett építeni belőle a kohót, így csökkentve a zsugorodást okozó, későbbiekben eltávozó víz mennyiségét. A megépült kohót nyáron 1 hétig, tavasszal és ősszel 2 hétig hagytam száradni, majd a kohászat napján a begyújtást néhány órás „lassú” tűzzel való előmelegítéssel kezdtem. Ha a száradás nem volt teljes, akkor a keletkező gőz egyes helyeken repedéseket okozott. A repedések, keletkezzenek azok a száradás során vagy a felfűtéskor, mindenképpen károsak a kohó működése közben, mert rajtuk keresztül levegő kerülhet a kohóba. Így a benti atmoszférát helyenként redukálóból oxidáló irányba viheti át, illetve a hő kiszökését okozhatja.

Az első két próbaolvasztás alkalmával szabadonálló, nemeskéri típusú kohót építettem (ld. 22. ábra).

⁶² H.-N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története



22. ábra: Az első próbaolvasztás nemeskéri típusú kohója, és ugyan ez a típus földel takarva a második próbaolvasztás során

A nemeskéri típusú kohó nagy hátránya a jelentős hősugárzás, amely a viszonylag vékony (a medence részen 8-10cm, a toroknál 3-5cm) falazat miatt alakul ki, ezért a hőveszteségek nagyok. A második próbaolvasztást Bartha Lászlóval közösen végeztük, ennek alkalmával a fűvósíkban kialakuló hőmérsékletet úgy próbáltuk emelni, hogy földdel vettük körbe a kohót, így mérsékelve a hősugárzást (ld. 22. ábra). A veszendőbe menő hőre jellemző, hogy a földtakarás is mintegy 3-4 cm vastagon kiégett a kohó körül.

A következő próbaolvasztások mindegyikét már somogyfajszi (vagy zárt mellű imolainak nevezhető) típusú kohóban végeztem. Ennek legfontosabb jellemzője, hogy egy műhelygödör oldalfalában kerül kialakításra (ld. 6. ábra), így a hősugárzással elvitt hő jelentéktelen. A tanyán már korábban megépítettem egy hagyományos kovácsműhelyt, magas kéményű kovácstűzhellyel, műhelygödörrel, nádtetővel, ennek egyik szabad oldalában építettem meg a kohót (ld. 23. ábra).

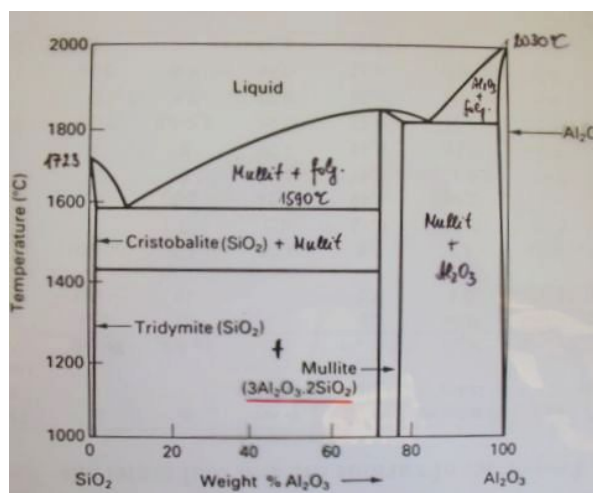


23. ábra: A műhelygödör és a fajszi típusú kohó

A harmadik próbaolvasztástól kezdve minden alkalommal ezt a kohót használtam. A próbaolvasztások után a kohó mellfalát ki kellett törni, a salakot és vasbucát kivenni, majd a kohót belül kitakarítani. Gyakran előfordult, hogy a falazatra salak tapadt fel, ilyenkor azt a falazat egy darabjával együtt lehetett csak eltávolítani. A kohó helyreállítását tehát minden próbaolvasztás előtt el kellett végezni, ami új mellfalazat építéséből, esetleg a kemence belső falazatának helyenkénti újrakenéséből állt. Mivel minden kohászat után viszonylag kevés (kb. fél órá) munkával könnyedén helyre lehetett állítani a kohót, úgy tűnik akár több tíz olvasztás elvégzését is kibírhatták a hasonló

kialakítású korabeli bucakemencék.⁶³ Néhány jellemző kemencefal-rongálódást mutatok be a DVD melléklet Képek/Kemencefal mappában található fotókon.

A levegő befűvése a kohóba fűvókán keresztül történik, amelynek ellen kell állnia a bent uralkodó magas hőmérsékletnek. A fűvókákat ugyanolyan geometriával és módszerrel készítettem, mint az Etióp kovácsmester a DVD mellékleten látható filmen. Belső átmérőjük 3cm körüli, hosszuk 20-25cm volt. A fűvókáknak nem találtam a tanyán megfelelő agyagot. Az agyag nagyrészt Al_2O_3 -ból és SiO_2 -ból áll, így mivel nem tiszta alumínium-oxid, nem áll ellen a kohó fűvósíkjában kialakuló nagy hőmérsékletnek, a belőle készült fűvóka vége mindig meglágyul (ld. mullit eutektikum a 24. ábrán). A meglágyulás azért jelentett problémát, mert a lágy fűvókavég felső része lehajlott, így eltömte a fűvóka belső nyílását, meggátolva ezzel a további levegőbefűvést.



24. ábra: SiO_2 - Al_2O_3 rendszer állapotábrája⁶⁴

Ha tisztább, SiO_2 mentes agyagból dolgozhatnánk, az olvadáspont 2000°C köré kerülhetne, így a fűvósíkjában uralkodó nagy hőmérséklet valószínűleg nem tenné tönkre a fűvókát. Lehetséges, hogy így járhattak el a régiek, és megtalálták azt a környékbeli agyaglelőhelyet, amely alkalmas a fűvókák készítésére. Nekem ez nem sikerült, így a fűvókákat a negyedik próbaolvasztástól kezdve samottból készítettem (ez sajnos nem korhű megoldás).

IV.6. A próbaolvasztások

IV.6.1. A próbaolvasztások bemutatása

Kilenc próbaolvasztást végeztem 2009 áprilisától októberéig. A kilenc próbaolvasztást egyesével részletesen nem mutatom be, táblázatos formában vázolom fel a legfontosabb technológiai adatokat. A táblázatokkal a fejlődés menetét szeretném megjeleníteni kiemelve, hogy milyen előrelépéseket tettem az egyes próbaolvasztások alkalmával, a megelőzőekből szerzett tapasztalatok felhasználásával. A DVD mellékleten minden próbaolvasztásról láthatók képek a Képek/Próbaolvasztások mappában.

1. próbaolvasztás	
Kohó geometria	Nemeskéri, szadonálló
Felhasznált érc	Kék-Kálló völgyéből 4-5 kg érc (a tömeget nem mértem pontosan)
Felhasznált faszén	Kőrisfa szén kb. 10kg
Fűjtetés	Kis fűjtatóval, kis intenzitással
Időtartam	2 és fél óra + 1 óra előfűtés ⁶⁵

⁶³ Gömöri János: Őskohómúzeum Somogyfajszon című leírásában 50 olvasztást említ kohónként.

⁶⁴ Dr. Németh Árpád: Kerámiák és kompozitok jegyzet

⁶⁵ A próbaolvasztások időtartamát mindig a lehetőségek korlátozták. A kohó csak addig üzemelt, ameddig megfelelően lehetett fűteni. A legtöbb esetben a salak viselkedése gátolta meg a további munkát (beboltozódás, fűvóka eltömődés), vagy a fűvóka tönkremenetele. Csak néhány próbaolvasztásnál sikerült elérni az ideális befejezést, azaz az elegyoszlop fűvósíkjáig süllyedését.

Problémák	- A kohó torokrésze diffúzoros volt, az elegyoszlop felboltozódott - Kis hőmérséklet - Lefagyott a kemence fűvósíkja - Rossz ércminőség, a salakja nem kellően híg folyós (bár az elért kis hőmérsékleten a legjobb érc salakja sem folyt volna ki a kohóból) - A fűjtató csőrét nem csatlakoztattam tömítetten a fűvókához, oldalra elszökhetett a levegő - A torok peremétől repedések indultak ki
Eredmény	- Összesült salakrögök - Vas semmilyen formában nem volt látható
Tapasztalatok	- Magasabb kohót kell építeni - Emelni kell a hőmérsékletet - A faszén/érc arányt növelni kell - Salakfolyósítót kellene használni (fahamu mesterséges adagolásával) - A hőszugárzást csökkenteni kellene (földdel körbehányva a kohó medencerészét) - A fűvóka csőrét légmentesen csatlakoztatni kell a fűvókához, mintegy „be kell pumpálni” a levegőt a kohóba

2. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- Nemeskéri, szadonálló, - Földdel körbevett medence, - Magasabb kohó (kb. 70 cm) - A fűvókához légmentesen csatlakozó fűjtatócsőr - A torok pereme alatt drótozással próbáljuk akadályozni a repedések terjedését
Felhasznált érc	Kék-Kálló völgyéből kb. 10 kg érc + egy marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Kőrisfa szén és bükkfaszén vegyesen kb. 20kg
Fűjtás	Kis fűjtatóval, kis intenzitással
Időtartam	5 és fél óra + 1 óra előfűtés
Problémák	- Alacsony hőmérséklet - Lefagyott a kemence fűvósíkja - Rossz ércminőség, a salakja nem kellően híg folyós (bár az elért alacsony hőmérsékleten a legjobb érc salakja sem folyt volna ki a kohóból)
Eredmény	- Összesült salakrögök - Vas semmilyen formában nem volt látható
Tapasztalatok	- Magasabb kohót kell építeni - Emelni kell a hőmérsékletet - A faszén/érc arányt tovább kell növelni - A salakfolyósító fahamu hasznos, egyes helyeken mintha jobban megfolyt a salak, de híg folyóssá nem vált. - Földbevált kohót kell építeni a hőszugárzással leadott hő minimalizálására. - Sokkal nagyobb levegő térfogatáram kell - A drótozás meggátolja a repedések kialakulását és terjedését.

3. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	Fajsi típusú, földbevált, 80 cm magas kohó
Felhasznált érc	Kék-Kálló völgyéből kb. 6 kg érc + egy marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Kőrisfa szén és bükkfaszén vegyesen kb. 15kg
Fűjtás	Kis intenzitású fűjtás a kovácsfűjtatóval
Időtartam	2 óra + 1 óra előfűtés
Problémák	- Rossz ércminőség, a salakja nem kellően híg folyós még az elért magas

	hőmérsékleten és fahamu adagolás ellenére sem
Eredmény	- A fűvókába befolyik a salak, megdermed, így fojtja a levegőáramlást - Nagy mennyiségű összesült befagyott kemencesalak - Apró vasgolyócskák a salakba ágyazódva - A folyósalak mennyiségét nem lehet megbecsülni, a kemencesalakkal keveredett
Tapasztalatok	- A salakkezelést meg kell oldani - Meg kell gátolni a salak befolyását a fűvókába

4. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- Fajszí típusú, földbevált, 80 cm magas kohó - A fűvókát mélyen a kohóba dugva, kb. 20°-kal lefelé irányítva helyezem el, a medence aljának szintjétől 15 cm magasan, ill. a mellfal belső oldalától 10 cm-re nyúlik ki a vége,
Felhasznált érc	Kék-Kálló völgyéből kb. 6 kg érc + egy marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Kőrisfa szén és bükkfaszén vegyesen kb. 15kg
Fűjtetés	Nagy intenzitású fűjtetés a kovácsfűjtatóval
Időtartam	2 óra + 1 óra előfűtés
Problémák	- Rossz ércminőség, a salakja nem kellően hígfolyós még az elért magas hőmérsékleten és fahamu adagolás ellenére sem - A fűvókába befolyik a salak, megdermed, így fojtja a levegőáramlást - Meglágyl a fűvóka vége, ez is akadályozza a levegő befűvást
Eredmény	- Nagy mennyiségű összesült befagyott kemencesalak - Nagyobb vasgolyócskák a salakba ágyazódva - A folyósalak mennyiségét nem lehet megbecsülni, a kemencesalakkal keveredett
Tapasztalatok	- A salakkezelést meg kell oldani - Meg kell gátolni a salak befolyását a fűvókába és a fűvóka meglágylását

5. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- Fajszí típusú, földbevált, 80 cm magas kohó - A fűvókát samottból készítem, - A fűvóka elhelyezése megfelel a 4. próbaolvasztásnak - A mellnyílást meghosszabbítom kifelé így a mellfalazat is kintebb kerül. Ezzel azt próbálom elérni, hogy az alácsurgó salak ne folyjon rá a fűvókára, hanem előtte csepegjen le, így talán nem tömíti el.⁶⁶
Felhasznált érc	Kék-Kálló völgyéből kb. 10 kg érc + egy marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Bükkfaszén kb. 25kg
Fűjtetés	Nagy intenzitású fűjtetés a kovácsfűjtatóval
Időtartam	4 óra + 2 óra előfűtés
Problémák	- Rossz ércminőség, a salakja nem kellően hígfolyós még az elért kis hőmérsékleten és fahamu adagolás ellenére sem - Kezd nyilvánvalóvá válni, hogy a fő gond az érc alacsony vastartalma lehet
Eredmény	- Nagy mennyiségű összesült befagyott kemencesalak - Vasgolyócskák a salakba ágyazódva - A folyósalak mennyiségét nem lehet megbecsülni, a kemencesalakkal keveredett - A salak kezelése részben megoldódott, a befűvást nem gátolta befagyó salak, megnyújtott mellnyílásnak köszönhetően - A fűvóka ellenállt a fűvósíkban kialakult nagy hőmérsékletnek
Tapasztalatok	- Nem jó az érc

⁶⁶ A mellnyílás megnyújtását nagyon jól meg lehet figyelni a Somogyfajszí Kohómúzeum kohóinál is, ld. DVD melléklet Képek/Somogyfajszí Kohómúzeum

6. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- A kialakítás mindenben megfelel az 5. próbaolvasztásnak, de - Még inkább előre ugró mellfalazat, - A fűvóka 15 cm helyett 20 cm-es magasságban kerül elhelyezésre
Felhasznált érc	Fancsikáról 11 kg érc + fél marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Bükkfaszén kb. 30kg
Fűjtatás	Kis és nagy intenzitású fűjtatás a kovácsfűjtatóval
Időtartam	5 és fél óra + 2 óra előfűtés
Problémák	- A folyósalak kicsapolása kissé körülményes
Eredmény	- 1,05 kg-os vasbuca és kisebb vasrögök - Jól kezelhető folyósalak
Tapasztalatok	- A fancsikai érc megfelelő alapanyag a bucavasgyártáshoz - Nagyon sok folyósalak keletkezik - A fűvókát érdemes a medenceszinttől legalább 20-25 cm magasságban elhelyezni, így a salak kifolytatása később válik szükségessé

7. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- A kialakítás mindenben megfelel az 5. próbaolvasztásnak - A fűvókát a medence aljától 25 cm-magasságban helyeztem el
Felhasznált érc	Fancsikáról 8 kg érc + fél marék salakfolyósító fahamu minden ércréteg terítésekor
Felhasznált faszén	Bükkfaszén kb. 30kg
Fűjtatás	Kis és nagy intenzitású fűjtatás a kovácsfűjtatóval
Időtartam	3 és fél óra + 1 óra előfűtés
Problémák	- Az érc egyáltalán nem volt megfelelő, mert túlzottan kvarcos darabokat válogattunk össze (akkor ezt még nem tudtam) - A keletkező salak viszkozitása bár jó volt, az érc vastartalma alacsony
Eredmény	- Csak apróbb vasrögök a kemencesalakba ágyazódva - Jól kezelhető folyósalak
Tapasztalatok	- A kemény, nem porózus, szilánkosan törő kvarcos fancsikai érc nem megfelelő alapanyag a bucavasgyártáshoz

8. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- A kialakítás mindenben megfelel a 6. próbaolvasztásnak, de - A kohót további 10cm-re magasítom, hosszabb redukciós utat biztosítandó - A medence részt földdel vettem körül, a fűvóvi hőmérséklet emelése és a magas hőmérsékletű zóna lefelé történő kiterjesztése céljából
Felhasznált érc	Fancsikáról 9 kg érc (fahamu csak a pörköléssel kerül be)
Felhasznált faszén	Bükkfaszén kb. 25 kg
Fűjtatás	Kis és nagy intenzitású fűjtatás a kovácsfűjtatóval
Időtartam	4 és fél óra + 1 óra előfűtés
Problémák	- A folyósalak kicsapolása kissé körülményes
Eredmény	- 0,7 kg-os vasbuca és sok kisebb vasrög - Jól kezelhető folyósalak,
Tapasztalatok	- A megfelelő fancsikai érc legtöbb tulajdonságát felismerem, valószínűleg a következő ilyen érccel végzett próbaolvasztások is sikerre vezetnének

9. próbaolvasztás	
Kohó geometria és javítások	- A kialakítás a 8. próbaolvasztáshoz hasonló, de - A fűvókát a medence aljától 30 cm-es magasságban helyeztem el, azt remélve, hogy a folyósalaknak így több helye lesz a medencéig, a mellfalazaton keresztüli lecsapolás még később válik csak szükségessé
Felhasznált érc	Somogyszobról 12 kg érc + fél marék fahamu minden ércrétegre
Felhasznált faszén	Bükkfaszén kb. 30 kg

Fűtítés	Kis és nagy intenzitású fűtítés a kovácsfűtatóval
Időtartam	5 és fél óra + 3 óra előfűtés
Problémák	- A kohászat menetét megzavaró jelentős probléma nem lépett fel
Eredmény	- 1,2 kg-os vasbuca és sok kisebb vasrög, amelyek nagy része túlzottan felszenült, a kohóban feltételezhetően megfolyt - Jól kezelhető, nagyon kevés folyósalak, csapolni csak egyszer kellett
Tapasztalatok	- A megfelelő somogyszobi érc legtöbb tulajdonságát felismerem, valószínűleg a következő ilyen érccel végzett próbaolvasztások is sikerre vezetnének - A fancieskai érclelőhelyen szerzett tapasztalatok alapján sikeresen válogatott somogyszobi érc. Így a két lelőhely jó érceinek megismerése után más lelőhelyek jó minőségű ércei is felismerhetőek lehetnek - Túl magasra helyezni a fűvókát nem érdemes, mert a megdermedő salak nem jut le a medencéig - Kisebb intenzitású fűtítéssel kell dolgozni, ha somogyszobi ércet kohósítunk („pigiron” keletkezhet)

Az első öt próbaolvasztás sikertelenségét összefoglalóan a nem megfelelő érc minőségével magyarázom. Az érc salakja nagyon nehezen kezelhető, magas olvadáspontú, a vastartalom valószínűleg kevés volt ahhoz, hogy a salakba kerülő nagymennyiségű vason kívül még színvas is összegyűlhessen buca formában. Feltételezem, hogy ha már kezdettől fogva a következő próbaolvasztások alkalmával feszhasznált fancieskai vagy somogyszobi gypvasérccel dolgoztam volna, akkor már a második próbaolvasztástól kezdve sikeresek lehettek volna a kísérletek. A 6. alkalomtól a kohászat sikere elsősorban a jó minőségű érccel volt köszönhető.

IV.6.2. Egy ideális kohászat menete

A hatodik, a nyolcadik és a kilencedik próbaolvasztás sikerült a legjobban, de a nyolcadik eredménye csak egy kisebb buca és sok vasrög lett. A kilencedik alkalmával pedig már túl nagy volt a befűjt levegő mennyisége, így öntött vas jellegű rögök is keletkeztek a vasbuca mellett (erre vonatkozólag ld. metallográfiai vizsgálatok, V.2. fejezet). Ezért ideális kohászatként a hatodik próbaolvasztást mutatom be. A hatodik próbaolvasztásról készült rövid film látható a DVD melléklet Filmek mappájában video4 névvel, ill. ugyanítt az 5. próbaolvasztásról is található felvétel video5 címmel.

A kohászatot július 29-én végeztem a konzulensemme, Bán Krisztiánnal közösen. A reggeli órákban az ércpörkölő gödörben egy nagy tüzet raktunk, amelyben miután leégett, a kohósításra szánt ércet összekevertük a parázssal. Ezt követte a kohó begyújtása, majd amíg a felfűtés tartott, a faszenet törtük megfelelően apró, kb. 2-4cm-es méterűre. Az előmelegített, parázssal telt medencéjű kohóba lassan faszenet kezdtünk szórni, ügyelve arra, hogy a beszórt faszén a már meglévő parázs és némi fűtítés segítségével át tudjon izzani. A kohó mintegy 8-9 kg faszénnel került feltöltésre. Ezután intenzív fűtítés következett, így kialakult a magas hőmérsékletű zóna a fűvósikban. A faszénoszlop gyorsan süllyedt, további 2 kg-nyi szenet pótolunk után, majd az első ércréteget terítettük. Ez a kohó begyújtását követő 2. óra végén történt. Az érc vegyesen, faszénnel keverve került a kohóba, egy kislapátnyi (hozzávetőlegesen 0,5kg) mennyiségben. A terített ércrétegre fél marék fahamut szórtunk, majd erre egy lapátnyi (kb. 0,5kg) szenet, annak megakadályozására, hogy a felfelé áramló torokgáz elfűjja a fahamut. Az elegyoszlop süllyedésekor még egy lapát faszenet adagoltunk. Összességében tehát nagyjából fél kilogramm érchez egy kilogramm faszenet adtunk. Ez a ciklus az elegyoszlop süllyedésével ismétlődő, kezdetben kb. 6-7 perces ciklusidővel. Később a gyakori salakbefagyás okozta levegőáram csökkenése miatt ez egyre növekedett, a negyedik órában már kb. 10 percesre nyúlt.

Az első ércréteg terítésétől számított második óra elteltével a salak elérte a fűvóka szintjét, szükségessé vált a kicsapolása. A salakcsapolás szükségességét a kohászat közben több dolog is jelzi. Legfontosabb a kohó hangjának figyelése. Ha a „morajló” hang átvált „süvítővé”, az azt jelzi, hogy a gázok átáramlása nem megfelelő. Ilyen hangot hallunk, ha már nagy mennyiségben gyűlt össze fagyott salak a fűvóka előtt, csökkentve a levegőáramot. A kohó toroklángjának figyelése is jó támpontot jelent az üzemállapot megítéléséhez. A torokláng színe a gázatmoszféra összetételére utal (CO gazdag, vagy CO₂ gazdag, ld. Boudouard-reakció). A torokgáz lángjának magassága szintén utal a kohó átszellőzőtségére. Ha a salakbefagyásra utaló jeleket tapasztaltuk, benéztünk a fűvókán és többnyire

azt láttuk, hogy összesült, szivacsos, fekete salakrög fojtja a légáramlást. Ezt mindenek előtt el kell távolítani a fúvóka elől, majd meg kell kezdeni a salak kicsapolását.

A mellnyíláson lyukat ütöttünk a fúvóka alatt 10cm-re, amelyen a sárgás-fehéren izzó salak kifolyhatott. A salakot ezután negyedóránként csapolni kellett. A csapolás után a nyílást képlékeny agyaggal zártunk el, majd ennek eltávolításával végeztük a salak újbóli kieresztését. A folyósalak kicsapolását mutatom a 25. ábrán.



25. ábra: A folyósalak kicsapolása a 6. próbaolvasztáson

A salak kezelése a kohászat során végig nehéznek bizonyult, bár a folyósalak megfelelően hígfolyós állagú volt. Az utolsó ércréteg terítése után végül nem tudtuk megvárni, míg az elegyoszlop a fúvósíkgig leég, a fúvókába befagyó salak, és az emiatt lehülő fúvósík miatt kb. fél órával az ideális befejezés előtt abba kellett hagyni a munkát (a későbbi sikeres kohászatok alkalmával a salakkezelés már jóval könnyebben ment, a munka egészen az elegyoszlop fúvósíkgig való süllyedéséig folytatható). Ekkor 5 és fél óra telt már el az első ércréteg terítésétől számítva.

A mellfalazat szétverésével a fúvóka alatt-előtt közvetlenül a kemence salakba ágyazva találtuk az izzó vasbucát, amit azonnal vízbe merítettünk, majd lealapáltuk róla a felrakódott kemencesalakot. A kapott vasbuca 1050 grammos volt. A felső része jóval több vasat tartalmazott, mint az alsó, ahol már inkább csak salakba ágyazott, fémesen nem összefüggő vasrögök voltak. A vasbucát félbevágtam, így lehetővé téve szerkezetének jobb megismerését. A vasbuca metszetét a 26. ábrán mutatom.



26. ábra: A 6. próbaolvasztás vasbucájának metszete

Jól láthatók a nagyobb, salakba ágyazódott vasrögök, amelyek között bár nem mindenhol alakult ki fémes kapcsolat, többé-kevésbé így is egybefüggő vasbucát alkotnak. Ha a bevezetőben az 1. ábrán bemutatott modernkori vasbucával hasonlítjuk össze, akkor leginkább annak bal oldalán láthatunk hasonló szerkezetű részeket. Minden esetre a kapott vasbuca nagy előrelépés a megelőző próbaolvasztások során keletkezett, salakba ágyazott, külön álló vasgolyócskákhoz képest.

A kohászat alatt 30 kg faszenet használtunk fel, de ebből mintegy 10 kg-ot a kohó felfűtésére fordítottunk. 11 kg-nyi érc kohósításához valójában mindössze 20 kg faszen volt szükséges, ha a felfűtésre szánt mennyiséget nem vesszük szorosan az elegyoszlophoz tartozónak. Így a faszen/érc tömegarány 1,8 körülnek vehető. Ez jól közelíti az irodalmi adatokat. A vaskihozatal meghatározásához szükség van az érc vastartalmának ismeretére. Az viszont kijelenthető, hogy 10 kg

ércből hozzávetőlegesen 1 színvas keletkezett, ha a bucán kívül a vasrögök tömegét is figyelembe vesszük. Ez az arány a somogyszobi ércel végzett próbaolvasztás esetében kicsit jobb, kb. 1,5 kg színvas mellett.

IV.6.3. A próbaolvasztások alapján levonható következtetések

A három sikeres próbaolvasztás eredményeképpen összesen három vasbucát nyertem, ezek össztömege kb. 3 kg. Emellett mintegy 1,5 kilogrammnyi vasrögöt gyűjtöttem össze. Az elvégzett kilenc próbaolvasztás alapján az alábbi összefoglaló következtetések vonhatók le a technológiai adatok vonatkozásában:

1. A toroktól lefelé haladva kúposan tágul a kohó, így az elegyoszlop boltozódásának veszélye csökken.

2. A mellnyílás előreugró, ezzel a mellfalon alácsurgó salak a fúvóka előtt csepeg le, ill. nagy kiterjedésű tüztér alakulhat ki.

3. A fúvóka benyúlása lehetőség szerint legyen nagy, így salakráfolyás esetén a fúvóka palástján csuroghat alá a salak. A megfelelő tüztér, a medencében is nagy hőmérséklet létrehozására szolgál a fúvóka döntése.

4. A fúvóka elhelyezésének ideális magasságát két tényező határozza meg. Túl mélyre a fúvóka azért nem helyezhető, mert a medence folyósalakjába merülhet az orra, ill. túl hamar kezdenek salakkezelési problémák jelentkezni. Túl magasra sem érdemes elhelyezni, mert egyrészt csökken a fúvóka feletti redukciós szakasz hossza másrészt, ha a nagy hőmérsékletű zóna nem ér le a medence aljára a salak még a medencébe érkezés előtt ledermed, így alul a salakkezelés szempontjából kihasználatlan térrész alakul ki.

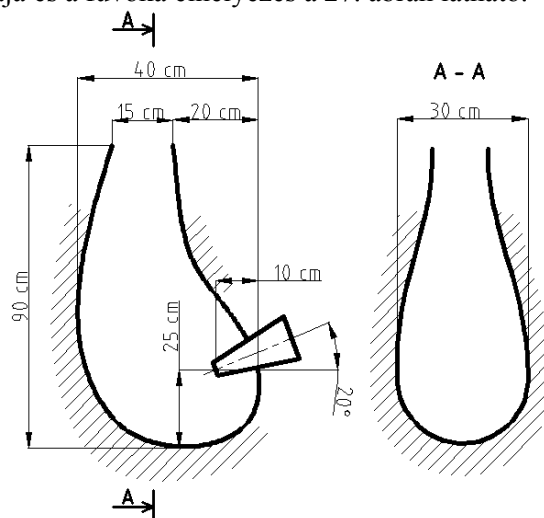
5. A földbevált kohó nagyon kedvező kialakítás a hőveszteségek minimalizálása szempontjából.

6. A kohósítandó ércnek elegendően nagy vastartalmúnak, és megfelelő összetételűnek kell lennie, ahhoz, hogy jól folyó, könnyen kezelhető salakot adjon. Salakfolyósító fahamu adagolása nem szükséges, mert az érchez pörkölés során nagy mennyiségben kerül fahamu. Elképzelhető azonban, hogy az első öt próbaolvasztás során használt Kék-Kálló völgyi érc kohósításánál valamilyen salakösszetétel javító keveréket célszerű lett volna adagolni, de ennek kikísérletezése túl sok időt emésztett volna fel.

7. Lényegében mindegy milyen keményfából égetett faszenet használunk fel, de a szerkezete megfelelő kell legyen, nem szabad porosnak, szilánkosnak lennie, mert ez a redukáló gázok áramlását nagymértékben rontja. A faszenet kb. 2-4 cm-es darabokra szükséges megtörni.

8. A salakcsapolás mindig szükséges, csak a kezdés időpontja változik, attól függően, hogy a fúvóka hogyan van elhelyezve. A fancsikai ércből jelentős mennyiségű folyósalak keletkezett, a vasbucák tömegének 3-4 szeresét is ki kellett csapolni. Ezzel szemben a somogyszobi érc jóval kevesebb folyósalakot adott.

Az ideális kohó geometriája és a fúvóka elhelyezése a 27. ábrán látható.



27. Az ideális kohógeometria

IV.7. A bucavas feldolgozása

A bucavas feldolgozását a dolgozat megírásáig nem sikerült megoldani, nem is próbálkoztam meg vele, mindössze egy-két kisebb vasrögöt kovácsoltam át. Az átkovácsoláshoz újraizzító tűzhelyben hevítettem a vasrögöket. Az újraizzító tűzhelyről és bucadarabok átkovácsolásáról további képek láthatók a DVD melléklet Képek/Újraizzító tűzhely mappában.

A vasrögök átkovácsolása igen nehéz, sok gyakorlatot igénylő munka, mert a jelentős mennyiségű salakzárvány miatt a vasrögök (ha nem érjük el a fémek részek összehegedéséhez szükséges magas hőmérsékletet) könnyen széttöredeznek. Nem elegendő tehát a vörösizzáson történő átkovácsolás, magam is így rontottam el több darabot.

Ha a kovácsolást magas hőmérsékleten végeztem, a darabok nem töredezték szét, a salak ki tudott fröccsenni. A 9. próbaolvasztás során kapott öntöttvas-jellegű darabok átkovácsolásával is próbálkoztam, de érthető okokból szintén széttöredezték, illetve szétfolytak a hevítés során (kis olvadáspontú lédeburitos eutektikum). Teljesen világos, miért kerülték a régiek az ilyen vas (pigiron) keletkezéséhez szükséges körülményeket a bucakemencében.

Jelenleg a bucavas feldolgozásában nem rendelkezem elegendő tapasztalattal, csak néhány megfigyelést tettem. A későbbiekben ebben az irányban sokat kell még dolgozni.

V. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

V.1. Gyepvasérc- és salakminták vizsgálata

A kohászatok során felhasznált gyepvasércek összetételét mindenképpen szükségesnek tartottam megvizsgálni, egyrészt, hogy a kezdeti próbaolvasztások sikertelenségének okára fény derülhessen, másrészt, hogy összevethessem a különböző lelőhelyek ércminőségét. A salakminták összetétele a salakszínezet és összetétel kapcsolatának megállapítása miatt volt fontos azért, hogy a továbbiakban tapasztalati úton is következtetéseket lehessen levonni a kohóból kicsapolt salak színe alapján a bucakemencében zajló folyamatokra. Ezen kívül a mások által végzett próbaolvasztási eredményekkel is szerettem volna összevetni a sajátjaimat. Végül a salakösszetétel alapján adatok nyerhetők a vasbuca kialakulása és növekedése során lejátszódó folyamatok megértéséhez és leírásához is.

Az összetétel megállapítására a Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszékén *röntgendiffrakciós fázisanalízist* végeztek, amely sajnos nem lett eredményes. Bár a vizsgálat alkalmas a kristályos anyagok fázisainak kimutatására, a minták esetén nem sikerült az összetevők többségét beazonosítani. A nagy mennyiségű amorf fázist tartalmazó salakminták esetén ez érthető, azonban a gyepvasérc minták esetén nem.

A röntgendiffrakciós vizsgálat segítése céljából a Furol-Analitika akkreditált laboratóriumában *vegyelemzést* készítettek. Ennek eredménye sajnos szintén nem kielégítő. A vegyelemzést a minta oldószeres feltárásával kezdik, majd spektroszkópos vizsgálattal állapítják meg az elemek százalékos arányát. Ezt Varian 710-ES ICP spektrométerrel végezték. Az elemek arányából számíthatók a vegyületfázisok százalékos arányai. A mérés eredményeinek gondja, hogy az elemeléssel kimutatott összetevők százalékos arányát összegezve ez nem adódik ki 100%-ra. A magyarázat, hogy a feltárás során feltételezhetően nem minden összetevőt sikerült a mintából oldatba vinni. Ennek ellenére az eredmények alapján tehetünk lényegi megállapításokat, de messzemenő következtetéseket nem lehet levonni belőlük. A későbbiekben szükséges lesz a pontosítás. A 6. táblázatban bemutatom a spektroszkópos vizsgálattal kapott eredményeket. A DVD mellékleten a Képek/Vizsgálatok mappában a táblázatban szereplő mintákról kép is látható.

A vizsgálati minta												
Ikta- tó- szám	Azo- nósi- tője:	Megnevezés	SiO ₂ [%]	CaO [%]	MgO [%]	FeO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MnO [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Cr [%]	Cu [%]	Ni [%]
685	1	Fancsikai	8,00	5,54	0,50	0,00	44,32	4,49	0,96	0,103	0,064	0,037
686	2	Kék-Kálló völgye	6,50	6,20	0,49	0,77	42,46	4,26	0,98	0,088	0,052	0,034
687	3	Somogyszob pörköletlen	7,30	17,30	0,87	0,00	39,03	8,18	0,72	0,081	0,059	0,021
688	4	Somogyszob pörkölt	8,50	15,76	0,88	0,00	50,89	5,99	0,87	0,073	0,041	0,024
689	5	SiO ₂ -os folyósalak (zöld)	32,00	10,05	1,07	32,81	0,14	2,32	2,86	0,173	0,767	0,034
690	6	Fayalitos folyós. (fekete)	22,00	12,76	1,33	26,64	0,12	3,26	2,56	0,132	0,813	0,032
691	7	Kemencesalak	13,60	3,23	0,50	7,85	0,07	0,66	0,74	0,180	0,737	0,040

6. táblázat: Gyepvasérc és salakminták vegyelemzéses vizsgálatának eredményei

Bár a vizsgálati eredményeket fenntartással kell fogadni, a gyepvasércek hematit tartalma nem erősíti meg azt a megállapítást, hogy a kezdeti próbaolvasztások sikertelenségét a Kék-Kálló völgyi érc kis

vastartalma okozta volna. A korábban feltételezettel ellentétben az Al_2O_3 - és a CaO -tartalom sem túl nagy, így a salak nagy olvadáspontjára ez nem ad magyarázatot. A somogyszobi ércminták vizsgálatával a pörkölt és pörköletlen érc hidrátvíz tartalmát szerettem volna összevetni, az eredmények azonban erre nem térnek ki. Kiderül viszont, hogy az ércek erősen bázikusak. 15-17%-os CaO -tartalmuk már a salak olvadáspontját növeli (12%-ig csökkenti, a felett drasztikusan növeli), bár az arányok változhatnak, ha minden összetevőt sikerült volna feltárni. Az látható, hogy a salakolvadáspontot csökkentő fahamu adagolásra a somogyszobi érceknél nincs szükség, ellentétben a fancsikai és Kék-Kálló völgyi érccel. A pörkölt és pörköletlen somogyszobi érc hematit tartalma nagyban eltér, ez arra utalhat, hogy az érc összetétele nagyon változó lehet. Eszerint nem elég egy lelőhely egyetlen mintáját vizsgálni, több mérés eredményét kellene átlagolni.

A salakmintáknál a SiO_2 -os folyósalak összetétele a zöld színezet alapján várt módon a SiO_2 -tartalom növekedése irányába tolódik el. A fekete színű fayalitos folyósalakban az FeO-SiO_2 aránya nagyobb. A SiO_2 -os folyósalak a hatodik próbaolvasztásból, a fayalitos folyósalak az ötödik próbaolvasztásból származik. Minkét próbaolvasztás során fahamut adagoltunk, feltételezhetően ennek köszönhető a minták magas CaO -tartalma, ugyanis a felhasznált fancsikai érc ezt nem indokolja. A kemencesalak vegyelemzési eredményéből, következtetéseket nem vonok le, annak hiányossága miatt.

V.2. Vaströgök és vasbuca metallográfiai vizsgálata

Metallográfiai vizsgálatokat végeztem a 4. próbaolvasztásból származó vasgolyón és „vashártyán”, a hatodik próbaolvasztás bucájának egy átkovácsolt és egy alakítás nélküli darabján, ill. a 9. próbaolvasztás egyik pigiron jellegű vaströgén. A marószert 2%-os Nitál volt, a lépték minden kép bal alsó sarkában látható. A csiszolatok nehezen felismerhető fázisait mikrokeménység-méréssel próbáltam beazonosítani. Ezeket a méréseket D 32 típusú Hanemann micro-Vickers keménységmérő-berendezésen végeztem el. A keménységértékek (HV mikro) a

$$HV = \frac{1,854 \cdot F}{(d \cdot 0,029)^2 \cdot 1000};$$

egyenlet szerint számolhatók, ahol F -a terhelő erő pondban, és d -a gép skáláján leolvasott lenyomatátmérő mm -ben.

Terjedelmi okokból csak két minta vizsgálatának eredményeit mutatom be részletesen. A DVD mellékleten a Képek/Vizsgálatok mappában található az említett minták szövetszerkezetéről készített képek.

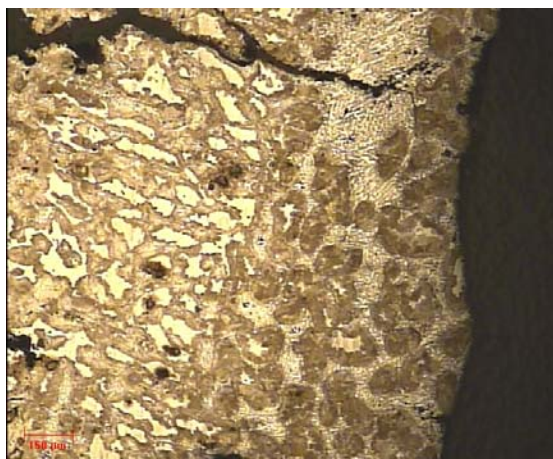
V.2.1. A 4. próbaolvasztásból származó vasgolyó metallográfiai vizsgálata

A vasgolyót a 4. próbaolvasztás során kapott, összesült salakrögből vettem ki. A 28. ábrán látható, hogy a vizsgált vasgolyóhoz hasonlóan több nagyobb vaströg is fehér salakba ágyazódott be. A salak színe úgy gondolom itt is nagyon fontos (részletesen ld. VI. fejezet), vélhetőleg nem fayalitos salak veszi körbe a vasgolyókat.



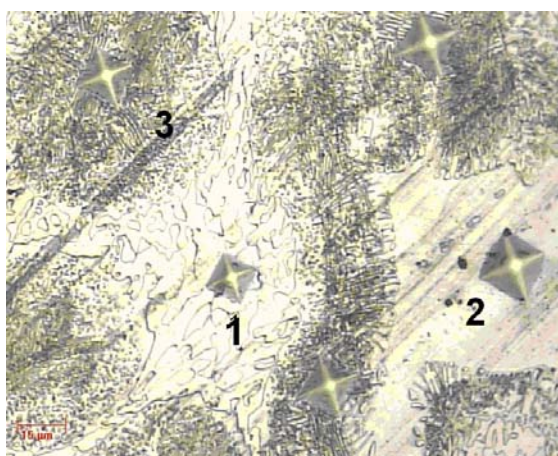
28. ábra: A 4. próbaolvasztás vasgolyóinak in situ környezete

A metallográfiai vizsgálat alapján a következő megállapítások tehetők. A vasgolyó *hipereutektoidos*, sok oxidzárvány, salakzárvány látható a mintán. A szövetszerkezet nagyon inhomogén, három szövetelem azonosítható be: a lekerekített szemcsék vagy vegyesen ferrit-perlitesek vagy tisztán perlitesek, a szemcsék között feltételezhetően utolsóként megdermedő lédeburit található. Érdekes karbondiffúziós folyamat nyoma figyelhető meg a szemcsék csiszolata alapján. A kezdetben kialakuló kisebb széntartalmú ausztenitszemcséket feltételezhetően a szomszédos lédeburit szenítette fel (perlitsáv a szemcsehatártól befelé), azonban a szenülési folyamat nem zajlott le teljesen, mert a szemcsék belsejében tisztán ferrites szövetelemet találunk. A karbontartalom a vasgolyó belseje felé haladva kissé csökken, ez a ferrites fázis szemcsén belüli növekvő arányában mutatkozik meg. Az elmondottak a 29. ábrán figyelhetők meg.



29. ábra: Metallográfiai csiszolat a vasgolyóról

A szövetelemek beazonosítását mikrokeménység-méréssel is segítettük. A Vickers keménységmérő gúla lenyomatai és a hozzá tartozó keménységértékek átlagértékei láthatók a 30. ábrán. Megfigyelhető, hogy a lenyomat a leglágyabb szövetelem esetén, a ferritben a legnagyobb, a lédeburitban pedig a legkisebb. A perlitben a három lenyomat közel azonos méretű. Az ábrán az egy szemcsén belüli felszenülési folyamat jelei is megfigyelhetők.



szövetelem vagy fázis	HV _{átl}
1. lédeburitos	760
2. ferrites	240
3. perlites	370

30. ábra: Mikrokeménység-mérés a vasgolyó metallográfiai csiszolatán

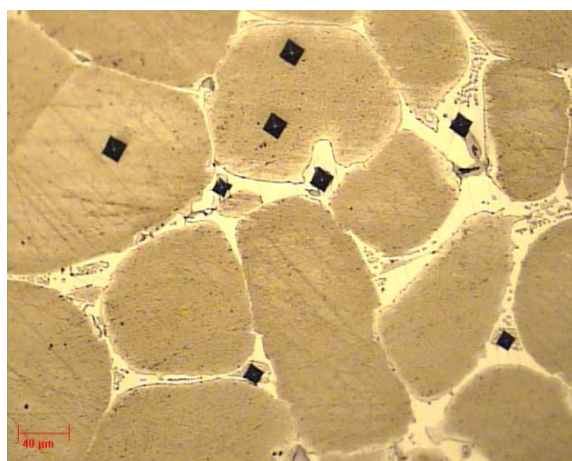
További képek találhatóak a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/Vasgolyó

V.2.2. A 6. próbaolvasztás vasbucadarabjának metallográfiai vizsgálata

A 6. próbaolvasztás során kapott vasbuca (ld. 26. ábra) egy kiálló darabját törtem le és vetettem alá szövetszerkezeti vizsgálatnak. A darabot zöld színű folyósalak vette körbe. A metallográfiai vizsgálat

alapján ez a minta is hipereutektoidos, hozzávetőlegesen 2%-os karbontartalmú.⁶⁷ Az erős zárványosság itt is megfigyelhető. A legnagyobb mennyiségben feltételezhetően szemcsés perlit szövetelem található, a többnyire lekerekített krisztallitokat itt is lédeburit veszi körül, néhol cementit háló. A lédeburit mennyisége azonban jóval kisebb, mint az előzőekben tárgyalt vasgolyó esetében. A perlit nem lemezes, hanem finomszemcsés, homogén szürke színben jelenik meg. Ez valószínűleg annak köszönhető, hogy a vasbucát a kohóból kivétele után azonnal vízben hűtöttem le. A nagy szemcsék azonosítása perlittel viszont csak egy mikroanalízis-vizsgálat után mondható biztosnak. A minta csiszolatát összevetve a vasgolyó csiszolatával, a ferrit hiányát a hosszabb hőntartási idő miatt végbement teljesebb karbon diffúzióval magyarázom. A 6. próbaolvasztás ugyanis mintegy 3 órával hosszabb volt a 4.-nél.

Ennél a mintánál is végeztünk mikrokeménység-mérést, leginkább a homogén szürke szövetelem beazonosítása céljából. A lenyomatok méretei a 31. ábra alapján vethetők össze.



szövetelem vagy fázis	HV _{átl}
1. lédeburitos	740
2. perlites	390
3. cementit kiválás	1030

31. ábra: Mikrokeménység-mérés az alakítás nélküli vasbuca metallográfiai csiszolatán

További képek találhatóak a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/Buca(alakítás nélkül)

V.2.3. További vasrögök metallográfiai vizsgálata⁶⁸

Az átkovácsolt bucadarab a 26. ábrán látható bucavas másik felének melegalakításával készült. Csiszolatán változatos kristályszerkezet, többnyire Widmannstätten-szövetszerkezet látható ferrit-perlites, tiszta ferrites mezőkkel. A Widmannstätten-szövetszerkezet rácsozatát ferrit adja, a rácsozatban azonban néhol cementit rögök találhatók. Ezeket mikrokeménység-méréssel azonosítottuk. A karbontartalom 0,3-0,4% körül lehet.⁶⁹ Képek találhatóak a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/Buca(kovácsolva).

A kohóból kiemelt összesült salakrögben nemcsak vasrögök voltak megtalálhatók, hanem néhol a faszén felületére lemezszerűen is kirakódott a vas. A vaslemez a szövetszerkezet alapján tisztán ferrites szövetszerkezetű lehet, sok apró oxidzárvánnyal. A ferrites szövetszerkezetnek köszönhetően a minta hidegen könnyen hajtogatható volt. Képek találhatóak a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/Lemez.

A pigiron jellegű minta a 9. próbaolvasztás során keletkezett. Nem az akkor kapott vasbucából származik, hanem egyike a kohóban talált sok kisebb, megfolyt vasrögnek. A csiszolat alapján elmondható, hogy ez a minta már egyértelműen nyersvas, normál lemezgrafitos öntöttvas szerkezetet mutat, karbontartalma 3% körüli. A lekerekített perlit szemcséket néhol kevés lédeburit veszi körül, a szemcsékbe ágyazódva lemezes grafit található. Képek láthatók a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/Pigiron.

⁶⁷ Dr. Kiss Gyula tanár úr szóbeli közlése

⁶⁸ Dr. Verő József: Vasötvözetek fémtena, Bp. 1966, és Dr. Kiss Gyula tanár úr szóbeli közlése és

⁶⁹ Mivel a feltételezett ferritháló vastagsága a szemcsehatáron a mérőgúla lenyomatának nagyságával közel egyező, nem biztos, hogy kritika nélkül fogadhatjuk el a mikrokeménység-mérés eredményeit. Lehetséges, hogy ferritháló helyett cementithálóról van szó. Ez esetben a karbontartalom jóval magasabb.

Elvégeztem hat további vasgolyó metallográfiai vizsgálatát is, egy elgondolás alátámasztására. Erről a VI.2. pontban lesz szó.

Összességében elmondható, hogy a vizsgált minták mindegyike a vártnál nagyobb karbontartalmú. Legkisebb karbontartalmúnak a 4. próbaolvasztás vaslemeze és a 6. próbaolvasztás vasbucája mutatkozott, de ennek összetétele is nagyon inhomogén. Elképzelhető, hogy találunk benne tisztán ferrites részeket is. Az európai történelmi vasbucák általában alacsony karbontartalmúak, bennük a szén mennyisége a 0,3-0,4%-ot ritkán haladja meg. A magyarországi vasbucák viszont sokszor hipereutektoidosak.⁷⁰

A cél a kovácsolható vasbuca előállítása, a magas széntartalom ellenére a metallográfiai vizsgálatok eredménye alapján ez, úgy gondolom, lehetséges, a 6. próbaolvasztás alkalmával pedig sikerült is. A többi vasbucát nem vizsgáltam, átkovácsolásukkal nem próbálkoztam. Valószínű, hogy a vasbucák kovácsolhatóságát az általam alkalmazott vízbe merítés rontja. A későbbiekben mindenképpen a kohóból kivett izzó bucák átkovácsolását kell megpróbálni. Az is látható, hogy a túlzott felszenülés valós probléma lehetett az őskohászatban is. Nagyon fontos a megfelelő ércösszetétel, és szűk határok között kell tartani a befűjt levegőmennyiséget ahhoz, hogy ne keletkezzen pigiron, de a salak is kellően híg folyós állapotban elválhasson a bucától.

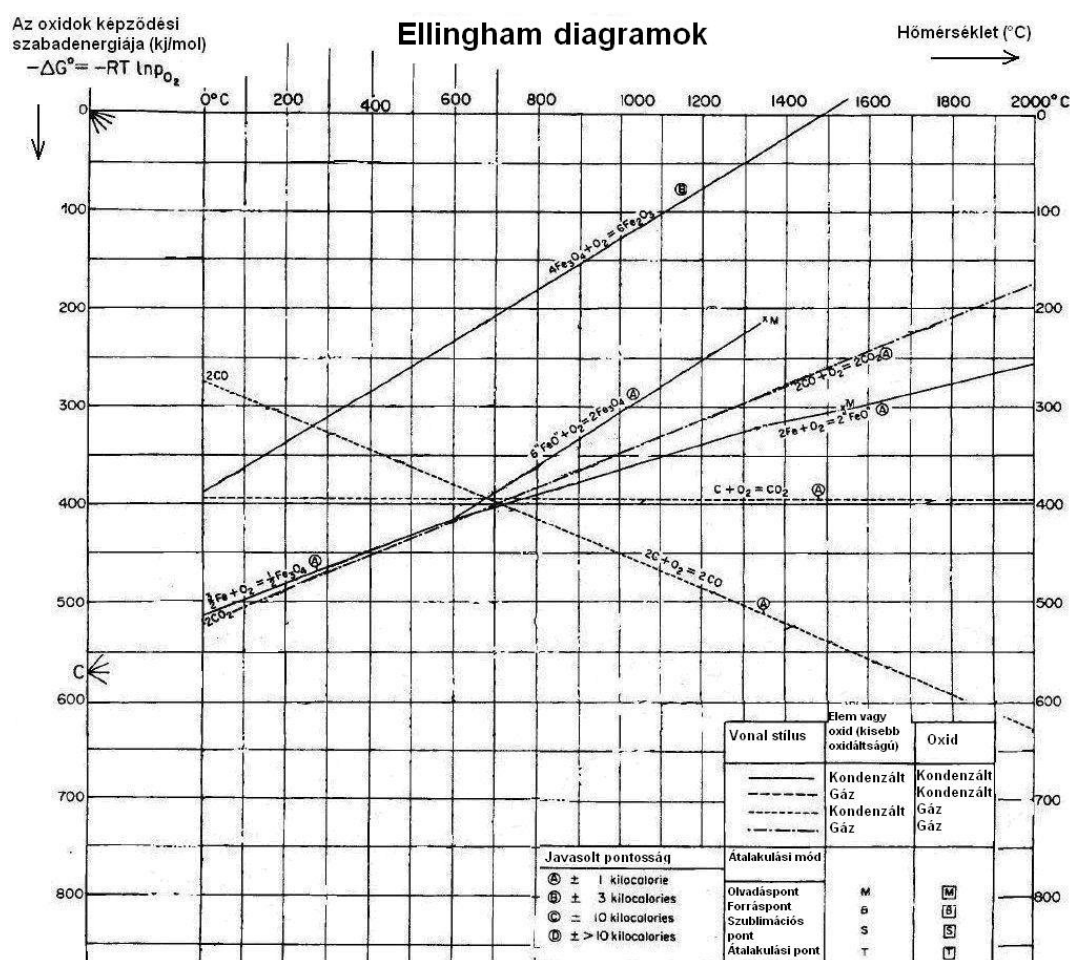
⁷⁰ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

VI. A DIREKT VASGYÁRTÁS SORÁN LEJÁTSZÓDÓ TERMODINAMIKAI ÉS KINETIKAI FOLYAMATOK ÉRTELMEZÉSE

VI.1. Folyékony salakfázisban kiváló vasgolyók

Irodalom alapján ismertek az egyszerű redukciós folyamatok, amelyek során az ércből színvas lesz, azonban az, hogy a salakfázisban miként zajlanak le ezek, nem világos. Az irodalmi utalások alapján feltételezhető az, hogy a keletkező vasbucsa nem olvadékként keletkezik, erre utalnak a leírt karbon tartalmak és a bucakemencében elérhető hőmérséklet. Ezt próbálom meg a következőkben értelmezni.

Az értelmezéshez igénybe veszem az oxidációs folyamatokat bemutató *Ellingham-diagramok* ide vonatkozó részét (ld. 32. ábra).



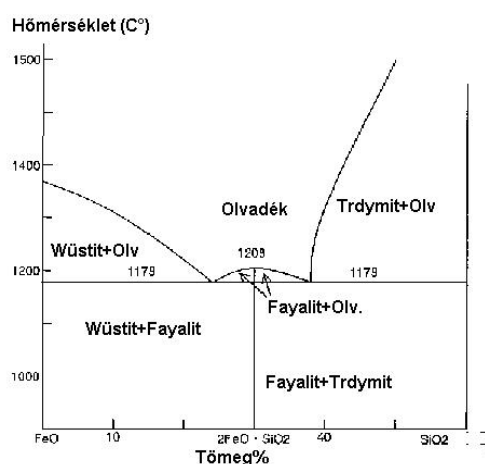
32. ábra: Ellingham-diagramok⁷¹

A diagramokból jól nyomon követhetők a II.2.2.1. pontban bemutatott folyamatok. A diagramok a lejátszódó reakciók során történő *szabadenergia* változást mutatják meg különböző hőmérsékletek mellett. Ha a diagramokon jelölt vasoxidos reakciók redukciós irányban mennek végbe, akkor a redukció szabadenergia növekedéssel jár, az energiaszükséglet a CO vagy C oxidációjából fedeződik, illetve a redukció során keletkező O-t az említett redukálószeres veszik fel. Például leolvasható, hogy a $6Fe_2O_3 \rightarrow 4Fe_3O_4 + O_2$ redukció energiaigényét Három oxidációs folyamat fedezheti: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ vagy $C + O_2 \rightarrow CO_2$ vagy $2C + O_2 \rightarrow 2CO$, illetve a keletkező O_2 -t ezek a reakciók vehetik fel. Az is látható, hogy kisebb hőmérsékleten (700°C alatt) a CO, nagyobb hőmérsékleteken (700°C felett) viszont a C oxidációja biztosít nagyobb szabadenergia csökkenést.

⁷¹ http://pruffle.mit.edu/3.00/Lecture_33_web

Ezek szerint a bucakemence torokrészében megkezdődik a beadagolt hematit magnetitté redukálódása. Ez a folyamat kis hőmérsékleten zajlik, a redukciót így a diagram szerint is a CO végzi, ezért fontos a torokgáz nagy CO-tartalma. Az indirekt redukció nagyobb szabadenergia-csökkenéssel jár, mint a direkt redukció. Az elegyoszlop lefelé süllyedése során a hőmérséklet tovább emelkedik, és a szabadenergia-csökkenés már a direkt redukciónak kedvez a magnetit wüstitté redukálódása során. A redukció azonban még indirekt módon is végbemehet. Úgy gondolom eddig az érc meddőtartalma nem játszik jelentős szerepet a folyamatokban.

A wüstit kialakulásakor feltételezhetően a savanyú érc SiO_2 -tartalmával hamar folyósalakot képez, amelynek FeO -tartalma magas. A 33. ábrán bemutatott FeO-SiO_2 állapotábra szerint az olvadék FeO -tartalma a hőmérséklet emelésével nőhet. A fűvósíkbeli nagy hőmérsékleten, véleményem szerint, akár tiszta FeO is lehet olvadt állapotban. A kicsapolt salak színét a benne lévő FeO -tartalom befolyásolhatja, erre adnak bizonyítékot a salakminták vegyelemzései. Minél sötétebb a salak színe, annál több benne a FeO . A további redukció tehát feltételezésem szerint ebben a több-kevesebb FeO -t tartalmazó salakfázisban folyik, de ennek mechanizmusáról az általam vizsgált irodalom nem tesz említést. A salakfázis többi összetevőjének szerepét az irodalom alapján már nagy vonalakban említettem a II.2.2.2.-ben.

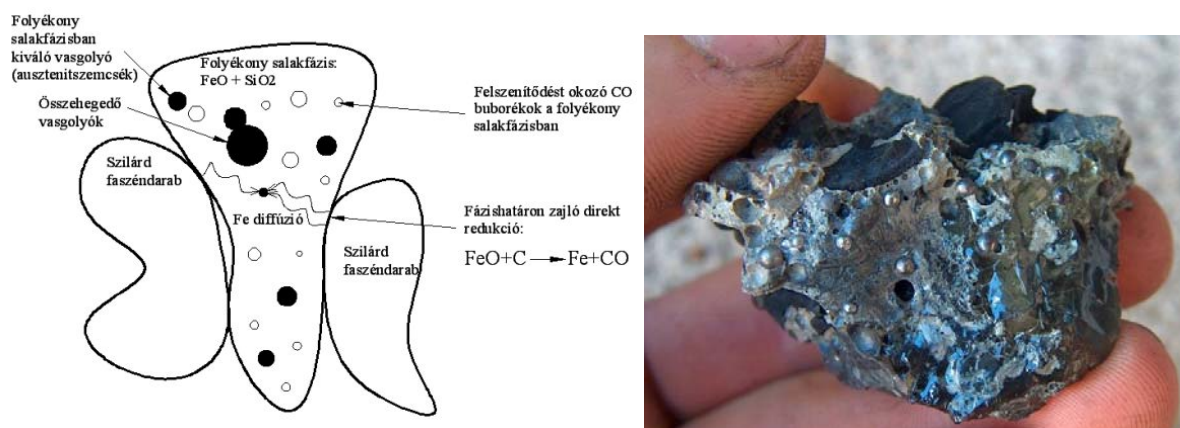


33. ábra: FeO-SiO_2 állapotábra⁷²

Az Ellingham-diagramok szerint is végbe megy a II.2.2.1. pontban tárgyalt wüstit kis hőmérsékleteken történő elbomlása színvasra és magnetitre, de úgy vélem a bucavas keletkezésének szempontjából ez a folyamat nem lényeges.

A próbaolvasztások tapasztalatai alapján, úgy gondolom, hogy a nagy FeO -tartalmú olvadt állapotú salakfázisban kezd a „színvas” kialakulni. Ennek menete nem teljesen világos, csak feltételezem, hogy a redukció direkt redukció lehet, azaz a karbon redukál. Szabadenergia-csökkenés ugyanis csak ezen a módon lehetséges (ld. 32. ábra: a wüstit karbonnal történő redukciója jár szabadenergia-csökkenéssel, a szénmonoxidos redukció nem tud végbemenni). Ez úgy történhet, hogy a nagy FeO -tartalmú folyékony salak átszivárog, átszurog a faszéndarabok között, így nagy felületen érintkezik a redukáló hatású karbonnal. Az érintkezéskor a faszén és a salak határfelületén zajlik a redukció, amelynek eredményeképpen a határfelületen színvas keletkezik atomos, esetleg kristályos formában. Gyors, folyadékfázisbeli diffúzióval ezek a salak belsejébe vándorolnak, szilárd csírák képeznek, amely gömb alakban növekszik (ld. 34. ábra). A diffúzió hajtóereje a felületi feszültség csökkenése, ezért keletkeznek az ausztenitzemcsék a salakfázis belsejében és nem a faszén-salak fázishatáron. A salakfázisban növekedő vasszemcsék jelenlétére utal az a tapasztalat is, hogy salakcsapoláskor a kohóból kicsapolt salak „hiccelt”. A jelenséget az oxidáló környezeti atmoszférával érintkező vasszemcséknek tulajdonítom. A salakfázisban kivált vasgolyókat, illetve a folyamatot mutatom be a 34. ábrán.

⁷² http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDnucl/TDnucl_Figs.htm



34. ábra: A feltételezett redukciós, diffúziós és kiválásos folyamatok salakfázisban és vasgolyók az 5. próbaolvasztás salakmintájában

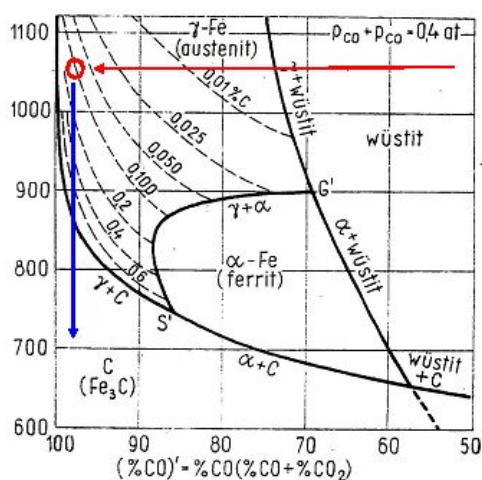
Bizonyos esetben azonban a salak-faszén fázishatáron is keletkezik vas (amely direkt redukcióra utal). Ezek lemez alakúak, a faszenet veszik körbe (ld. V.2.3. pontban bemutatott vaslemez). Ezzel a jelenséggel is gyakran találkoztam, de úgy gondolom, a buca fő tömege mégis a vasgömbökből keletkezik.

Megjegyzem, hogy a „színvas” salakfázisból való kiválása egy másik módon is történhet. Eszerint a FeO a salakfázis belsejében színvassá redukálódik, a leadott oxigénje a folyékony salakban gyors diffúzióval a salak-faszén határfelületre jut, ahol a karbonnal reagál. A folyamat többi része a már említett módon zajlik.

VI.2. A vasgolyók felszenülése

Feltételezem, hogy a továbbiakban a folyékony salakban keletkezett vasgolyók növekszenek, a növekedésüket az olvadt salakban zajló vasdiffúzió táplálja. Ezek a vasgolyók kezdetben kis széntartalmú ausztenit szemcsékből állnak. Idővel azonban karbonban dúsulnak, bizonyára még az olvadt salakfázison belül, de ennek mechanizmusa nem tisztázott. A felszenülésre utal az V.2.1. pontban tárgyalt vasgolyó nagy karbontartalma is.

A felszenítődést, úgy gondolom, az olvadt salakban oldott, néhol buborékokat képző szénmonoxid okozza. A próbaolvasztások során kicsapolt salak ugyanis nagyon sok gázzárványt tartalmazott, ami nem lehet más, mint a kohó atmoszférája (a salak buborékossága látható a 34. ábrán is). A vasnak CO-ból és CO₂-ből álló gázkeverék által történő felszenítődésre vonatkozó egyensúlyi vonalakat a Boudouard-Bauer-Gläser-diagram mutatja be. Ez a 35. ábrán látható.

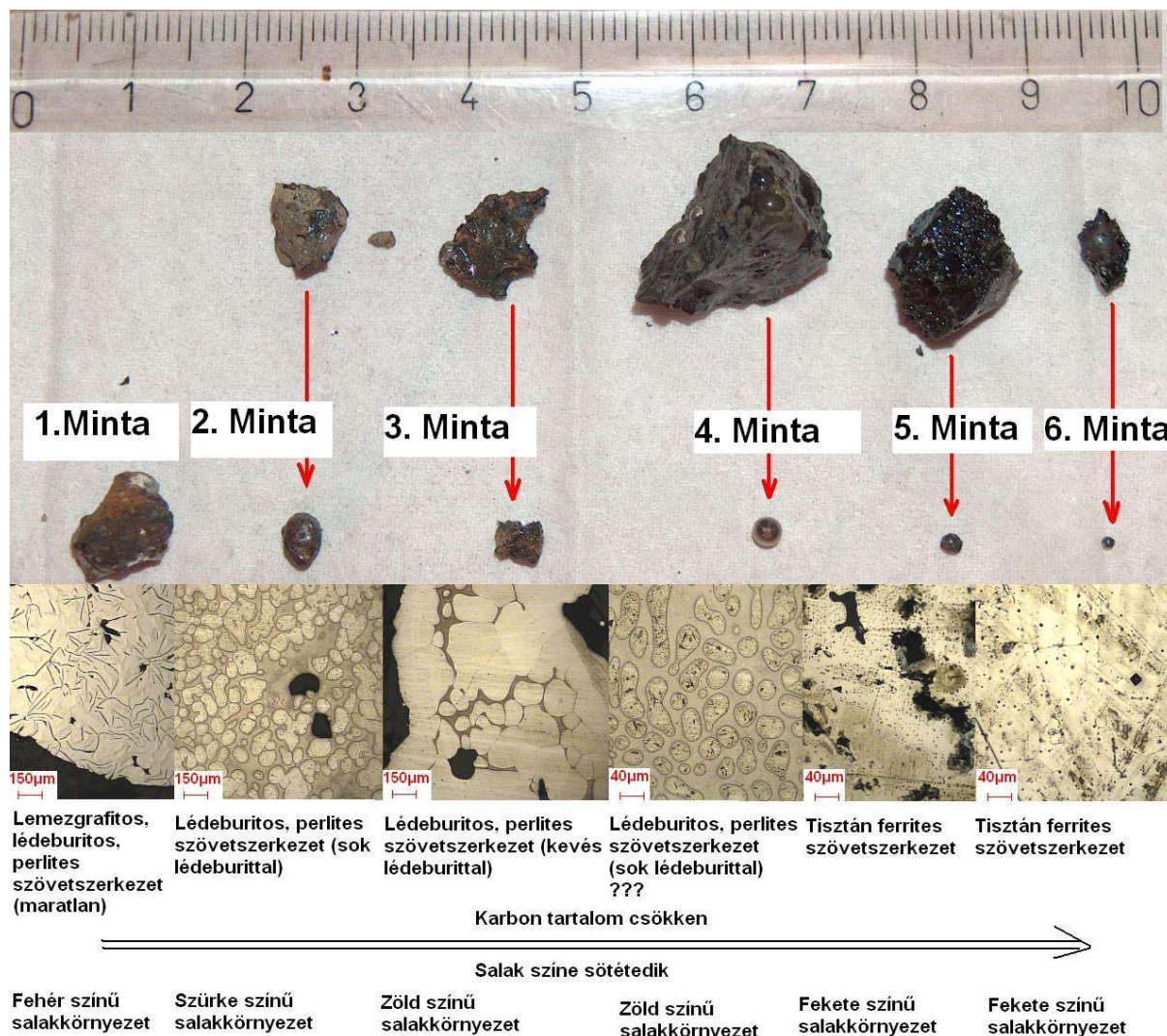


35. ábra: Boudouard-Bauer-Gläser-diagram⁷³

⁷³ H.- N.-V.-Z.: A magyarországi vaskohászat története

A diagram vízszintes tengelyén a jelölt képlet szerint számított CO egyenérték van feltüntetve. A berajzolt piros nyíl mutatja azt a folyamatot, amelynek során a kohóban uralkodó gázatmoszféra CO-ban dúsul. Ennek következtében a nagy CO-tartalmú gázkeverékkel egyre növekvő karbontartalmú ausztenit tart egyensúlyt. A kék nyíllal jelzett lehűlés során az ausztenit karbontartalma tovább nő. A vasgolyók felszenítődése tehát úgy gondolom, a folyékony salakban oldott CO-nak tudható be, de ez csak egy összetétel-vizsgálat után jelenthető ki biztosan. A felszenítődés alatt feltételezhetően az ausztenitszemcséket lédeburit kezdi körülvenni. A vasgolyóban tehát egyszerre lehet jelen szilárd és olvadék fázis. A lédeburitból lassan karbon diffundál be a szilárd ausztenitszemcsékbe, de ha a diffúzióhoz nem áll rendelkezése elegendő idő, akkor az ausztenitszemcsék belseje kis karbontartalmú marad. A szenítődés a golyók külső felülete felől zajlik. Erre utal az V.2.1. pontban bemutatott vasgolyó metallográfiai csiszolata.

A vasgolyók felszenítődése úgy vélem, együtt jár az őket körülvevő salak elszíneződésével, amit feltételezhetően a FeO-tartalom csökkenése okoz. Elképzelhető, hogy valamilyen egyensúly alakul ki a salak FeO-tartalma, a salakból kiváló vasszemcsék karbontartalma és a kohóban uralkodó gázatmoszféra összetétele között. Ennek alátámasztására olyan vasgolyókról készítettem metallográfiai csiszolatot, amelyek salakkörnyezetét ismertem. Az eredményeket a 36. ábrán foglalom össze.



36. ábra: Feltételezett összefüggés a salak színe és a belőle kiváló vasszemcsék karbontartalma között

A bemutatott mintasor 4. eleme kilóg a sorból, szövetszerkezetét (az öt körülvevő zöld salak miatt) kevésbé ledeburitos perlitnek vártam. Az eltérés oka nem világos. A mintasort kiegészíthetjük a korábban megismert mintákkal is, így az V.2.2. pontban bemutatott bucadarabot zöld, az V.2.1. pontban bemutatott vasgolyót fehér színű salak vette körbe (ld. 28. ábra). Az V.2.3. pontban említett pigiron darabot áttetsző fehér salak burkolta. A karbontartalom és a salakszín itt is mutatja a fenti összefüggést. Képek találhatóak a minták szövetszerkezetéről a DVD mellékleten: Képek/Vizsgálatok/salakszín-karbon%_golyók.

Mindebből arra következtetnek, hogy a karbondúsulás csak úgy lehetséges, ha már a salak FeO-tartalma annyira kicsi, hogy a vasgolyók felszenülése könnyebben bekövetkezik, mint a színvas kiredukálódása. Amíg sok FeO található a salakban, addig nem kezdődik meg a felszenítődés, inkább növekednek a „színvas” golyók. A felszenítődés akkor kezdődik meg, amikor a salak már FeO-ban szegény. Ebben az esetben a kohóból kicsapolt, lehűlt salak töretének színéből következtetéseket lehet levonni a kohóban növekvő vasbuca karbontartalmára. Ha a salak színe világosodni kezd, akkor valamilyen üzemi paraméter változtatásával (pl. kisebb faszén/érc arány, kisebb levegő térfogatáram) elkerülhető a túlzott felszenülés. Az is lehetséges, hogy a régiek ezt az összefüggést jól ismerve, felhasználták a kohászat közben.

De elképzelhető az is, hogy valójában nincs semmilyen összefüggés a salakszín és a vasszemcsék karbontartalma között, hanem egyszerűen csak a redukáló kohóatmoszférában eltöltött idő hossza okozza a növekvő karbontartalmat. Eszerint akár zöld, esetleg fehér salakban is növekedhetne ferrit-perlites vasszemcse, ha a kohó atmoszférája nem okoz erős felszenülést (ld. 35. ábra, pl. 80%-os CO-egyenérték mellett). Minden esetre a gázatmoszféra összetétele alapvető hatású a kialakuló vasbuca karbontartalmára, még ha ezt salakszínváltozás nem is kíséri egyértelműen. Emiatt az atmoszféra figyelése fontos a kohászat közben. Úgy gondolom, a torokgáz színéből mindenképpen következtethetünk annak összetételére, és ezt a régiek is megtehették.

VI.3. A vasbuca kialakulása vasgolyókból

A vasbuca a felszenítődés valamilyen fokán álló, növekvő vasgolyók összehegedésével alakul ki. E szerint az értelmezés szerint a vasbuca tehát összehegedt vasgolyók összessége. Ez jól megfigyelhető a 26. ábrán bemutatott vasbuca keresztmetszetének középső részén. Sokszor találtam olyan vasrögöket a vasbuca körül, amelyek egyszerűen néhány vasgolyó összehegedésével keletkeztek. Salakfázisban kivált vasgolyókról, összehegedt vasgolyókról láthatók képek a DVD mellékleten: Képek/Próbaolvasztások/3. próbaolvasztás.

Az összehegedt vasgolyók tovább növekszenek, eközben karbontartalmuk egyensúlyt tart a kohó atmoszférájával (ld. 35. ábra). A golyók közül az olvadt salak eltávozik, így a kialakuló vasbuca tovább tömörödhet. Megfigyeltem, hogy a buca felső része mindig tömörebb az alsónál. Ebből arra következtetnek, hogy a lesüllyedő vasgolyók felülről hegednek a növekvő vasröghöz.

Az archeometallurgiával foglalkozó kutatók körében sokáig nem volt eldöntött, hogy a keletkező vasbuca milyen helyzetben található meg a kohóban. Vajon a vasbuca található a salak felett, vagy a nagyobb sűrűségű buca az olvadt salak aljára merül? A próbaolvasztások tapasztalatai alapján, úgy látom, a vasbuca mindig a fúvóka alatt, előtt áll össze és növekszik, a salak pedig lefolyik a faszéndarabok között a medence aljára, fokozatosan feltöltve a medencét. Idővel a salak eléri a fúvóka szintjét, ilyenkor válik szükségessé a salakcsapolás. Úgy vélem, a vasbuca azért nem képes lesüllyedni a medencébe, mert az ott uralkodó erősen redukáló atmoszféra nem kedvez a faszén elégésének, és ezért a fennmaradó faszénen feltámaszkodik. Ezt a jelenség mindenképpen kedvez a salak elválásának, ezt használják ki a bemutatott renoffennél is (ld. II.3.1.).

VII. ÖSSZEGZÉS, EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE, TOVÁBBI CÉLKITŰZÉSEK

Összességében elmondható, hogy a címben megfogalmazott bucavas korhű gyártástechnológiáját sikerült feltárni, eredményesen, reprodukálható módon végezni. A III. fejezet célkitűzései többnyire teljesültek, a bucavas előállítás ismert peremfeltételek esetén megoldható. A probléma a keletkezett vasbuca minőségében van, ügyelni kell a túlzott felszenülés elkerülésére (bár csak az egyik kapott vasbucát vizsgáltuk meg). Ennek kulcsa, a fenti vizsgálati eredmények alapján, a kisebb faszén/érc arány alkalmazása, és a kisebb intenzitású fűtás lehet.

A korszerű anyagtudomány nyújtotta eszközökkel, úgy gondolom, nem sikerült kellő mértékben élnem. Sokkal több vizsgálat elvégzése szükséges a termodinamikai folyamatok tisztázására, illetve támaszkodni kell a vizsgálati eredményekre a koraközépkori technológia feltárása során, annak finomításakor. A későbbiekben elvégzendő próbaolvasztásoknak már többé-kevésbé tudományos háttérismerekkel lehet nekivágni, ez mindenképpen még jobb eredményekre ad reményt.

További célkitűzésem, hogy a következő próbaolvasztások során nyert vasbuca átkovácsolásával olyan félterméket, előgyártmányt állítsak elő, amelynek további feldolgozását már egyszerűen el lehessen végezni. A technológiai részleteket változtatva szeretnék még átfogóbb ismereteket szerezni a koraközépkori vasgyártásról, például ki kellene próbálni más kohótípusokat (ld. 6. ábra), más lelőhelyek érceit, más faszénminőséget, stb. A kohóban lezajló termodinamikai és kinetikai folyamatok értelmezéséhez még nagyon sok vizsgálatot kell végezni. A dolgozatban több helyen utaltam ezek szükségességére.

Néhány további konkrét célkitűzés:

- A jelenlegi vasminták EDAX-vizsgálata a szövetelemek végleges azonosítása miatt, C-tartalom és Si-tartalom kimutatása
- Ismételt salakösszetétel-vizsgálat, kitérve a salak esetleges C-tartalmára, CO-tartalmára,
- Ismételt ércösszetétel-vizsgálat, pontosabb eredmények nyérése és salakkezelés szempontjából optimális ércösszetétel meghatározása céljából
- Azonos olvasztásból származó, azonos salakkörnyezetű, más-más méretű, azaz eltérő „fejlődési” fokon lévő vasrögök vizsgálata,
- A meglévő vasbucák kovácsolási kísérlete, sikeresen átkovácsolt darabok vizsgálata,
- További kísérleti olvasztások kisebb C-tartalmú bucavas előállítása érdekében, változtatva az elegyoszlop faszén/érc arányát
- A kohó üzemi paramétereinek mérése (torokgáz összetétel vizsgálat, hőmérsékletmérés).
- A salak összetételének mesterséges módosítása különböző adalékokkal (homok, égetett mész, fahamu), szem előtt tartva a régiek lehetőségeit, korhúséget

Meg kellene ismerni és meg kellene valósítani a középkori vastermékek elkészítését a természetben fellelhető elemi erőforrásokkal, alapanyagokból, kizárólag korhű módon, az eredeti gyártástechnológia felhasználása mellett. Minden kutatásom, próbálkozásom célja ez.

VIII. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munkámat nagyon sokan segítették, nekik ezúton mondok köszönetet:

Bán Krisztián (BME egyetemi adjunktus) – konzulensi munkájáért, ebből kiemelve a 6. próbaolvasztás során és a minták vizsgálataiban nyújtott segítséget,

Farkas Gábor (a próbaolvasztásoknak helyet adó földterület tulajdonosa) – 2003 óta tartó munkáimhoz a tanya területének rendelkezésemre bocsátásáért,

Bartha László (mérnök) – sok tanácsáért, a 2. próbaolvasztásban való részvételért,

Dr. Grega Oszkár (ME, egyetemi docens) – a vegyelemzésekért,

Dr. Sólyom Jenő (MTA-ME Anyagtudományi Kutatócsoport) – a röntgendiffrakciós vizsgálataiért

Márkus Róbert (ME-Metallurgiai és Öntészeti Tanszék) – a vegyelemzésekben és röntgendiffrakciós vizsgálatokban nyújtott segítségéért,

Dr. Kiss Gyula (BME tudományos főmunkatárs) – a metallográfiai vizsgálatokban és a mikrokeménység-mérésben nyújtott segítségéért,

Kanász Tamás (mérnök) – a TDK munkájának rendelkezésemre bocsátásáért,

Pap Endre (hallgatótársam) – a gyepvasérc bányászatban, faszénégetésben és a 7. próbaolvasztáson nyújtott segítségéért,

Molnár József (fáncsikai kovácsmester), Tóth István (karcagi kovácsmester), Beier László (a Somogyfajszai Kohómúzeum gondnoka), Nagy Lőrinc (középiskolai tanár), Hajas Dávid (hallgatótársam) – a gyepvasérc bányászatban nyújtott segítségükért.

IX. IRODALOMJEGYZÉK

Heckenast-Nováki-Vastagh-Zoltay: A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban (A honfoglalástól a XIII. század közepéig), Akadémia Kiadó, Bp. 1968.

Gömöri János: 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

Edvi-Illés Aladár: Az ősz-ősz ókor vasművészete, Bp. 1898.

Terry S. Reynolds: Az ipari forradalom középkori gyökerei, Tudomány 1985/2.

Kerpely Antal: Adatok a vas történetéhez Magyarországon, Bp. 1898

Vidovszky István: A XVIII-XIX. században kézműves technológiával készített kovácsoltvas épületszerkezeti elemek vizsgálata (tézisfüzet nyilvános doktori védéshez), 2007

Kanász Tamás: A bucavas gyártására irányuló kísérletek eredményeinek bemutatása (TDK dolgozat), 2005

Dr. Buza Gábor: Kétalkotós ötvözetek egyensúlyi fázisdiagramjai, egyetemi jegyzet, Budapest 2003

Dr. Török Béla: A vasérettől a vastárgyig tartó korabeli kohászati folyamatokról általában

G. Wolf: Bau eines Rennofens und Verhütten von Eisenerz, Göttingen, 1971.

Dr. Füleky György: Geofizikai körfolyamatok (környezetmérnök MSC-s hallgatók részére), Gödöllő, 2009.

Dr. Kovács Klára: Korrózióvédelem, Bp. 1969, Kiadó: ÉGSZI

Gallina Zsolt: Avar kori kohótelep Kaposvár-Fészerlakon, Kaposvár, 2002.

Dr. Németh Árpád: Kerámiák és kompozitok jegyzet, 2009.

Dr. Verő József: Vasötvözetek fémtenete, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1987.

Georgicus Agricola: Tizenkét könyv a bányászatról és kohászatról, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1985.

Internet:

<http://www.hermes.btk.pte.hu/letoltes/sfajsz/sfajszweb/www.znet.hu/somogyfajsz/koho.htm>

<http://iron.wlu.edu/>

<http://www.astronomynotes.com/solarsys/pics>

http://en.wikipedia.org/wiki/Iron_meteorite

<http://www.warehamforge.ca/ironsmelting/smelt/index.html>

http://pruffle.mit.edu/3.00/Lecture_33_web

http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDNucl/TDNucl_Figs.htm