

A bucavas széntartalmának módosítási lehetőségei a középkori vaskohászatban

1. Bevezetés

1.1. A téma jelentősége

Napjainkban több tízezer különböző kémiai összetételű acél közül választhatunk anyagot mérnöki szerkezeteinkhez, szerszámainkhoz. Vasalapú ötvözetek legfontosabb ötvözőeleme a karbon (C), de emellett számtalan más ötvözőelem (mangán, Mn; szilícium, Si; króm, Cr; nikkel, Ni; kobalt, Co; stb.) pontosan beállított mennyiségben való jelenléte segíti a követelményeknek, igénybevételeknek megfelelő tulajdonságok elérését.

Ezzel szemben a középkorban csupán két ötvöző játszott szerepet a vas archeometallurgiájában, a karbon és a foszfor (P), ezek mellett kis jelentőséggel bírt még az arzén (As) [Buchwald, V.F. 2005]. Néhány elem megjelenhetett továbbá a vastárgyak felületén pár tömegszázalékos nagyságrendben a kovácsolás során történő izzítás okozta leégés eredményeképpen kialakuló felületi dúsulások miatt, ilyenek voltak pl. a réz és a nikkel [Tylecote, R. F., Thomsen, R. 1973]. A vasanyagok mechanikai tulajdonságait viszont csupán a karbonnak és a foszfornak a vaskohászat során kialakuló mennyisége határozta meg. Ez a két elem akár néhány tömegszázalékos mennyiségben is bekerülhetett az előállított vasbuca teljes térfogatába, speciálisan nagy arzéntartalmú gypvasércek kohósításával pedig akár az arzén is [J. Piaskowski 1984].

Legnagyobb mennyiségben a középkorban az archeometallurgiában szokásos fogalmakkal élve [R. Pleiner, 2000] lágyvasat és acélt állítottak elő és dolgoztak fel. Az archeometallurgiával foglalkozó szakirodalom a lágyvasnak általában a nem edzhető, kis széntartalmú ($C < kb. 0,3wt\%$) vas-szén ötvözetet nevezi, acélnak pedig az edzhető vas-szén ötvözetet, amelynek széntartalma akkoriban jellemzően $0,3wt\%$ -tól kb. $1wt\%$ -ig terjedt. Mivel a vasban lévő karbon mennyisége alapvetően befolyásolta az elérhető mechanikai tulajdonságokat, ezért a karbon a középkorban is a vas legfontosabb ötvözőjének tekinthetjük. Legnagyobb mennyiségben bizonyára lágyvasat használhattak fel a kor különböző szerkezeteihez, egyszerű szerszámaihoz. Az acélt feltételezhetően kisebb mennyiségben állították elő és használták fel nagyobb igénybevételű tárgyakhoz, pl. fegyverekhez (kardokhoz, késekhez, lándzsahegyekhez, stb.). Fontos szerepe volt még a vas archeometallurgiájában a foszfornak is. A középkori európai damaszkolt pengékben díszítő célra ugyanis $0,4 - 1,5 wt\%$ foszfort tartalmazó vas-foszfor ötvözeteket használtak fel [Thiele Á. 2014], de gyakori volt a rideg és törékeny foszforvasak felhasználása alárendeltebb célokra is [Buchwald, V.F. 2005]

A vasba bekerülő karbon mennyiségét első sorban valószínűleg a vaskohászat során volt lehetséges „beállítani”. Ekkor a kapott vasbuca teljes térfogatában kis vagy nagy széntartalmú lehetett. Bár utólag, a vastárgyak felületét lehetséges volt cementálással karbonban dúsítani (a technológia ismert volt már a középkorban is [R. F. Tylecote, 1992]), ez csak a felületi rétegekre terjedhetett ki kb. $1-2 mm$ -es mélységben.

A középkorban tehát fontos lehetett, hogy a vaskohászat során előállított vasbuca széntartalmát legalább olyan mértékben befolyásolni tudják, hogy igény szerint lágyvasat vagy acélt állíthassanak elő. Ebben a TDK dolgozatban ezzel foglalkoztunk, választ keresve arra az alapvető kérdésre, hogy egyáltalán lehetséges volt-e ez a kor technológiai színvonalán.

1.2. A középkori vasipar

A legelső, ember által meteorvasból készített egyszerű tárgyak megjelenése hosszú évszázadokkal megelőzi a vas előállításának képességét. Tepe Sialk-ban (Észak-Irán) Kr.e. 4600-4100, a gízai piramisokból pedig Kr.e. 3000-2700 körüli időkből találtak vasgolyókat, vasgyöngyöket [H.H. Coghlan 1956].

A vaskohászat kialakulásának idejét és helyét nem lehet pontosan meghatározni. A szakirodalom szerint a vaskohászat valószínűleg a rézkohászatból alakult ki több területen egymástól függetlenül a Kr.e. 2. évezred második felében. Európában a vas előállítása a vaskohászat kezdetétől a 13. századig

bucakemencékben történt. A kezdetleges bucavaskohászat során a kis karbontartalmú, kovácsolható bucavasat kézi fújtatással, alacsony bucakemencékben, egy lépésben, közvetlenül a vasércből, direkt módszerrel állították elő [B. Török 2013].

2. Célkitűzések

A TDK dolgozatban kutatásainkat a kárpát-medencei avar-, honfoglalás- és Árpád-kori vaskohászat kontextusába helyezve első sorban arra a kérdésre keresünk választ, hogy lehetséges volt-e a középkori vaskohászatban az előállított vasbuca szénttartalmának befolyásolása, ezáltal lágyvas vagy acél igény szerinti előállítása. Ha lehetséges, akkor hogyan, milyen technológiai paraméterek mellett. Emellett vizsgáljuk még azt is, hogy a vasbuca szénttartalmának megváltoztatását célzó technológiai beavatkozások a vasbucakohászat folyamatában milyen egyéb, a technológia szempontjából fontos következményekkel járnak, pl. hogyan változik a vaskihozatal (egységnyi tömegű vasérből nyert vasanyag tömege), a kohósítások során keletkező salak mennyisége és kezelhetősége (ez a salak viszkozitásával függ össze), milyen a vasbuca kovácsolhatósága, tömöríthetősége.

3. Módszerek és eredmények

A vasbuca szénttartalmának a középkori bucavaskohászatban való módosítási lehetőségeit összehasonlító próbakohósítások segítségével vizsgáltuk. A próbakohósítások eredményeképpen kapott vasbucákon anyagvizsgálatokat végeztünk, hogy meghatározhassuk a szénttartalmukat.

3.1. Próbakohósítások

3.1.1. Vasércbányászat

3.1.1.1. A vasérclelőhely

A próbakohósításokhoz olyan vasércet kellett felhasználnunk, amelynek nincs nagy foszfortartalma, így a Magyarország területén többfelé (pl. a Somogyban és a Nyírségben) előforduló, könnyen kifejthető gypvasérc (az angol nyelvű szakirodalomban bog iron ore) nem jöhetek szóba. Ezek ugyanis mocsári körülmények között alakultak ki, emiatt a szerves anyagok bomlásából származó vízben oldott foszfátokat megkötik és sok foszfor lesz bennük, kohósításuk pedig foszforvasat eredményez [Thiele, Á; Kerckmár, Zs. 2014]. Bár bizonyos módszerekkel ezekből a foszfordús gypvasércekből is nyerhető lágyvas vagy acél, mi inkább az északi középhegységben található vasérclelőhelyek egyikét kerestük fel.

Nemrégiben került látókörünkbe egy korábbi andezit bánya a Zemplénben, a Gönc település közelében található „Vashegyen”, ahol a kőfejtés eredményeképpen kialakult sziklafalban több helyütt néhány 10cm-es méretű vasérc konkréciókra bukkantunk (ld. ábrák). Ezeket az alapközetből könnyedén ki lehetett fordítani, és néhány óra alatt össze lehetett gyűjteni a kohósításokhoz szükséges kb. 200kg-nyi vasércet. Nagy nehézséget okozott azonban a lelőhely rossz megközelíthetősége.



Ábra: A gönci vasérclelőhely. Az andezitbánya (a). Vasérc konkrécio az alapkőzetben (b, c). Kifejtett vasérckonkrécio (d).

A lelőhelyen végzett többszöri terepbejárásunk során felfedeztük, hogy a bánya fölött a hegyoldalon, a felszínen is található apró vasércdarabkák. Ezek jelenlétére az adhat magyarázatot, hogy a felszín lepusztulásával az alapkőzetből kipreparálódnak a vasérckonkrécio, amelyek ezután a nevésségtartalmukat elveszítve, összetöredeznek az apróbb darabok pedig idővel szétszóródnak (ábra). Hasonló lelőhely található Egerszalók közelében is az egyik dombgerincen (ábra), de itt az alapkőzet vulkáni tufa.



Ábra: Felszínre került kipreparálódott vasérckonkrécio madardványok Gönc (a) és Egerszalók (b) közelében

A gönci vasérclelőhelyhez korábban nagyon hasonló lelőhelyre bukkantunk Erdélyben, Barót mellett egy homokkőbányában. Itt jóval nagyobb méretű vasérckonkréciók fordultak elő az alapkőzetben (ábra)



Ábra: Homokkőbánya vasérckonkréciókkal Barót közelében

Kercsmár Zsolt geológus ismerősünk elmondása szerint a gönci gypvasérc konkréciók genetikája a következők szerint vázolható fel. „A középső-miocén (bádeni, szarmata) vulkanizmus forróvizes oldatait által szállított oldott vas kiválása hozza láétre a konkréciókat. A fő vulkáni tevékenység már nem zajlik, de a magmakamrával (másodlagos, harmadlagos...stb.) kapcsolatban álló meleg vizek szállítják oldatban az ionokat. Ha ez átszivárog egy porózus kőzetben, homok, agyagos homok, akkor (egyenlőre nem teljesen ismert okok miatt) konkréció képződés indulhat meg. Szintén posztvulkanikus tevékenységekhez köthető a baróti lelőhely is, ahol a göncinél fiatalabb az ércesedés (a homok ott felső-miocén, pannóniai).”

Farkas Gergő, a környéket jól ismerő segítőnk további pár gondolattal ezt még kiegészítette: „A gönci kőfejtőben szintiszta andezitet bányásztak, a Zemplénnek ez a fő alkotóeleme. Érdekes módon a környező hegységek mind mészkőből állnak, de a Zemplén andezitből. Néhol egy kis riolit vegyül bele, de az inkább a belseje. Ugyan ez kőzet legközelebb a Mecsekben figyelhető meg, és valahol Kőszeg Írott-kő környékén, tehát ritkának mondható. A Zemplén vulkáni eredetű és viszonylag fiatal hegység. Az andezitben itt nagyon komoly hidrotermális tevékenység zajlott, emiatt dúsult fel benne az arany, az arzén és a réz. Ami fontos, hogy az andezit felett pár méter homokkő, agyag, márga ilyesmi van, ebben vannak a vas konkréciók (párhuzam a baróti lelőhellyel), ezért valószínűsíthető, hogy nincs benne réz és arzén. A vas konkréciók tele vannak folyami kavicssal, nád és kagyló darabokkal, tehát vélhetően nem az aranyat feldúsító hidro-termális tevékenységhez van köztük, hanem más folyamat hozta létre őket. Anno csak az andezit kellett, ezért a homokkővet eldobálták róla, de ilyen jellegű meddőhányó vagy nincs a környéken, vagy azóta benőtte a növényzet. Érdekes továbbá, hogy ahol vasérc van ott lehet kovamoszat vázakat is találni, ezek is hasonlóan tele vannak kagylókkal.”

Az eredmények későbbi értékelése szempontjából fontos lett volna a gönci vasérc kémiai összetételének ismerete. ICP vegyelmzésreadtunk le mintákat, de a vegyelmzési eredmények a TDK dolgozat benyújtása előtt nem érkeztek meg.

3.1.1.2. A gönci vasérclelőhely ipartörténeti, archaeometallurgiai vonatkozásai (Farkas Gergő elmondásai alapján)

A Gönc és Telkibánya között elhelyezkedő Vashegy történelméről igen kevés adat áll rendelkezésre, átfogó vagy egyes részeit érintő kutatás soha nem zajlott itt. A kissé tágabb értelemben vett környék leleteiben igen gazdag, kő- és bronzkori leletanyaga hatalmas. A hegy előterében lévő patak mentén került elő az ún. zsujtai bronz kincs, számos bronz karddal és harci szekér alkatrészszel. Ebből látható,

hogy a terület már a késő bronzkorban is igen jelentős népességgel és iparral bírt (a kincs véletlenül, kútásás közben került elő 1926-ban, feltárást azóta sem végeztek a helyszínen). Az ezt követő vaskorból szintén bőven kerültek elő leletek, elsősorban kelta vastárgyak. (Vörös István : Magyar régészet az ezredfordulón Bp, 2003.)

A kelta lakosság itt megtelepedett részét vélhetően a cotinus törzs adta, ha nem is a kezdetektől fogva. A cotinusok területének itt húzódhatott a déli határa, azonban az általuk birtokolt terület kiterjedése nem pontosan ismert. A cotinus nép munkája a vaskorban a vasfeldolgozás terén különösen nagy jelentőséggel bír. Az elterjedésük nagyjából lefedi a Sajó mentét és ahhoz keleti irányból kapcsolódó Gömör-Szepesi Érchegységet, de dél felé egészen a Bükk és a Zemplén déli részéig terjed. A bükki és a felvidéki vasbányászat alapjait ők teremtették meg és ezen a vidéken elsőként kezdtek iparszerű vaskohászattal foglalkozni. Megtelepedésük nyomai mindenütt összekapcsolódik az adott terület vasérc előfordulásaival is, ilyen vidékeken megfigyelhető egy különösen kitett magaslaton épített erődítményük nyomai (jelen esetben a telkibányai Cser hegyen) és az azt körülvevő tanyaviláguk. Vélhetően nyaranta kirajzottak az elszórt tanyákra, ahol mezőgazdasággal és állattartással foglalkoztak, telente pedig erődjeikben vasérc feldolgozással és fémművességgel foglalkoztak. (Szabó Miklós : A kelták nyomában Magyarországon Bp, 1976.)

Élénk vaskereskedelmet folytattak a keletről idáig elmerészkedő szkítákkal, akik egy idő után megtelepedtek a környéken és egyfajta kelta-szkíta keverék népesség is létrejött a Bükk és a Zemplén déli, keleti oldalán.

A cotinusok története elég homályos folt a történelemben, Tacitus ír róluk, megemlíti, hogy kelta nyelven beszéltek és igen magas szintű vasipart folytattak. Augustus hadvezére Vinicius az alföldi hadjárata során a Bükk lábáig jutott és leírja, hogy onnan északra a cotinusok országa terül el.

A cotinusok konkrét vaskorban való vasfeldolgozási módszerei terén is rengeteg kérdés merülhet fel, nem tudjuk, hogy követték-e a nyugatabbra élő kelták ilyen irányú módszereit, vagy alkalmazkodtak-e a helyi vasérclelőhelyek adta lehetőségekhez. A Gömör-Szepesi Érchegység területén az 1890-es évektől zajlottak kutatások ennek a témának a tisztázására, de a XIX-XX. századi intenzív vasércbányászat és iparosítás nagyrészt eltüntette a korábban ott dolgozó cotinusok munkájának nyomait. (Pecz Vilmos : Ókor lexikon I-II., Bp, 1904)

A cotinusok és vasiparuk végét a kvád betelepülés okozta, akik a nyugat felől a mai német és cseh területekről vonultak ide, az idősebb Drusus vezette római támadások miatt (Kr.e.9). A kelet felé húzódó germán kvádok és markomannok leigázták a cotinusokat, akik innentől ugyan még tovább folytatták a vas feldolgozást, sőt a hódítóikat is ellátták illetve megtanították erre, de egyfajta vazallus népként éltek tovább. Lassan feloldódtak a germán kvádokban, és Cassius Dio szerint a markomann háborúban (Kr.u.168-tól Kr.u.179-ig) a cotinusok teljesen megsemmisültek, ennek oka, hogy a római kelet felé szorították a kvádokat, onnan pedig a gótok támadták őket, a két oldalról támadott törzsek a sorozatos vereségek hatására jórészt kipszultak, kisebb részük elvándorolt. Az még tudható, hogy a cotinus nép maradéka a mai Erdély területére vándorolt, a dák provincia területére, a kvádokba beolvadt részeik pedig igyekeztek nyugat felé római területre költözni. (Vékony Gábor : Dákok, rómaiak, románok Bp, 1989)

Innentől következik az a hatalmas fehér folt a történelemben, aminek áthidalása sok kutatást igényel még. Az elfogadott történelemtanítás szerint ezt követően a területet figyelmen kívül hagyták a Kárpát medencét megszálló népek. Gönc első hitelt érdemlő említése csak 1219-ből való, Telkibányáé pedig 1270-ből. Az időközben eltelt jópár évszázad alatt történelemtől nem sokat tudunk. Az avarok idejéből nem maradt ránk még szórvány leletként sem semmi, vélhetően ekkoriban a lakatlan területre megkezdődött a szlávok betelepülése, de érdemleges ipart ők sem folytattak. A honfoglalás idején is kiesett az érdeklődés köréből ez a vidék, a magyarok csak jóval délebbre telepedtek meg, idáig még talán a gyepű sem ért fel, határőrizetre telepített népeik a kabarok és a kálizok telepedhettek meg erre felé. Szent István húga, Sarolta és férje Aba Sámuel Aba nemzetsége uralta ezt a területet. Az Abák köztudottan muzulmán kálizoktól eredtek, Anonymus szerint a honfoglalás idején Ed és Edömén volt az Abák ősapja, akiket ő kunnak nevez, de minden bizonnyal keverte a népnéveket. A terület nevét adó Aba nemzetség első ismert alakja Finta volt, a kunok főbírája,

azonban mégis feltételez valamiféle kun kapcsolatot. A gönci Vashegygel szemben lévő Abaújvár és a szomszédos Gönc volt sokáig az Aba nemzetség és Abaúj vármegye központja.

Anonymus így jegyezte fel: „Árpád vezér nagy földet adott Ednek és Edöménnek a Mátra-erdőben, ahol az unokájuk, Pata később várost épített. Az ő sarjadékukból származott hosszú idő után Sámuel király is, akit kegyességéért Abának hívtak”.

Pata nevéből származik az említett városának neve Gyöngyöspata, a kegyesség alatt pedig az Aba a török (káliz) apa szót értjük.

Az azonban biztosnak tűnik, hogy Aba Sámuel székhelye Eger és Gyöngyös környékén volt, ő alapította az Egeri Püspökséget és Abaúj vármegyét. (Kristó Gyula : nem magyar népek a középkori Magyarországon Bp, 2003.)

A kálizok vasművességéről még annyit sem tudunk, mint a cotinusokéről, előbbi nép sokkal inkább a méhészetről és a borkészítésről vált ismertté a Bükk déli vidékén.

Ahogy előbb a cotinusok, úgy a kálizok és szép lassan eltűntek a vidékről, az 1241-es és az 1285-ös tatárjárás is érzékenyen érintette a terület lakosságát, ugyanis mindkét alkalommal itt törtek az országba a tatárok és mindkét alkalommal komoly csaták zajlottak a szűkebb értelemben vett térségben. A környék nem néptelenedett el teljesen, de helyiek feloldódtak az újratelepítéskor beáramló német és olasz ajkú többségben. A terület betelepítése már az un. királynő németjeivel kezdődött, Szent István felesége Gizella telepítette ide bajorjait, akik közül Kunz (a Konrád személynév bajor megfelelője) nevéből ered Gönc neve is. De a környék olyan mértékben elsvábosodott, hogy a török hódításokig német nyelvterületként maradt meg, a szepesi szászok érdekeltségéeként. Vasipara ekkor már végkép nem lehetett jelentős, sehol sem említenek ilyen jellegű tevékenységet, az itt húzódó lengyel út miatt a kereskedelem élénk volt, de Gönc kapcsán jóformán csak a borkereskedelem, és az állattartás szerepel a leírásokban. A szomszédos Telkibánya ekkoriban igen jelentős arany és ezüst bányászatot tudhatott magáénak, ezzel kapcsolatban számos írott anyag maradt, de az ezzel szükségszerűen együtt járó vas felhasználását kínosan kerülik a források. Az arany és ezüst ércei jóval nagyobb mennyiségű vasércel együtt fordulnak elő és a bányászat is rendkívül nagy vasfelhasználást feltételez a szerszámok terén, de az írók kizárólag az aranytermeléssel foglalkoznak.

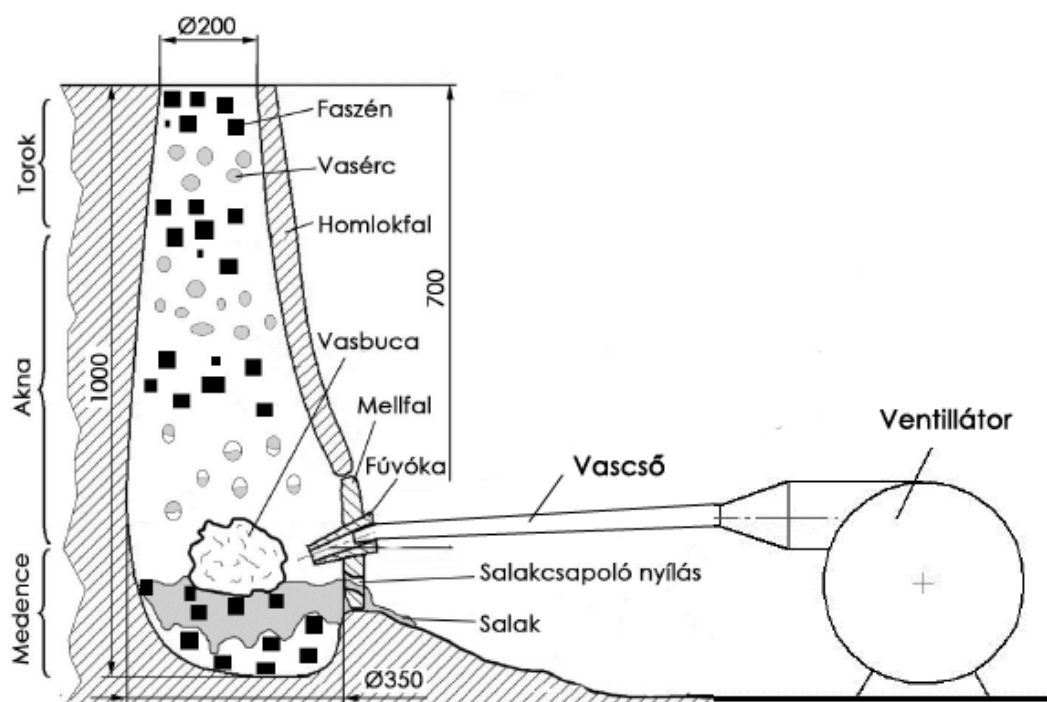
Gönc környékén is jelentős lehetett a kézműipar, a céhes élet, itt viszont a gönci hordó került az érdeklődés középpontjába, az ezzel járó vasszükséglet egyáltalán nem kérdéses a korabeli íróknál. A középkor derekán a tokaj-hegyljai borvidék és lengyel, balti területek között élénk borkereskedelem folyt, a szőlőtermő területek északi pereme Gönc magasságában húzódott, és az itt húzódó Hernád völgye adta azt a lehetőséget, hogy Gönc borkereskedelmi központtá vált. A szerepe olyannyira meghatározó volt, hogy gönci hordónak nevezték a korszak legfontosabb űrméretét, egy gönci hordó mint mértékegység, térfogata 136 liter, ebben mérték a szállítandó bor mennyiségét. A jelentősége ma is megvan a tokaji aszúbor készítésénél. A mértékegység léte egyszerű kérdés, egy hosszú szekéren, melyet két ökör elhúzott pont négy darab gönci hordó fér el hosszában. A római idők óta meglévő utak szabvány szélessége nem tette lehetővé a szekerek szélességének növelését, a tengelytáv szigorú mérték volt akkor is, mert az utak szélessége szerint, a túl hosszú tengelyű szekerek nem fértek egymással szemben. Hosszában addig lehetett nyújtani a szekeret amíg az elbírja a súlyt és az ökrök is elhúzzák. Nem utolsó szempontként tengelytörés esetén a kocsisnak egyedül le- és fel kellett pakolnia a rakományt, amely szintén ekkora hordóméret esetén volt optimális. Tehát a legkedvezőbb és leghasznosabb helykihasználás miatt alakult ez az űrméret és erre alapult a helyi kádáripár is. A hordókészítés manapság komoly vasipart is feltételezne, lévén a hordók abroncsa vasból készül, de a fennmaradt korabeli hordók abroncsai somfából vannak, mindenféle vasalkatrész nélkül készültek. (Dr.IványiBéla : Gönc szabadalmas mezőváros története Gönc, 1988)

3.1.2. Próbakohósítások

A próbakohósításokhoz egy kivételtől eltekintve pörkölt vasércet használtunk fel. Az összegyűjtött vasérc konkréciókat szabad tűzön, kb. fél napig pörköltük. A kihűlt pörkölt ércdarabokat ezután jóval könnyebben össze lehetett törni, mint pörköletlen állapotban a kohósításokhoz felhasznált kukoricaszem méretűre. Az érc aprítása közben sok por is keletkezett, így az aprított ércet 3mm-es

lyukméretű szitával leszitáltuk (a Szepes-Gömöri Érchegységben egész „hegyek” található leszitált vasércből, amik a kelták vaskohászatával hozhatók összefüggésbe, Farkas Gergő elmondása alapján). Ezáltal keletkezett egy 0-3mm-es szemcseméretű és egy kb. 3-20mm-es pörkölt vasérc frakció. Mindkét frakció homogénnek volt tekinthető a kémiai összetétel szempontjából. A kísérletek során mindkét frakciót megpróbáltuk kohósítani.

A kísérletekhez a 8-12 században Európa-szerte sok helyütt, nálunk Somogyban az avar- és honfoglalás kori vaskohászatra jellemző (fajszí-típusúnak nevezett) beépített bucakemencét használtuk (ld. a bevezetést), amit a régészeti feltárásokon előkerült kohómaradványok alapján építettünk meg (ld. ábra) homokkal soványított agyagból. Azért ezt a kohótípust választottuk a kísérleteihez, mert ez egy rendkívül masszív konstrukció, amelyben akár 50 kohósítás is elvégezhető, szemben a középkorra szintén jellemző szabadon álló, jóval kevesebbszer használható fajtákkal. Mivel a kohósításokat ugyanabban a kohóban végeztük el az egyes próbakohósítások eredményei jól összehasonlíthatók. A próbakohósítások során kézi fújtató helyett ventilátort használtunk a kohó tűzének szítására, mert a ventilátorból kifújt levegő térfogatárama pontosan szabályozható, szemben egy bőrfújtatóéval, így ez is elősegítette a kísérletek jobb összehasonlíthatóságát.



Ábra: Az összehasonlító próbakohósításokhoz használt beépített bucakemence felépítése, részei, méretei és a kísérletek elrendezési vázlata

A próbakohósításokat a Thiele Ádám erdő széli kovácműhelyének udvarán, egy hegyoldalon végeztük el (ld. ábra). A próbakohósítások között néhány nap telt el. A kohósítások során egy-egy technológiai paraméter megváltoztatásának hatását vizsgáltuk. Ilyenek voltak a kohósított vasérc pörkölt illetve pörköletlen állapota, szemcsemérete, a befújt levegő térfogatárama és a kohósítás során alkalmazott faszén/vasérc arány.

A kísérletek reggel kezdődtek a kohó előfűtésével (az előfűtés jelenti a kohósítás kezdő időpontját, T). Ezután az előfűtött bucakemencét feltöltöttük faszénnel, amit a meleg kohóban izzásba jött és a ventilátorral segítségével tovább lehetett a kohót hevíteni (ez volt az előfűtés második szakasza). A ventilátor által kifújt levegő térfogatárama fojtással szabályozható volt. Egy-egy kohósítást mindig állandó levegő térfogatáram mellett végeztünk el. A kohósítások során 1-es és 3-as fokozatú fújtatások voltak, ezek kb. 100 illetve 250l/perc térfogatáramnak feleltek meg. Az előfűtés kezdetétől számított kb. háromnegyed – egy óra elteltével (T+:045 .. T+1:00) a már előmelegített kohóba beadagoltuk az első adag vasércet, amelyet az eléggő faszén süllyedésének megfelelően faszén beadagolása követett. Így következtek egymás után a vasérc és faszén adagok (egy adag faszén illetve

vasérc 300g-os volt). Minden kohósítás során összesen 12,5kg vasércet használtunk fel. A kohósítás kezdetétől számított kb. harmadik órában (T+2:30 .. T+2:45) került sor az első salakcsapolásra, amelyet átlagosan 15 percenként újabbak követtek. Az utolsó vasércadag beadagolásra után a kohót „lefújtattuk”, azaz hagytuk, hogy az elegyoszlop a fúvóka magassága fölötti kb. 20cm-es szintre süllyedjen (ez további kb. 1 órás fújtatást igényelt). A kohósítás végén a mellfal eltávolításával kibontottuk a kohót és kihúztuk a fúvóka előtt-alatt elhelyezkedő izzó vasbucát, amit farönkön, fakalapáccsal összetömörítettünk. Ezt a tömörített vasbucát illetve a tömörítés közben leesett vasdarabokat is összeszedve digitális mérlegen lemértük, azért, hogy az egyes kohósítások vaskihozatalát össze lehessen hasonlítani. A tömörített vasbucák kb. 2-3kg-osak voltak.



Ábra: A próbakohósítások helyszíne Thiele Ádám erdei kovácsműhelyének udvarán, a hegyoldalon (a). A bucakemence próbakohósítás közben (b). Az egyik tömörített, még izzó vasbuca (c). Egy vastömb kikovácsolása gépkalapáccsal (d).

A tömörített vasbucát ezután Thiele Ádám vastömbbé kovácsolta a kovácsműhelyében AJAX 2-es rugóskalapács segítségével. Ez a munka további 1-2 órát vett igénybe. A vastömböket szintén lemértük mérlegen. Az egyes vastömbök keresztmetszeti mérete lehetőség szerint hasonló volt (kb. 40x20mm), hogy a vaskihozatal továbbra is jól összehasonlítható maradjon. Az egyes kikovácsolt vastömbök tömege kb. 1,5-2 kg volt.

A kovácsolás után a még vörösen izzó vastömböket vízben leedzettük és többségét középen kissé bevágtuk és félbetörtük, egyrészt azért, hogy a későbbi anyagvizsgálatok során könnyebben kezelhető méretűek legyenek másrészt, hogy a töretfelületüket szemrevételezhessük és már a kovácsolás után az adott (nem reprezentatív) keresztmetszetben értékelhessük a hozzávetőleges kémiai összetételt (ábra). Általában ridegtörésre utaló töretfelület volt látható, a repedés a szemcsehatárokon terjedt tova, így a szemcsék táthatók lettek. Jellemző volt továbbá, hogy a töretfelületen repedések, rétegek leválása, szétválása volt megfigyelhető. Ennek oka, hogy a

vastömbökben még sok salakzárvány volt, illetve a kovácshegesztések nem voltak mindenütt tökéletesek. A bucavasakra jellemzően a vastömbök szálas-réteges makroszerkezet is jól látható volt.



Ábra: A 3. kísérlet vastömbjének töretfelülete

A kísérletek során megfigyeltük a salak kezelhetőségét, a kohóbontás után a vasbuca tömöríthetőségét, a tömörített vasbuca tömbbé kovácsolása közben pedig a kovácsolhatóságát. Összesen 8 próbakohósítást végeztünk el, de ezekből csak 7-et mutatunk be ebben a TDK dolgozatban részletesen 2-8 számozással. Az első kísérlet során kézi fújtatót használunk azért, hogy később össze lehessen hasonlítani a szakaszos és a folyamatos fújtatás hatását is. Mivel a szakaszos kézi fújtatás közel ugyanazt eredményezte a vaskihozatalra, a salak kezelhetőségére és a kapott vasbuca szénttartalmára, mint a ventilátor 1-es fokozatával történő folyamatos levegőbefúvás, így ennek részletes bemutatásától eltekintünk.

A kísérlet eredményeket összefoglalóan, táblázatba rendezve az alábbiakban lehet látni. A kikovácsolt vastömböket az ábra mutatja (2-7 kísérletek).

Kohósítás	2	3	4	5	6	7
Vasérc	Gönci vasérc, kukoricaszem méretű, pörkölt, 12,5kg	Gönci vasérc, kukoricaszem méretű, <u>pörköletlen</u> , 12,5kg	Gönci vasérc, kukoricaszem méretű, pörkölt, 12,5kg	Gönci vasérc, <u>por</u> , pörkölt, 12,5kg	Gönci vasérc, kukoricaszem méretű, pörkölt, 12,5kg	Gönci vasérc, kukoricaszem méretű, pörkölt, 12,5kg
Arányok	300/300g f/v	300/300g f/v	300/300g f/v	300/300g f/v	<u>600/300g f/v</u>	<u>150/300g f/v</u>
Levegő	Ventilátorral 1-es fokozat	Ventilátorral 1-es fokozat	Ventilátorral <u>3-as fokozat</u>	Ventilátorral 1-es fokozat	Ventilátorral 1-es fokozat	Ventilátorral 1-es fokozat
Előfűtés fával	T	T	T	T	T	T
Előfűtés faszénnel és fújtatás kezdete	T+1:00	T+0:45	T+1:00	T+0:45	T+1:00	T+1:00
Első érc	T+1:30	T+1:15	T+1:15	T+1:15	T+1:15	T+1:15
Első salak	T+2:30	T+2:45	T+2:30	T+2:15 (a sűrű salak nem folyt le)	T+2:15	T+2:45 (a jól folyó salak kitöltötte a medencét)
Utolsó érc	T+4:30	T+4:15	T+3:30	T+4:45	T+6:00	T+3:15
Kohóbontás	T+5:30	T+5:15	T+4:15	T+6:00	T+7:00	T+4:15
Buca	Σ2,5kg (egyben maradt)	2,6kg + 0,3kg darabok, Σ2,9kg	tömörítéskor összetört, 1,6kg + 0,7kg + 0,5kg darabok Σ2,8kg (de salakos)	nehezen volt tömöríthető, tömörítés közben repedezett, de a kohóból egyben jött ki, Σ2,4kg	Σ2,4kg (egyben maradt)	magas volt a buca, a tetejéről leestek darabok tömörítés közben,

						2,55kg + 0,4kg darabok, Σ2,95kg
Vastömb	Σ1,7kg Nagyon jól tömöríthető, kovácsolható.	Σ2,0kg Nagyon jól tömöríthető, kovácsolható.	0,9kg + 0,55kg, Σ1,45kg Erősen salakos volt a vasbuca, nehezen volt tömöríthető, átkovácsolható.	1,3kg + 0,2kg darabok, Σ1,5kg Poros és erősen salakos volt a vasbuca, nehezen volt tömöríthető, átkovácsolható.	Σ1,8kg (jól kovácsolható, nem repedezett, nem törtek le darabok)	Σ1,8kg (jól kovácsolható, nem repedezett, nem törtek le darabok)
Megjegyzés	Jól csapolható salak	Jól csapolható salak, talán kicsit sűrűbb, mint a 2-es A vasbuca magas volt, a fúvóka fölé ért. A salakmedve egy nagy darabban jött ki és leért a kohó aljára.	Jól csapolható salak. Sok salak, részben leolvadt mellfalazat. A kicsapolt salak nagyon buborékos és zöld töretű. A vasbuca tömör volt, mégis széttört a tömörítéskor. A vasbuca a fúvóka alatt helyezkedett el a kohóban	A salak nagyon nehezen volt kezelhető, viszkózus volt, csapolni többnyire nem lehetett, ki kellett húzni. Zöld töretű folyósalak.	A salak nehezen volt kezelhető, viszkózus volt, csapolni többnyire nem lehetett, ki kellett húzni. A mellfalazat leolvadt a fúvóka fölött és kívülről izzott.	A salak nagyon jól folyt, fekete volt a törete. A salakmedve nagy volt, leért a kohó aljára. Ez volt a legjobb kohósítás az eddigiek közül.



Ábra: a 2-7 kísérletek eredményeképpen kapott vasbucákból kikovácsolt vastömbök

3.2. Anyagvizsgálatok

Az anyagvizsgálatokra szánt vastömböket tehát a kohósítások során kapott tömörített vasbucákból kovácsoltuk ki. A szénttartalom meghatározása érdekében háromféle módszert használtunk. Egyrészt a próbatestek egyik oldalán 10%-os Nitállal történő makromaratással tettük láthatóvá a szén eloszlását. Ezután keménységméréseket végeztünk ezen a kikészített felületen azért, hogy a különböző sötétségűre maródott területek hozzávetőleges szénttartalmát több pontban, gyorsan, HRc értékek hozzárendelésével meghatározhassuk. Ezen felül a szénttartalmat ún. GDOES módszerrel is meghatároztuk próbatestenként 2-3 pontban, a Miskolci Egyetem ARGUM, archeometallurgiai kutatócsoportjának laborjában. Ez a mérés nagyon pontos volt, de sokkal költségesebb, így csak a HRc keménységmérések „kalibrációjaként” használtuk.

3.2.1. A próbatestek előkészítése

A kikovácsolt vastömböknek a felületkikészítésre szánt egyik oldalát sarokcsiszolóval durván síkra csiszoltuk (ez a későbbi keménységmérések miatt volt szükséges, hogy a majdani síkköszörüléssel ne kelljen sok anyagot leválasztani, így közvetlenül a felület közelében lehessen majd keménységet mérni, aminek a szövetszerkezetében így 100% martenzit volt feltételezhető). Ugyanígy nagyjából síkra csiszoltuk az átellenes oldalt is, amin majd a keménységérsek során feltámaszkodott a próbatest. Ezt követően elvégeztük a próbatestek pontos edzését. Ehhez egységesen, egyenletesen és pontosan 950°C-ra hevítettük őket a BME ATT G épületében található hőkezelő laborjának egyik kantálszálas hőkezelő kemencéjében (ilyen alaposan nem lehetett volna elvégezni az edzést a kovácsolóműhelyben). Az ausztenitesítési hőmérsékletet azért választottuk 950°C-ra, mert feltételeztük, hogy lesznek olyan vastömbjeink, vagy a vastömbjeinknek olyan területei, ahol a szénttartalom nulla lesz, ilyen esetben pedig az A3 hőmérséklet 911°C. A hőkezelő kemencében meglévő erősen oxidáló atmoszféra okozta leégési veszteséget mérsékelendő a kemence belső terébe egy pár szem faszenet tettünk, amelynek elizása az atmoszférát feltételezésünk szerint a semlegeshez közelítette, de nem tette cementálóvá. Így elkerülhető volt a kb. 30 perces hőtartás eredményeképpen kialakuló vastag reveréteg.

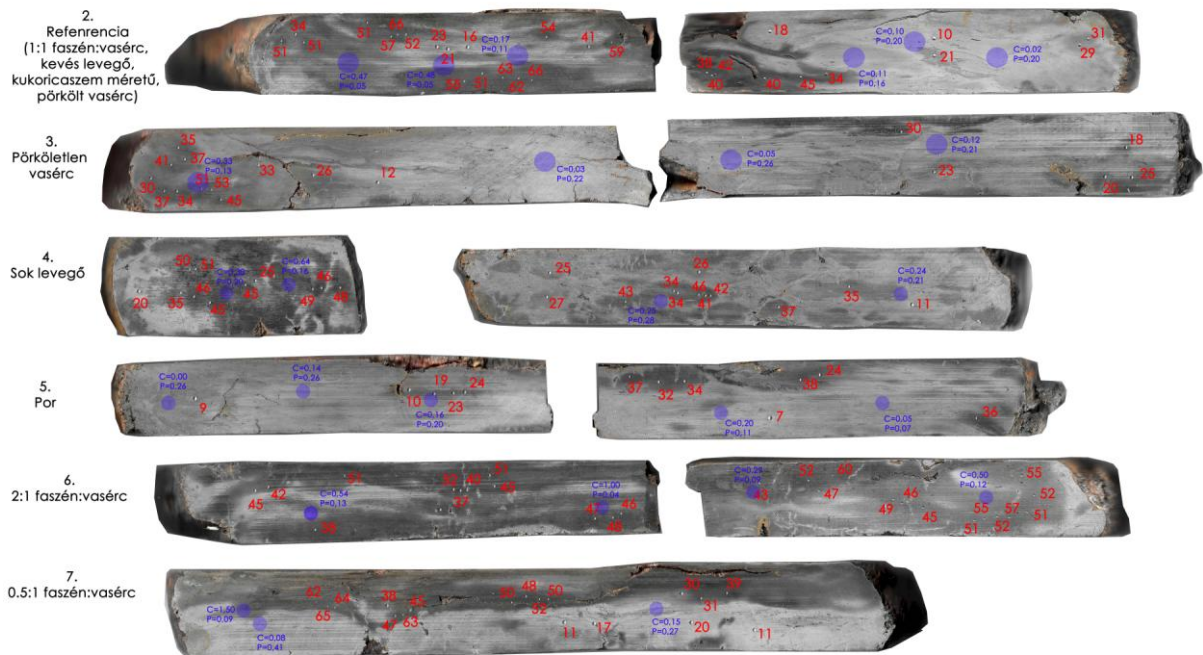
A próbatesteket a hőkiegyenlítődé után egyesével kivettük a hőkezelő kemencéből és egy vödör vízbe dobtuk. A sok próbatest miatt 5 próbatest után cseréltük a felmelegedett vizet. Edzés után a próbatestek egyik oldalát folyamatos hűtés mellett síkköszörűvel síkra munkálta Nagy Péter a BME ATT G épületi forgácsoló műhelyében dolgozó kollégája. Ennek során hozzávetőlegesen 0,5-1mm-nyi anyagot választott le a felületről. Ezeket a fémtiszta sík felületeket a BME ATT Mt épületében lévő metallográfiai laborjában a csiszolatok előkészítésére használt vizes korongos csiszológépen P80-as papírral ismét felcsiszoltuk közvetlenül a makromaratás előtt, de éppen csak a legkisebb mennyiségű anyagot lecsiszolva a felületről, ami már elegendő volt ahhoz, hogy a síkköszörülés karcai éppen eltűnjenek. A makromaratást 10%-os szobahőmérsékletű Nitállal végeztük, minden próbatest csiszolt oldalát 20 másodpercig maratva. Így próbáltuk a különböző próbatestek azonos szénttartamú területeit közel azonos árnyalatúra marni. A maratás után a vastömböket a kikészített felületükkel lefelé fordítva 1200dpi-s felbontással egyszerre beszkeneltük.

3.2.2. HRc keménység mérések és GDOES-mérések

A kikészített felületű próbatesteken ezután HRc keménységméréseket végeztünk a BME ATT G épületében található egyik (jól működő) Rockwell keménységmérőjével. A keménységméréseket minden próbatest esetén több pontban is elvégeztük törekedve arra, hogy a különböző árnyalatúra maródott területek mindegyikére essen néhány keménységmérési pont. A keménységméréseket a vonatkozó szabvány szerint végeztük.

Végül a próbaestek mindegyikén 2-3 pontban GDOES méréseket végeztünk a Miskolci Egyetemen az ARGUM kutatócsoport vezetőjének, Török Bélának a közreműködésével. Ezek a mérések nem csupán a szénttartalmat, hanem minden más elem mennyiségét is kimutatták az egyes mérési pontokban. A szénen kívül jelentős mennyiségben (néhány tized wt%-ban) jelentkezett a foszfor is, de a többi elem csak elhanyagolható mennyiségben volt kimutatható.

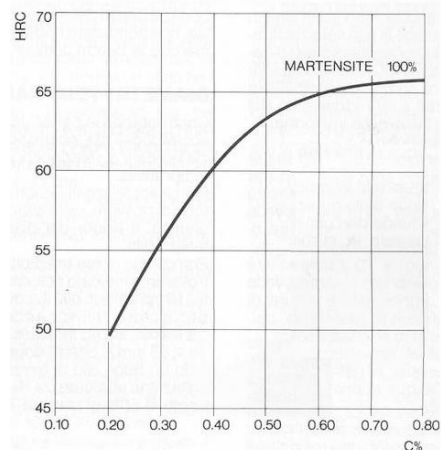
Az egyes próbatestek maratott felületén mért HRc keménység értékeket (pirossal) és a GDOES-sel mért C- és P-tartalmakat (kékkel) az alábbi ábrán összesítve lehet látni.



4. Az eredmények értékelése és következtetések

A kísérleti és anyagvizsgálati eredmények értékelését több szempontból is el kell végezni. Egyrészt meg kell vizsgálnunk, hogy a kísérletek során a technológiai paraméterek változtatásainak hatása milyen, a vaskohászati technológia szempontjából fontos salakkezelhetőségre, vaskihozatalra és a kapott vasbuca tömöríthetőségére. Másrészt az anyagvizsgálati eredmények alapján értékelnünk kell a technológiai paraméterek hatását a vasbuca szénttartalmára. Ezt a kettős felosztást követjük az alábbiakban.

A szénttartalom HRC mérések alapján történő kiértékelését a szakirodalomból ismert Cwt% - HRC összefüggést 100% martenzitre mutató diagram segítségével végeztük el (ld. ábra).



Ábra: Cwt% - HRC összefüggést mutató diagram 100% martenzitre

2. próbakohósítás (referencia)

Az második próbakohósítást tekintjük a referenciának (az első, kézi fújtatós kísérlet bemutatásától eltekintünk). Itt kukoricaszem méretű, pörkölt vasércet adagoltunk be 1/1 faszén/vasérc arány és 1-es fokozatú fújtatás mellett. A salak jól csapolható volt, könnyen folyt, nem okozott problémát. A csapolt folyósalak törete szürkésfekete volt (a töret színe utal a salak kémiai összetételére, általában a fekete és a zöld színek végletei közötti, ahol a fekete nagy, a zöld kis vastartalommal van összefüggésben). A kapott – a többi kísérlet fényében – közepes méretű vasbucát nagyon jól lehetett

tömöríteti, és a tömörítés közben egyben maradt, darabok nem estek le róla. A későbbi vastömbbé való kovácsolás is könnyedén ment. Ilyen technológiai paraméterek mellett ennek az ércnek a középkorban is hasonlóan sikeres lehetett a kohósítása

A kikovácsolt vastömb egyik darabja az anyagvizsgálati eredmények alapján jobban felszenült, mint a másik. A 2a vastömb maratott felületének alsó részén és felül található 60HRc feletti, 0,4wt%-nál nagyobb C-tartalomra utaló terület. Egy-egy pontban a keménység 65HRc fölé emelkedik, ami kb. 0,6wt%-os C-tartalmat jelent. A 2b vastömbnek viszont csak az egyik sarkán található egy kissé felszenült 40HRc körüli keménységű terület, de ez is mindössze pár tized wt%-nyi széntartalomra utal. A többi részen a C-tartalom nagyon kicsi, 0,1wt% vagy az alatti (ld. a GDOES eredményeket).

Összességében ez tehát egy problémamentes és jó vaskihozatalú kohósítás volt és a kapott vastömb az acél anyagminőség alsó határán helyezkedik el.

3. próbakohósítás (pörköletlen érc hatása)

A harmadik próbakohósítás során ugyanilyen technológiai paraméterek mellett, de pörköletlenül kohósítottuk az ércet. A kohósítás időtartama szinte pontosan megegyezett a referenciájával, kis eltérést csak a 15 perccel rövidebb előfűtési idő okozott. A salak némileg hígabbnak mutatkozott. Ebből következően az első salakcsapolás az első vasércadagtól számított 30 perccel később vált szükségessé, mint a referencia esetén (1:00 vs. 1:30), mert a hígabb salak jobban ki tudta tölteni a kohó medencéjét, így később érte el a fúvóka szintjét (az első salakcsapolás akkor válik szükségessé, amikor az olvadt salak megjelenik a fúvóka alján és elkezdi fojtani a légáramot). A csapolt folyósalak fekete töretű volt. A kohóbontás után a salakmedve egy nagy darabban jött ki a kohó aljáról, ami szintén arra utal, hogy a salak jól folyt. A salak jó kezelhetőségének, kis viszkozitásának magyarázata annak nagy vastartalma volt. Ennek oka az lehetett, hogy a vasérc nem volt megpörköltve, így tömörebb is volt, kevésbé tudott redukálódni a kohóban, ezért több vas került a salakba. Ennek némileg ellent mond az, hogy a kohóontás után a tömörített vasbuca tömegét a referenciáénál nagyobbra, 2,9kg-osra mértük és a kikovácsolt vastömb is nagyobb, 2kg-os lett. Ez lett a legnehezebb vastömb a kísérletek során. A vasbuca a kohóban magas volt, a fúvóka fölé nőtt. A vasbuca jól tömöríthető és kovácsolható volt, bár a tömörítés közben néhány kisebb darab összesen 0,3kg-nyi leesett, de ez inkább technikai hibáknak volt betudható.

A kapott vasbuca széntartalma jelentősen elmarad az előzőétől. Csak a kikovácsolt 3a vastömb egyik szélén figyelhető meg enyhén felszenült tartomány. Itt 35-50HRc közötti keménységek voltak mérhetőek, ami alacsony, kb. 0,1-0,3wt%-os C-tartalomnak felel meg. Ezt megerősíti a területen GDOES-sel mért 0,33wt%-os széntartalom. A 3a vastömb többi része karbonszegény és ugyanez jellemző a 3b vastömbre is.

Összességében elmondható, hogy a pörkölés elmaradása nem eredményezett csökkenést a vaskihozatalban, sőt némi növekedés is mutatkozott, amire nem tudunk magyarázatot adni¹, azonban a vasanyag kis széntartalmú lágyvasnak minősíthető (a referenciához képest tehát egyértelműen csökkent a széntartalom). Ebből levonható az a következtetés, hogy a pörkölésnek ennél az érc típusnál nincs igazán jelentősége a kohósítás során. A fontossága abban áll, hogy a nagyobb vasérckonkréciókat a kohósítást megelőzően apróra kell törni, ami pörköletlen állapotban nagyon nehéz, pörkölés után viszont könnyedén megy. A pörkölés hiánya továbbá jobban folyó salakot, ezáltal jobb salakkezelhetőséget eredményezett. A kohósítás problémamentes volt.

4. próbakohósítás (sok levegő hatása)

A negyedik próbakohósítás esetén a referenciához képesti különbség a befűjt levegő nagyobb térfogatáramában volt, ugyanis ennél a kísérletnél végig 3-as fokozaton fűjt a ventilátor. A faszén így természetesen jóval gyorsabban égett el, ennek megfelelően a kohósítás is kb. 1 órával rövidebb lett. Az első salakcsapolás a referenciához hasonló, T+30 perces időpontban történt, a kicsapolt salak törete azonban nem fekete, hanem zöld volt (kevesebb vas volt benne) mégis, a nagy

¹ A vaskihozatal növekedésének az oka talán lehetett az, hogy bár a kísérletek során igyekeztünk minden technológiai paraméter értékét állandónak tartani, kicsi különbségek azért mutatkozhatnak.

medencehőmérséklet miatt jól csapolható, hígban folyós maradt. Megfigyeltük továbbá, hogy a csapolt folyósalak nagyon buborékos volt. A salak színe megváltozásának oka az volt, hogy az erős fújtatás következtében megemelkedett hőmérséklet miatt a fúvóka környezetében a mellfalazat belső része leolvadt (ezt később, a kohó kibontásakor is jól lehetett látni), a mellfalazat elvékonyodott és átizzott. A leolvadó mellfalazat anyaga (ami főleg agyag és homok volt) elsalakult, csökkentve annak relatív vastartalmát és növelve viszkozitását (bár ezt a nagyobb csapolási hőmérséklet miatt nem okozott gondot), salakkezelési problémákat okozott, mert nagyon sok salak keletkezett (gyakorlatilag kicsapoltuk a kohó belső falazatának egy részét).

A kohóbontáskor a vasbuca a kohó alján volt, a fúvóka alatt. A kihúzott vasbuca nagy volt, de nehezen volt tömöríthető, sok sűrű salakot tartalmazott. Tömörítés közben egy nagyobb (1,6kg) és két kisebb (0,7 és 0,5kg) darabra esett szét. Összesen 2,8kg-nyi vasanyagot mértünk le, ami a referenciához képest nagyobb, de figyelembe kell venni, hogy ez a buca jóval salakosabb volt, így a tömörített darabokban is sok salak maradt, ami tömeget növelt. A vaskihozatal tehát némileg kisebb lett, mint a referenciáé. A vasbuca salakosságának, rossz tömöríthetőségének oka a sűrűbb salak volt, amiben a vasszemcsék nem tudtak közel kerülve egymáshoz jól összehegedni, így a buca nagyon szivacsos maradt. Bár a két kisebb darabot a későbbi kovácsolás során sikerült összehegeszteni, a hosszú és nehézkes kovácsolás alatti nagy leégési veszteség és a tömörített vasbucadarabok amúgy is nagy salaktartama miatt a kikovácsolt két vastömb kicsi lett, összesen 1,45kg-os. A kohóbontás után láthatóvá váló salakmedve nagy volt és egészen hátranyúlt a kohó medencéjében.

Az anyagvizsgálati eredmények alapján láthatjuk, hogy a 4a vastömb nagyobb széntartalmú, mint a 4b. A 4a vastömb kikészített felületének kb. 2/3-án mutatkozik felszenülés, itt az elért C-tartalom a keménység- és a GDOES-mérések alapján kb. 0,4-0,6wt%. Ezt a vastömböt tekinthetjük acélnek. A másik 4b, nagyobbik vastömb viszonylag egyenletesen kb. 0,2wt%-os széntartalmú lett, ez alapján ezt a darabot inkább lágyvasnak kell minősíteni, az egész kohósítás eredménye tehát a referenciáéhoz hasonló, az acél anyagminőség alsó határán elhelyezkedő vasanyag lett.

Összefoglalóan elmondható, hogy a befújt levegő megnövelt térfogatárama technológiai problémákhoz (leolvadó mellfal, sok salak) és rosszul tömöríthető, salakos vasbucához vezetett, amelynek ráadásul a széntartalma sem növekedett meg a referenciáéhoz képest ezen az áron.

5. próbakohósítás (por állagú érc hatása)

A referenciához képest ennél a kísérletnél por állagú, azaz 0-3mm-es frakciójú pörkölt vasércet adagoltunk be. A kohósítás során azt tapasztaltuk, hogy ez a poros vasérc nagyon lefojtja a kohót, nem engedi átszellőzni. Ezért a faszén is jóval lassabban tudott elégni, így a kohósítás időtartama 30 perccel megnövekedett. Az első salakcsapolásra viszont már 15 perccel korábban, T+2:15-nél sort kellett keríteni és ezután is sűrűn el kellett végezni. A csapolt salak nagyon nehezen folyt, törete zöld volt, a salakcsapoló nyíláson inkább ki kellett húzni, a salak kezelhetősége nagyon rossz volt. A kohóbontás után látható salakmedve kicsi volt (az eddigi legkisebb). A kihúzott vasbuca viszont magas volt, nagyméretű, de poros és sok sűrű salakot tartalmazott, így nagyon nehéz volt tömöríteni. A tömörítés közben egyben maradt és 2,4kg-os tömegű lett, ami hozzávetőlegesen a referenciáéval megegyező. A kovácsolás során azonban a referenciához képest (a rossz kovácsolhatóság miatti hosszabb kovácsolási idő okozta nagyobb leégési veszteség okán) csak kisebb, 1,5kg-os vastömböt sikerült kikovácsolni a tömörített vasbucából. Mindennek az oka az lehetett, hogy a por állagú érc a nagyobb fajlagos felület miatt gyorsabban tudott redukálódni a kohóban, így relatíve több vas színült belőle. A vaskihozatal azért nem nőtt ennek ellenére meg, mert a poros érc egy része átesett a kohón, mindenféle redukció nélkül és lepergett a kohó medencéjének az aljára, ez tehát sem a salakképzésben nem vett részt sem a vasbuca tömegét nem növelte, bár a vasbucát is porossá tette. A túlredukálódott érszemcsék miatt azonban a salakba kevesebb vas jutott, így az sűrűbb lett, és nehezebben kezelhető.

A kikovácsolt vastömb mindkét fele nagyon kis C-tartamú. Csak az 5b mintán figyelhető meg helyenként némi felszenülés, de itt is csak legfeljebb 40HRC-s értéket ér el a keménység, ami 0,1wt% körüli C-tartalomra utal. A GDOES-mérések némileg magasabb 0,1-0,2wt% körüli C-tartalmakat. A vastömbök lágyvasnak tekinthetők. Ennek a mintának lett a legkisebb a C-tartalma az eddigiek

közül. Az apró szemű ércből, annak nagy felülete miatt azt vártuk volna, hogy jobban felszenülnek a belőle színült kis vasszemcsék. Ez feltételezhetően azért nem következett be mégsem, mert a felszenülés a kohónak a fúvóka feletti 10-30cm-es szakaszában megy végbe, ahol már az atmoszféra redukáló és a hőmérséklet is elég magas (900-1200°C körüli, a korábbi hőmérsékletmérési eredmények szerint). Mivel a poros érc lefojtotta a kohót, ezt a zónát is leszorította és leszűkítette közvetlenül a fúvóka fölé, így nem tudtak a színült vasszemcsék a cementációs zónában a felszenülésüket eredményezően hosszan tartózkodni. Ezt a cementációs zónát mutatja be az ábra, amelyen ezen kívül fel van tüntetve a bucakemence többi „nevezetes” zónája is, ami a későbbiekben kerül majd csak említésre (ld. ábra)

Itt a cementációs zónában a felszenülést négy fő tényező határozza meg. 1) A színült vasszemcsének a cementációs zónában eltöltött ideje (ez a kísérleti tapasztalatok szerint nagyságrendileg kb. 10 perc lehet). 2) A cementációs zóna hőmérséklete vagy kiterjedése (ami a kísérleti tapasztalatok és korábbi hőmérséklet mérések alapján a referenciakohósításnál pl. kb. a fúvóka feletti 10-30cm-es tartományban lehet). 3) A cementációs zóna CO/CO₂ aránya (ami első sorban a faszén/vasérc aránytól függ, ld. később). 4) A színült vasszemcséket körülvevő salak karbonadszorpció-gátló hatása (azaz mennyire veszi körbe olvadt salak a vasszemcséket és gátolja a kohó atmoszférájával való érintkezésüket).

Összességében elmondható, hogy a poros érc kohósítása technológiai problémákhoz vezetett, mert az érc túlredukálódik és a sűrű salak nagyon nehezen lesz kezelhető illetve a vasbucát is rosszul tömöríthetővé teszi. Ráadásul a széntartalom is nagyon kicsi lett a bucában, mert a poros érc légáramfojtó hatása miatt leszűkítette a kohóban a cementációs zónát.

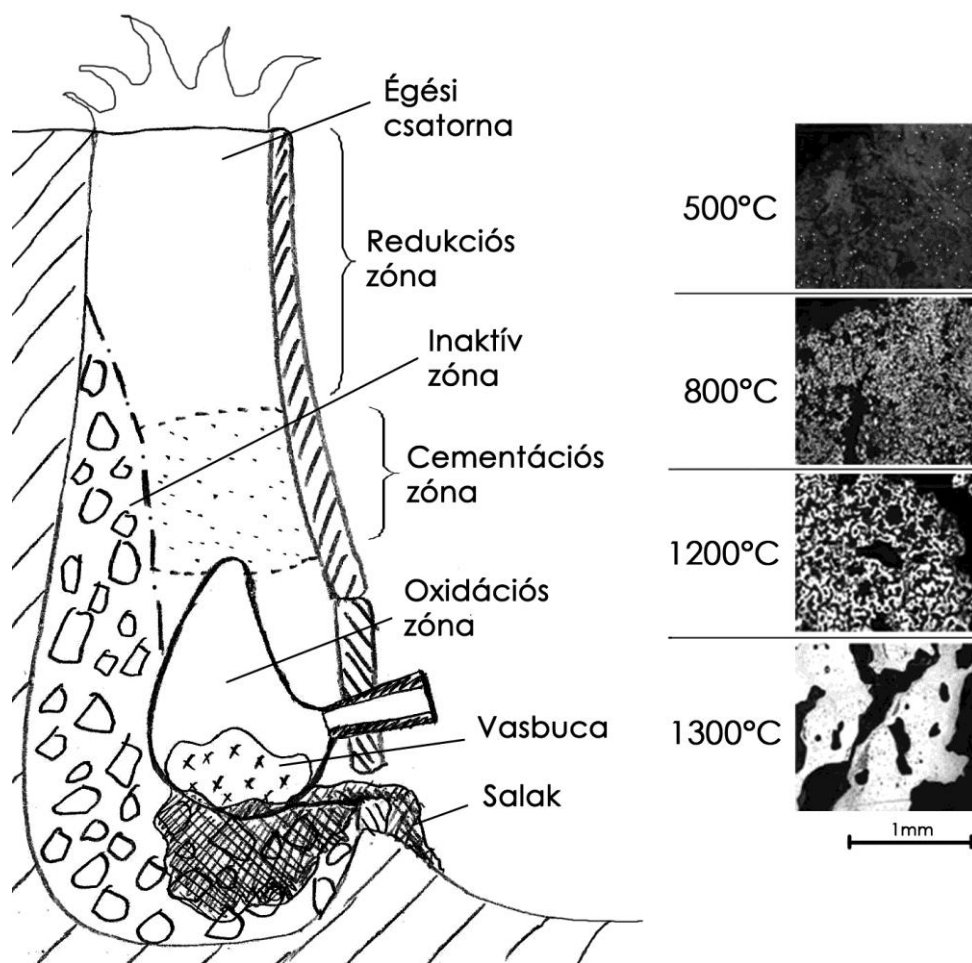
6. próbakohósítás (dupla faszén hatása)

A referenciához képest ennél a kísérletnél a faszén/vasérc arányt dupláztuk meg 2/1-re. A nagyobb mennyiségű faszénnek köszönhetően a kohósítás időtartama jelentősen, 1 óra 45 perccel növekedett meg a referenciájához képest. Az első salakcsapolásra 15 perccel hamarabb került sor, a csapolt salak nagyon sűrű volt, ki kellett húzni és piszkálni, a salakcsapoló nyíláson nem folyt ki magától. A törete zöld volt. A salak kezelhetősége az 5. próbakohósításhoz hasonlóan rossz volt. Ennek oka az lehetett, hogy a nagyobb mennyiségű faszén beadagolása miatt hosszabbra nyúlt kohósítási idő miatt a vasérc szintén túlredukálódott és a salak kevés vasat tartalmazott. Ezen kívül a salak relatív vastartalmát az is tovább csökkentette, hogy a kohósítás vége felé a mellfalazat belső része a hosszúra nyúlt kohósítási idő miatt a 4. kísérlethez hasonlóan leolvadt. A kohóbontáskor kihúzott vasbucá tömörítés közben egyben maradt. Tömörítés közben sűrű salak folyt ki belőle, de nem volt túlzottan salakos. A tömörített vasbucá tömege 2,4kg lett, a belőle kovácsolt vastömb pedig 2kg. Ezek alapján elmondható, hogy bár azt vártuk, a megnövelt faszén mennyisége a vaskihozatalt is növelni fogja, ez nem történt meg jelentősen. Sokkal szembetűnőbb és károsabb hatása volt azonban a salak kezelhetőségére, ennek és a leolvadó mellfalnak a kohósítást nehezítő hatását nem kompenzálja a nagyon kis mértékben megnövekedett vaskihozatal.

A vaskihozatal vártnál alacsonyabb szintjére magyarázat lehet, hogy a vasbucá a kohóban a fúvóka előtt kialakuló oxidációs zónában áll össze. Ez alatt van az az inaktív zóna, ami el nem égő faszéndarabokból áll, ezen „ül fel” és növekszik a vasbucá, és ezen, mint egy filteren szűrődik át a belőle lecsöpögő salak. Az inaktív zóna fölfelé kiterjed a kohó hátsó részére is, és a kohósítás során mindvégig mozdulatlan marad (a nagyolvasztó esetében ezt hívják „halott embernek”), az elegyoszlop süllyedése pedig csak az égési csatornában történik. Az oxidációs zónában a fúvókán keresztül befújt levegő elégeti a faszénét, de a nagy levegőfelesleg miatt az atmoszféra még oxidáló, azaz széndioxidban (CO₂) dús (valamennyi szabad oxigén is feltételezhető még a fúvóka orránál), kevés szénmonoxidot (CO) tartalmaz. A CO₂ a Boudouard-reakció (CO₂ + C = 2CO) során az izzó faszénnel reagálva szénmonoxiddá alakul, de ennek a reakciónak a sebessége viszonylag kicsi, ezért a CO₂ a kohó atmoszférájában még a fúvókától távolabb is megmarad, de egyre csökkenő mennyiségben. A fúvóka orrától távolodva a CO/CO₂ arány növekszik, az atmoszféra semleges majd redukáló lesz. Az oxidációs zónában tartózkodó vasbucá leégési veszteséget szenved, annál nagyobb, minél tovább tart a kohósítás. Az így keletkező salak a vasbucá alá csöpög. Ebben a 6.

kísérletben tehát a kohósítás megnövekedett időtartama miatt a vasbuca leégési vesztesége is növekedett, ami az érc túlredukálódásának vaskihozatal-növelő hatását lerontotta. Bár a salakba így sok vasoxid került, ennek viszkozitás-csökkentő hatását a leolvadó mellfalazat rontotta.

Ebben az oxidációs zónában azonban nem feltételezzük a nagymértékű elszéntelenedést, mert korábbi laboratóriumi körülmények között megvalósított kohómodell kísérletekből tudjuk (Thiele TDK 2010), hogy itt a vasbuca már tömbi vasanyaggá állt össze, így fajlagos felülete jóval kisebb, mint a cementációs zónában a még apró (néhány tíz-százmikronos), ércből színült vasszemcséké. A vasszémcsék fajlagos felületének csökkenését ld. az ábrán. A legfelső metallográfiai képen (a redukciós zóna elején) még alig vannak színült vasszemcsék, ezek mennyisége növekszik lefelé haladva majd a színült vasszemcsék diffúziós hegedéssel először kisebb szemcsékké, majd nagyobb tömbökké állnak össze. Az ábra a vasszémcsék szénttartalmával kapcsolatban nem mutat semmit, mert a metallográfiai mintákról marattalanul készültek a képek.



Ábra: A bucakemence 5 főbb metallurgiai zónája, a hozzávetőleges hőmérséklet és a vasszémcsék fajlagos felülete a bucakemence egyes szintjein

1) Az égési csatornában történik a faszén-vasérc elegyoszlop süllyedése, ez a kohó torkától egészen az oxidációs zóna alsó részéig tart. 2) Az inaktív zónában elégtelen faszéndarabok vannak, ez a kohósítás során mozdulatlanul áll (a nagyolvasztónál ezt hívják „halott embernek”). 3) A redukciós zónában történik a vasérc vasoxidjainak redukciója egészen a színvas szemcsék megjelenéséig. 4) A cementációs zónában a már színült kicsi vasszemcsék felszenülése történik meg. 5) Az oxidációs zónában a fúvóka előtt a legnagyobb a CO_2 aránya, attól távolodva csökken.

A kikovácsolt vastömb szénttartalmára viszont az anyagvizsgálati eredmények alapján a kohósítás közben megnövelt faszén mennyisége egyértelműen növelő hatással volt. A 6a és a 6b próbatest felülete is többnyire sötétre maródott. Bár a 6a próbatest keménység értékei a sötét területeken 40-

50HRc közöttiek, ami csupán 0,2-0,3 wt% C-tartalomra utalnak, a GDOES mérések 0,5 és 1wt% karbont mutattak. Az ellentmondás oka a kevés keménységmérési pont lehetett, ebben az esetben jobban hihetünk a GDOES mérési eredményeknek. A 6b próbatest szintén viszonylag egyenletesen sötétre maródott felületén a keménységmérési értékek 50-60HRc közöttiek, ami 0,3-0,4wt% C-tartalomra utalnak, de a GDOES mérések itt is némileg nagyobb, 0,3 és 0,5-ös széntartalmat mutattak. A megnövekedett széntartalom oka az lehetett, hogy a színült vasszemcsék tovább tartózkodhattak a cementációs zónában, így jobban felszenültek. A felszenülést az is segíthette, hogy a megnövelt mennyiségű faszén növelte a kohó atmoszférájának CO/CO₂ arányát.² Összességében elmondható, hogy a 6-os vastömb acél anyagminőségű, a referenciájához képest néhány tized wt%-kal nagyobb széntartalommal. A többi kísérlet eredményét is figyelembe véve egyedül ennél jelenthető ki, hogy a kohósítás során acélnak nevezhető anyagminőséget sikerült előállítani.

7. próbakohósítás (fél faszén hatása)

A referenciához képest ennél a kísérletnél a faszén/vasérc arányt feleztük le 0,5/1-re. A kevesebb faszén miatt a kohósítás időtartama jelentősen, 1 órával csökkent a referenciájához képest. Salakcsapolásra viszont 15 perccel később, T+2:30-nál került csak sor, annak ellenére, hogy eddigre már a referenciához képest jóval nagyobb mennyiségű vasérc került beadagolásra. A salak nagyon hígán folyt, rendkívül jól kezelhető volt, könnyedén lehetett csapolni. A jól folyó salak kezdetben tehát jól kitöltötte a kohó medencéjét ezért később került sor az első salakcsapolásra. A salak törete fekete volt. A kohóbontás után az eddigi kohósítások sorában a legnagyobb salakmedve volt található a medencében. A kapott vasbuca magas volt, a tetején lévő szivacsosabb részből tömörítés közben estek le vasdarabok, összesen 0,4kg-nyi, ettől függetlenül a vasbuca jól volt tömöríthető. A tömörítés után összesen 2,95kg-ra mértük a vaskihozatalt, ami így a legjobb érték. Ehhez hasonlóan a kikovácsolt vastömb is az egyik a legnagyobb lett a sorban, 1,8kg-os.

A jó vaskihozatal meglepőnek tűnik első közelítésben a lecsökkent faszénmennyiségének és a salak nagy vastartalmának fényében (nincs túlredukálódás, sőt „alulredukálás” feltételezhető), azonban az oxidációs zónában korábban bemutatott leégési jelenségnek a szerepét láthatjuk ebben is. A kohósítás időtartama ugyanis jóval kisebb volt, mint a referenciájáé, azaz a vasbuca is kevés ideig tartózkodott az oxidációs zónában, így csökkent a leégési veszteség, ami az ércnek a kis mennyiségű faszén felhasználása miatti alulredukálódását kompenzálva összességében jó vaskihozatalt eredményezett.

Az anyagvizsgálati eredmények alapján a kikovácsolt vastömb a vártnál jobban felszenült. A 7-es vastömb kikészített felületének alsó kétharmada teljesen széntelennek mondható, azonban a felső, sötétre maródott egyharmadán nagy keménységi értékek jelentkeztek. Főként a baloldalon voltak kiugróan magas, 60HRc feletti mérési eredmények, itt jelentkezett az összes eddigi GDOES mérési eredmény közötti legnagyobb is, 1,5wt%-os C-tartalommal. A felső harmad még szintén sötét jobboldalán viszont (igaz, csak kevés de) alacsonyabb, 30-40HRc-s keménységi értékek szerepelnek. Összességében a kis kiterjedésű felszenült terület miatt inkább minősíthető lágyvasnak mint acélnak ez a vastömb.

A vártnál nagyobb széntartalom (bár elmarad a referenciájától) oka nehezen magyarázható, mert a csökkentett faszén mennyisége feltételezhetően a cementációs zónában tartózkodás idejét és az ott lévő CO/CO₂ arányt is csökkentette. Itt kell azonban hangsúlyozni az elvégzett anyagvizsgálataink egyik nagy hiányosságát, a kikészített felület kis méretét, amely nem biztos, hogy jól reprezentálja az adott vastömböt. Azaz lehetséges, hogy ha a vastömbök két nagyobbik lapját készítjük ki, másféle széneloszlást és másféle átlagos széntartalmakat kaptunk volna...

² Korábban a Zamárdiban végzett hasonló összehasonlító kohósítások során a torokgázok CO/CO₂ arányát mérve a dupla faszénnel történő kohósítás esetében abban növekedést tapasztaltunk. Dupla faszén esetén a cementációs zónában a CO₂ mennyisége mindössze 1vol% körüli volt, a redukációs zónában pedig átlagosan 5vol%. Ezzel szemben 1/1 faszén vasérc aránynál ugyanezek a mérési pontokon átlagosan 4 és 8vol%-os CO₂ arányok voltak.

5. Összefoglalás, általános következtetések

Általános következtetésként meg kell jegyezni, hogy mindegyik vastömb kikészített felületén jól látszik a rendkívül heterogén széneloszlás. Ez nagyban megnehezíti a vastömbök lágyvas/acél minősíthetőségét. Mivel a vasbuca a kohósítás során nem olvad meg, a szénnek csak diffúzióval lenne lehetősége kiegyenlítődni a vasbucában, erre azonban nem áll rendelkezésre elegendő idő. Érdekes kérdés, hogy vajon miért nem homogénebb a vasanyag, a vártnál miért sokkal nagyobbak széntartalom-különbségek a vastömbök egyes területei között? Ennek fő oka az lehet, hogy a cementációs zónában a korábban a redukációs zónában színült vasszemcsék nem azonos mértékben szenülnek fel. Ez azért lehet lehetséges, mert egyrészt a cementációs zónában töltött idejük változó és magának a cementációs zónának a hőmérséklete és CO/CO₂ aránya is időben változó, másrészt a színült vasszemcséket különböző hőmérsékleten lágyuló salak veszi körül, ami a cementálódáshoz szükséges felületi karbonadszorpciót egyenetlenül gátolja. Egy másik ok lehet, hogy az oxidációs zónában a vasbucának a fúvóka orrához közel eső része az erősen oxidáló atmoszférán nagy térfogatban elszéntelendik. Valamilyen mértékű elszéntelenedés bizonyára jelentkezik itt, de a kiterjedését egyelőre nem tudjuk megítélni.³

Szintén jól látható a bemutatott próbakohósítási eredményekből, hogy acélt tulajdonképpen csak a megnövelt faszén/vasérc arány eredményezett, ez azonban technológiai problémákat is okozott, és itt is csak átlagosan 0,4-0,5wt%-os C-tartalmat értünk el. Ennek a gönci-típusú konkrációs vasércnek a kohósításával a középkori vasbucakohászat körülményei között (pl. az Árpád-kori vaskohászatban) acélt előállítani nehéz lehetett. Sőt, magában a korra jellemző kis belső térfogatú bucakemencében általában is nehéz lehetett acélt nyerni, mert az elegyoszlop gyorsan süllyed benne, ezért az alapvetően rövid tartózkodási idő a kis kiterjedésű cementációs zónában nem teszi lehetővé a vassfázis jelentős felszenülését. Acélra pedig a korban szintén nagy szükség volt, de az elvégzett kísérletek után inkább tulajdonítanánk nagyobb jelentőséget az utólagos cementálásnak, mintsem a bucakemencék „acélra járatásának”.

Levonható az a következtetés is, hogy a vasbuca széntartalmának megnövelését célzó változtatások a technológiai paraméterekben olyan technológiai problémákat is okoztak, amelyek nehezítették a kohósítást. A megnövelt faszén/vasérc arány és a megnövelt befűjt levegő térfogatárama a kohó mellfalazatának belsejét leolvasztotta, a poros vasérc pedig lefojtotta a kohóban a gázáramlást, ill. a por egy része redukció nélkül átpergett az elegyoszlopon. Ezeknél a kísérleteknél továbbá a salak nagyon sűrű és nehezen kezelhető volt. A legjobban sikerült kísérletben a referenciához képest fél faszénnel kohósítottunk. Ez amellet, hogy gazdaságos és gyors volt, jól kezelhető salakot és meglepően jó vaskihozatait is eredményezett, de a kapott vasbuca inkább lágyvasnak volt minősíthető. A középkori vasbucakohászatra jellemző jól átolvadt, tömör, fekete salakok is hasonló technológia mellett jöhettek létre. Feltételezhetően ezt a gönci vasércet a régiek is a 7 kísérlet szerint kohósították volna. Ezek alapján tulajdonképpen elmondható, hogy technológiai szempontból és a faszénfelhasználás tekintetében a legkíváncsabb, ha éppen csak a megfelelően nagy hőmérséklet fenntartásához elegendő mennyiségű faszenet használjuk fel (ha túl, kevés a beadagolt faszén, akkor a kohó medencéje kihűl).

³ Erre vonatkozóan egy olyan kísérletet kellene elvégezni ugyanilyen körülmények között (pl. egy referenciakohósítás megismétlésével), amikor a vasbucát a kohósítás végén bent hagyjuk a bucakemencében és csak két-három nappal később, a lehűlése után vesszük ki óvatosan a fúvókával együtt, majd a fúvóka hossz tengelyébe eső függőleges síkban elvágjuk, a felületen pedig maratással tesszük láthatóvá a szén eloszlását.

Felhasznált irodalom

- Buchwald, V.F. 2005: Iron and steel in ancient times, Historisk-filosofiske Skrifter 29, København: Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.
- Tylecote, R. F., Thomsen, R. (1973): The Segregation and Surface Enrichment of Arsenic and Phosphorus in Early Iron Artefacts. *Archaeometry* 15/2, 193-198].
- J. Piaskowski, J, Das Vorkommen von Arsen im antiken und frühmittelalterlichen Gegenständen aus Renneisen, *Archäologie* 18 (1984) 213-126.
- R. Pleiner: Iron In Archaeology – The European Bloomery Smelters. Archeologický ústav AV ČR, Praha, 2000.
- R. F. Tylecote: A History of Metallurgy. Second Edition, The Institute of Materials, London, 1992.
- H.H. Coghlan: Notes on prehistoric and early iron in the Old World. Pitt Rivers Museum, Oxford University Press, 1956.
- B. Török: Archeometallurgia, Miskolci Egyetem, 2013.
- Thiele, Á. 2014: A foszfor szerepe a vas archeometallurgiájában / The role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron, PhD-értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Pattantyús Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola
- Thiele, Á; Kercksmár, Zs. 2014: A belső-somogyi gyepvasérc telepek archeometallurgiai jelentősége és genetikája / Genetic types and archaeometallurgical role of bog iron ore deposits in Inner Somogy, *Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat* 147(1), pp. 19-24