

mint a hulladékvas arányának növelésével a fokozott utánégetés révén a BOF-ben. További energia- és GHG-megtakarítás lehetséges a BOF művekben az elmenő gáz hőjének hatékony visszanyerésével.

A Tenova Goodfellow's a közelmúltban indította az intelligens iBOF-technológiát, amely az Efsop elmenőgáz-elemző technológiát más fejlett érzékelőkkel és eljárásmodellekkel együtt alkalmazza. Mindezt a BOF üzemeltetési költségek csökkentése, a termelékenységi és a kihozatal növelése, valamint a GHG-kibocsátás csökkentése érdekében tervezték a tökéletesített BOF végpontdetektálás révén, a kemencében való növelt utánégetés, a növelt hulladékvas-adagolás és a csökkent kidobódás tovább növelte a hatékonyságot.

## Irodalom

- [1] Thomson, M. J. – Evenson, E. J. – Kempe, M. J. – Goodfellow, H. D.: Ironmak. Steelmak., 27 (2000) No. 4, p. 273.
- [2] National Inventory Report, 1990-2005: Greenhouse gas sources and sinks in Canada, Annex 9: Electricity intensity tables, link: [http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory\\_report/2005\\_report/a9\\_eng.cfm#ta9\\_1](http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory_report/2005_report/a9_eng.cfm#ta9_1)
- [3] Austin, P. R. – Nogami, H. – Yagi, J. – I.: ISIJ Intern. 38 (1998) No. 7, p. 697.
- [4] Ryman, C. – Larsson, M.: ISIJ Intern. 46 (2006) No. 12, p. 1752.
- [5] Okuda, H. – Take, H. – Yamada, T. – Fritz, K.: Trans. ISIJ 25 (1985) No. 11, p. 291.

- [6] Vensel, D. A. – Henein, H. – Dauby, P. H.: A thermodynamic analysis of decarburization and post combustion in the BOP, Proc. 68. Steelmaking Conf., 14-17 Apr 1985, Detroit, USA, p. 67.
- [7] Kalling, B. – Johansson, F.: J Iron Steel Institute 192 (1959) No. 8, p. 330.
- [8] Zuliani, D. J.: Metal Prod. Proc. (2009) March/April, p. 13.
- [9] Maiolo J. – Zuliani, D. J.: Metal Prod. Proc. (2008) Nov/Dec, p. 15.
- [10] Scipolo, V. – Maiolo, J. – Li, C. W. – Goldberg, B. – Zuliani, D. J.: Application of Efsop holistic optimization technology to oxygen steelmaking, AISTech 2008, 5-8 May 2008, Pittsburgh, USA.

## THIELE ÁDÁM – BÁN KRISZTIÁN

# A bucavaskohászat kora középkori technológiája a megvalósíthatóság tükrében

**A közelmúlt egyik szerencsés folyamata, hogy a régészet tudományához kapcsolódóan vagy azon belül egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek korabeli tárgyak, folyamatok, események reprodukálására. A tisztán tárgyi leletekre és leírásokra támaszkodó tudományos következtetések sokszor nem pontosak, ezért nem teljesen tükrözik a korabeli lehetőségeket, körülményeket (pl. egy feltárt fegyver vagy szerszám használatáról és a használat körülményeiről addig biztosat nem mondhatunk, amíg egy hozzáértő szakember ki nem próbálta). A jelen írás egy ilyen technikátörténeti kísérlet, pontosabban a kora középkori bucavaskohászat modernkori felelevenítésének eredményeit mutatja be.**

### Bevezetés

A technikai társadalom kialakulásában nagy szerepet játszott a vas, amelynek kiemelt jelentősége tág határok között változtatható tulajdonságaiban, jó megmunkálhatóságában, viszonylag egyszerű előállításában van. A vas története azonban nem csak tech-

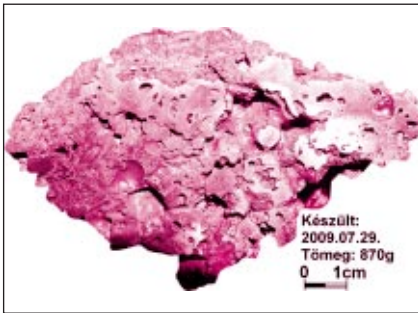
nikátörténeti, hanem gazdaság- és hadtörténeti jelentőséggel is bír. A gazdaságtörténeti jelentőség esetében gondoljunk a mezőgazdasági szerszámokra vagy arra, hogy a vas adta majdnem minden mesterség szerszámainak anyagát. A hadtörténeti vonatkozások a kora középkori fegyverek szempontjából szintén egyértelműek.

**Thiele Ádám** 2004-ben a karcagi Gábor Áron Gimnáziumban érettségizett. Jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a Közlekedésmérnöki Kar Gépészmérnöki Szak Járműgyártás és -javítás szakirány hallgatója. Az archeometallurgia, ezen belül a középkori bucavasgyártás technológiája iránt érdeklődik.

**Bán Krisztián** PhD fokozattal rendelkező okl. gépészmérnök, jelenleg a BME Járműgyártás és -javítás Tanszékén adjunktusként dolgozik. Főként anyagvizsgálatokkal és a nem egyensúlyi ötvözetek vizsgálatával, valamint amorf ötvözetek szerkezeti és mágneses tulajdonságainak kutatásával foglalkozik.

Ha a kora középkori vasgyártásról beszélünk, akkor ez alatt bucavasgyártást kell érteni. A bucavas szivacsos szerkezetű salakos vas, amelyet kis, szakaszos üzemű, faszéntüzelésű bucakemencében állítottak elő. Egy szerkezetében tipikus bucavas keresztmetszetét láthatjuk az 1. ábrán, ahol jól megfigyelhető a szivacsos, salakos szerkezet.

A kora középkori vasipar kutatását az archeometallurgia végzi, amely a vasmetallurgia és a régészet közötti interdiszciplináris terület. Ma a bucavas korabeli, korhű gyártástechnológiáját „próbaolvasztások” keretében kutatják. Magyarországon a kora középkori vasipar archeometallurgiai kutatása európai mércével mérve nem jelentős. Míg a nyugat-európai országokban már kísérleti régészeti kutatások keretében a kora középkori vasgyártás rutinszerűen működik, addig nálunk még a bucavas előállításának többszöri megismételhetősége sem megoldott. A külföldi kutatások azonban nem magyar ércekkel, nem magyar kohótípusokkal folynak, így azok eredményei nem ültethetők át egy az egyben a magyar archeometallurgiába. Ezen kívül nagyobb részük



■ **1. ábra.** A hatodik próbaolvasztás vasbucájának metszete

nem nevezhető teljesen korhűnek a próbaolvasztások során alkalmazott modernkori technológiák (pl. elektromos fűjtás) miatt.

A magyar kora középkori vasipar kutatása anyagtudományi és mérnöki oldalról, valamint az őskohászat során lezajló folyamatok természettudományos értelmezése sok megválaszolatlan régészeti kérdést is megoldhat. Ezen felül segít feltárni a magyar ipartörténet és kultúra egy jelentős szeletét, és egy elveszett ismeretanyag újrafelfedezéséhez is hozzájárul.

### 1. A bucavaskohászat elhelyezése a vasgyártás történetében

Az ember mintegy hatezer éve használja a vasat [1]. Az első vastárgyak alapanyagát azonban nem kohászati eljárással, hanem meteorvasból nyerték. A vasat érceiből, kohászati úton eleinte olvasztógödörökben állíthatták elő az időszámítás előtti évezredekben. Az olvasztógödör a talajszintbe mélyített egy-két méter átmérőjű tányérszerű mélyedés volt, amelybe faszén és vasérc meghatározott arányú keverékét helyezték. Tüzet többnyire természetes légáram szította [2]. Intenzívebb levegőbefúvás és nagyobb hőmérséklet elérése volt lehetséges az olvasztópályókban. Ezek domboldalba ásott mélyedések voltak, amelyeket faszénnel és ércel töltöttek fel, majd az elegyoszlopot vékony agyagréteggel borították be. Az agyagréteget alul és felül lyuksorral látták el, alul a levegő jutott be, felül az égéstermékek távozhattak. A tüzet szító légáram olvasztópályó esetén is legtöbbször természetes lehetett. A kezdetleges kohászati technológia termékei feltehetően mindössze vasrögök voltak. A néhány centiméteres vasrögökből kovácstűzi hegesztéssel állíthattak elő tömbi vasat, amelyből már nagyobb vastárgyakat készíthettek.

A vizsgálatunk tárgyát képező kora középkori vasgyártás a bucakemencéket az ókortól örökölte [3]. Magyarországon az első bucakemencék kis belső térfogatú aknás kemencék voltak, melyekbe az ércet és a faszenet váltakozó rétegekben (vagy keverve) halmozták fel, s a tüzet izomerővel működtetett fűjtatókkal szították. A bucakemencék szabadon állók és részlegesen vagy teljesen a földre süllyesztettek is lehettek. Feltételezhetően az olvasztópályók közvetlen leszármazottai a teljesen földre süllyesztett magyarországi ún. imolai és fajszi típusú kohók [2]. Néha tucatszám voltak a műhelygödörök oldalfalába bemélyítve, ahogyan pl. Somogyfajszon az Őskohó Múzeumban látható. A műhelygödörök kiásott munkagödörök voltak, ezek jelentették a kora középkori Magyarországon a vaskohászat termelési egységeit. A munka szakaszos üzemben folyt, az 5-8 órás fűjtás után a kohó mellfalazatának megbontásával húzták ki az izzó vasbucát, amit ezután kovácsolással szabadítottak meg a salak nagyobb részétől. A bucakemence helyreállítását minden újabb adag előtt el kellett végezni.

A középkor folyamán a kis – kb. 1 méter magasságú – bucakemencék méreteit a termelékenység javítása céljából növelni kezdték. Az igazi előrelépést, minőségi változást a vízikerekek vasgyártásban történő alkalmazása indította el. A vasipar volt az egyik legfontosabb európai ipar, amelyet a vízikerek és a bütyköstengely segítségével részben gépesítettek [4]. Az izomerő helyett immáron vízikerekkel hajtották meg a kohók tüzeinek szítására szolgáló fűjtatókat. A kohók méretei így még tovább nőhettek, a poha átmérője és a kohó magassága is nagyobb lett, kezdetben 3-4 méteres. Megjelentek a vashamorok, amelyekben bütyköstengelyek mozgatta farkaskalapácsokkal, képlékeny megalakítással előbb előgyártmánnyá, majd késztermékké dolgozták fel a bucakemencékből kikerülő nagyméretű vascipókat. A vasipar ilyen formán egészen a 18. századig működött Magyarországon [5].

Nyugat-Európában a középkor végén, Magyarországon az újkor elején jelentek meg az első nagyolvasztók, ezzel az addigi direkt vasgyártásról – amikor az ércből közvetlenül redukálódott a vas – áttértek az indirekt vasgyártásra. A korábban elérhető kisebb hőmérséklettel szemben,

amelyen a bucavas a folyamat során végig javarészt szilárd halmazállapotú maradt, immár a vas olvadáspontját meghaladták. Így a megnövekedett karbonoldó-képesség következtében nyersvas keletkezett, amit a kohóból időnként kicsapoltak. A munka folyamatos volt, addig lehetett a torkon át a faszenet és az ércet adagolni, amíg a kohó falazata tönkre nem ment.

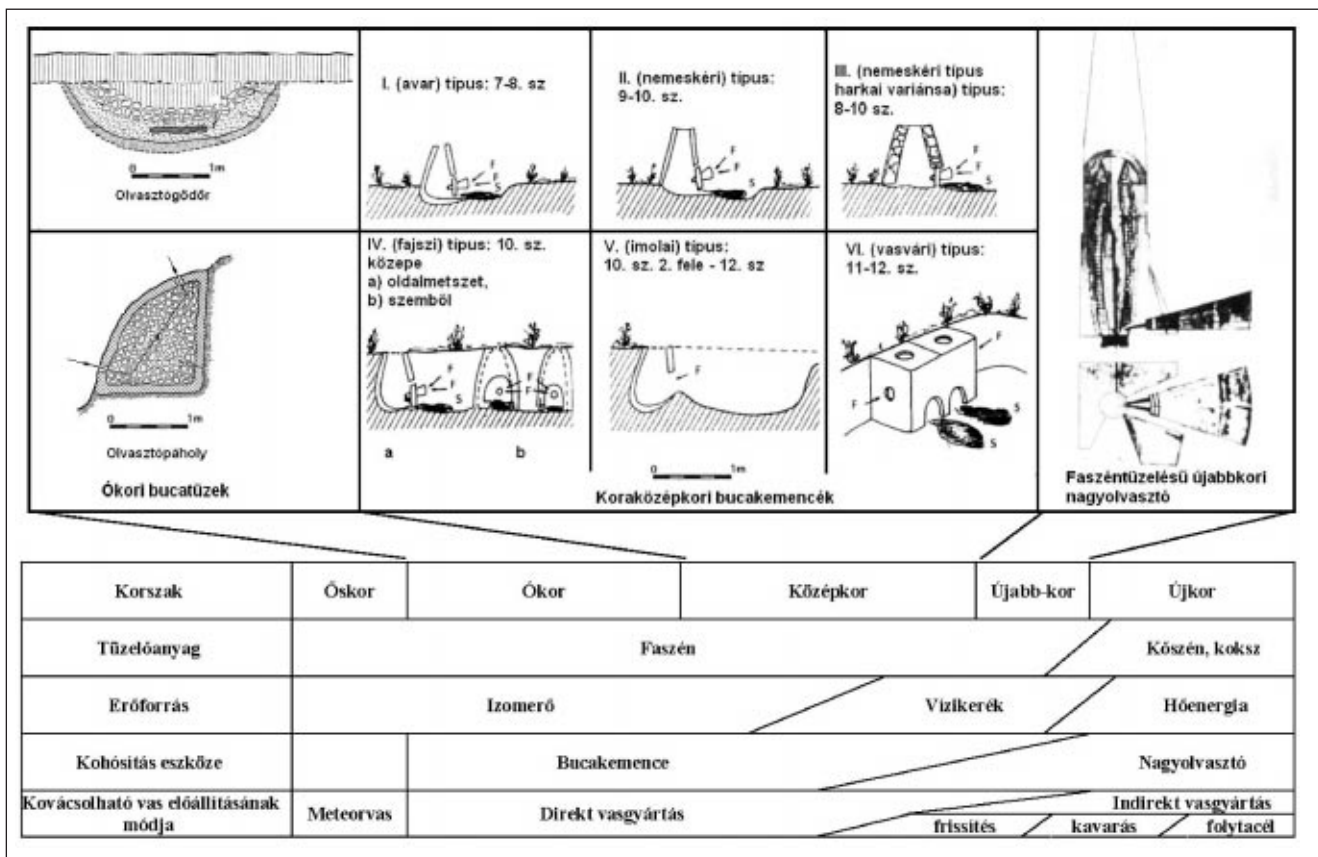
A nyersvas a korábbi bucavaskohászati technológia mellett is létrejöhetett alkalmoszerűen, ezt nevezték „disznóvasnak” (pig iron). Keletkezését kerülni kellett, hiszen ez kovácsolással nem munkálható meg. Mivel a lehetséges feldolgozási módja még ismeretlen volt, vagy ércel keverték és újból kohósították, vagy pedig egyszerűen eldobták.

Kezdetben készüléssel készítették kovácsolható vasat, acélt. Ennek során a nyersvasat frissítő tűzhelyen újból megolvasztották, majd fűjtató szél hatásának tették ki, így kiegészve belőle a karbont. Esetenként apró vasércrögöket is hozzákeverték. A készülést a kavarasos acélgyártó eljárás követte. A nyersvasat olvadt állapotban egy hosszú vasrúddal kavarták, így az olvadt nyersvas oxigénnel való érintkezése nagyobb felületen történhetett meg, ezért a karbontartalom fokozatosan csökkenhetett. A likviduszgömbének megfelelő karbontartalmat elérve ausztenitszemcsék kezdtek kiválni a kavarrásra használt vasrúdon, amely a kristályosodásnak kiindulópontot szolgáltatott. A technikai fejlődés következő foka a koks megjelenése volt a nyersvasgyártásban, valamint a Bessemer-, a Siemens-Martin- és a Thomas-eljárás terjedése az acélgyártásban.

A fentiek alapján látható, hogy a bucakohászati technológia meghatározó jelentőségű és igen hosszan jelenlévő vasipari eljárás volt. Ma a természeti népeknél még mindig megfigyelhető vaskohászati technológia a bucavasgyártás. Az általuk végzett munka nagyon hasznos forrása lehet a kísérleti céllal végzett próbaolvasztásoknak is [6]. A 2. ábrán az elmondottak táblázatos összefoglalása és a bemutatott kemencetípusok láthatók.

### 2. Egy próbaolvasztás előkészületei

A kora középkori bucavaskohászati technológia megismerése, rekonstruálása érdekében eddig összesen kilenc próbaolvasztást végeztünk, amelyek közül az



■ 2. ábra. Történelmi vaskohászati technológiák és kohók [1, 2, 7, 8]

utolsó három sikeres volt, kisebb-nagyobb vasbucákat eredményezett. A kísérletek során elsődleges szempont volt a korhúség, a régi eljárások felelevenítése. Minden próbaolvasztás azonos előkészületeket igényelt.

### 2.1 A gyevasérc fejtése

A gyevasérc olyan felszíni vagy felszín közeli vasérc, melyeket a legkorábbi kohászati eljárásokhoz hasznítottak. Egy próbaolvasztás előkészületei a gyevasérc-lelőhely felkeresésével kezdődnek. Több történelmi érclelőhely közül a nyírségi és a somogyi gyevasérc előfordulások bejárása során jó minőségű gyevasércet lehetett viszonylag könnyen kifejteni. A nyírségben Fancsikán, a Bodzás-ér mentén többnyire csak kisméretű babérc, borsóérc található, ezzel szemben Somogy-szobon a Kócsmóna-patak medrének oldalában néhol fél méter vastag réteget alkot a kifejthető gyevasérc.

A gyevasérc összetételük szerint lehetnek

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

– hematit-geotites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  és  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ércek, amelyek több-kevesebb kísérő vegyületet, meddő anyagot tartalmaznak. A hematittartalmuk általában 40–70% közötti, így vastartalmuk jóval elmarad a ma hasznosított vasérckéhez képest.

A lelőhelyen törekedni kell a megfelelő minőségű gyevasérc összegyűjtésére. A próbaolvasztások során szerzett ismeretek felhasználásával vált lehetővé a kohósítás szempontjából kedvező tulajdonságok felismerése, szisztematikus keresése. A tapasztalatok szerint a porózus, szürkés-kék töretű, akár kézzel is törhető rögök a legalkalmasabbak a bucavaskohászati technológiához. A később elvégzett vegyelemzések és próbaolvasztások alapján elmondható, hogy a somogy-szobi lelőhely érce nagyobb vastartalmánál és kisebb olvadáspontú salakot adó meddőjénél fogva bucavaskohászatra alkalmasabb, mint a fancsikai.

### 2.2 Az érc dúsítása

Az érc dúsítása a korhúség szem előtt tartásával három lépésben végezhető. Az első lépés az érc mosása, amelyre még a helyszínen sor került. Ezzel a művelettel a

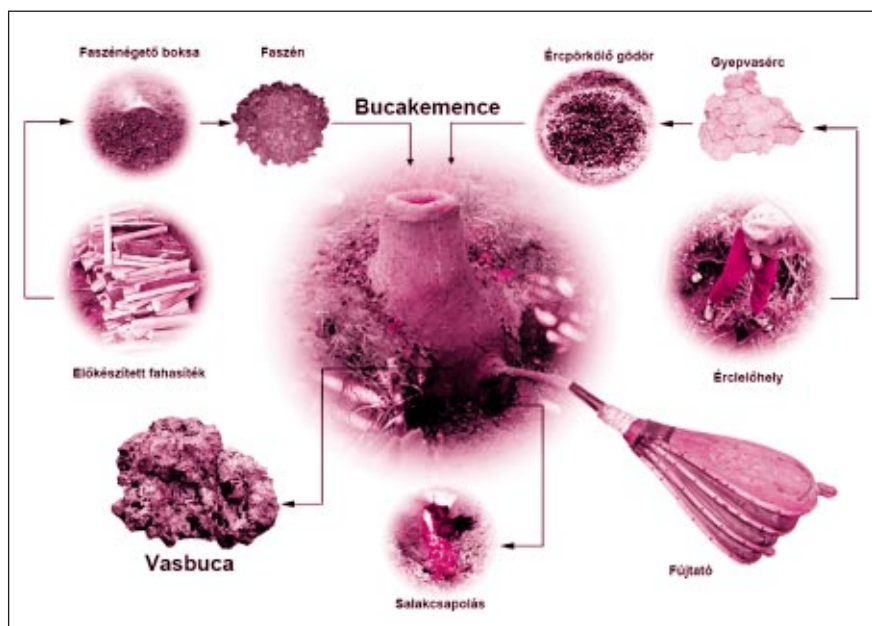
rátapadt meddő anyag nagy részét (agyagot, homokot, sarat) el lehetett távolítani a felületről.

A következő lépés az aprítás volt. Az aprítás fokát illetően a természeti népek-nél megfigyelhető 2–3 cm-es méret volt az irányadó [6]. Az aprítás közben az érc tapasztalati úton történő válogatása is elvégezhető. Általában az összegyűjtött érc harmada bizonyult megfelelőnek, amiből mintegy 10–12 kg fogyott el egy-egy próbaolvasztás során.

A harmadik, befejező művelet az aprított érc pörkölése. Az ércpörkölő gödörben faszénparázson hevül az érc, így a kémiailag kötött hidrátvíz-tartalom (esetlegesen a tapadó nedvesség) nagy része még a kohóba helyezés előtt eltávozik. Arra, hogy a régiek is végeztek pörkölést, bizonyítékot nyújtanak a feltárt kora középkori kohótelepeken talált ércpörkölő gödörök [1].

### 2.3 Faszénégetés

A kohószat jelentős faszénigényét a régiek faszénégető boksákból fedezték. Ezek nyomait néhány kohótelep körül szintén megtalálták [1]. A hagyományos módon,



■ 3. ábra. A bucavaskohászat előkészületeinek és lefolytatásának folyamatábrája

boksában végzett faszénégetéssel kezdetben fedezhető volt a szükséges tüzelőanyag mennyiség. A kísérletek során a bucakemence „fogyasztása” óránként 7–8 kg, egy próbaolvasztás igénye 25–30 kg faszén volt. Idő- és munkamegtakarítás céljából a későbbiekben már kereskedelmi forgalomban kapható bükkfaszénre kellett áttérni.

### 2.4 Kemenceépítés, fűvókakészítés, fűjtetés

A kezdeti nemeskéri (szabadon álló) típusú bucakemencében végzett sikertelen próbaolvasztások rávilágítottak a kemencetípus egyik hátrányos tulajdonságára, nevezetesen a vékony falazat miatt a hőszigeteléssel elvesztett jelentős hőmennyiségre. Ezt csökkentendő, fajszi (földbe vajt) típusú bucakemencével folytatódott a kísérletek, amelyben ugyanannyi befűjt levegőmennyiség és faszénfogyasztás mellett nagyobb hőmérséklet érhető el. Ez a bucakemence 5–10 cm vastag mellfalal elzárt mellnyílással üzemel. A fűjtetőből a levegő a mellfalazatba tapasztott fűvókán keresztül jut be a kemencébe (3. ábra). Természetesen nem volt szükség minden egyes próbaolvasztás alkalmával új bucakemence építésére, többnyire elegendő volt a mellfalazat helyreállítása.

A somogyfajszi műhely egyik szeglete nyújtott mintát a bucakemence korhú, a műhelygödör oldalfalában történő kialakításához. A nagy hőterhelésnek kitett belső falazatra fővényel és apró kavicsokkal soványított agyagtapasztás került. A

fűvóka samottból készült a tűztérbe nyúló orrszéneke gyakori meglágyulása miatt.

A bucakemence tüzeinek szítására egy, a múlt század elejéről származó kovácsfűjtető szolgált. A levegő nagy térfogatárama gyakran túl nagyra emelte a fűvósík hőmérsékletét, ezért többször keletkeztek a bucavas mellett nyersvas (pig iron) jellegű, fűrtösen megfolyt vaszcseppek. A későbbiekben elvégzendő próbaolvasztások során már egy kisebb teljesítményű fűjtető is alkalmas lehet a kísérleti tapasztalatok alapján szükséges kb. 200–400 liter/min térfogatáramú levegő befűvására.

### 3. Egy sikeres próbaolvasztás bemutatása

A hatodik, a nyolcadik és a kilencedik próbaolvasztás volt a legeredményesebb, de a nyolcadik során csak egy kisebb buca és sok vasrög keletkezett. A kilencedik alkalmával pedig már túl nagy volt a befűjt levegő mennyisége, így bár a legnagyobb (1,2 kg-os) vasbuca ekkor keletkezett, mellette jelentős mennyiségben nyersvas is megjelent. Ezért ideális folyamatként a hatodik próbaolvasztás mutatható be.

A kísérlet tűzifa parázsra égetésével kezdődött az ércpörkölés előkészítéséhez. Ezzel párhuzamosan a kemence két óráig tartó előmelegítése és a faszén előkészítése zajlott, amely annak 2–3 cm-es darabokra törését jelentette. Az előmelegített, parázzsal telt medencéjű kemence

már feltölthető volt faszénnel, amely a már meglévő parázs és fűjtetés segítségével át tudott izzani. A fűjtetés hatására a fűvósíkban emelkedett a hőmérséklet, a faszénoszlop javarészt átizzott és süllyedni kezdett. Ekkor az ércpörkölő gödörből kikerülő, izzó parázzsal keveredett pörkölt gyepvasércet az elegyoszlopra lehetett teríteni, hozzávetőlegesen 0,5 kg mennyiségben. Az első ércadagolást számítjuk a bucavaskohászat kezdő időpontjának.

Ezt követően a gyepvasércre egyenletes, 2–3 mm vastag rétegben fahamu került. Ennek CaO-tartalma a meddőből keletkező salak olvadáspontját lecsökkenti (feltéve, hogy annak CaO-tartalma kicsi). Ezután további 0,5 kg faszén került a torokba annak megakadályozására, hogy a felfelé áramló torokgáz szétfújja a fahamut, majd az elegyoszlop süllyedésekor ismét 0,5 kg faszén lehetett adagolni. Összességében tehát nagyjából fél kg érchez egy kg faszén hozzáadása szükséges. A ciklus az elegyoszlop süllyedésével ismétlődhet, kezdetben kb. 6–7 perces ciklusidővel. Ez a kohászat negyedik órájában már kb. 10 percesre nyúlt, a fűvókába befagyott salak okozta fojtás következtében. A befűvott levegő csökkenő térfogatárama miatt az elegyoszlop süllyedési sebessége is lecsökkent.

A bucavaskohászat második órájában a salak teljesen feltöltötte a medencét és elérte a fűvóka szintjét, ezért szükségessé vált a kicsapolása. A mellnyíláson, a fűvóka alatt kb. 10 cm-re ütött lyukon a sárgás-fehéren izzó salak kifolyhatott. A salakot ezután negyedóránként csapolni kellett.

A salak kezelése a folyamat során végig nehéznek bizonyult, annak ellenére, hogy megfelelően híg folyós állagú volt. Az utolsó ércréteg terítése után végül nem lehetett megvárni, míg az elegyoszlop a fűvósíkiig leég. A fűvókába befagyó salak és a lehűlő fűvósík miatt a műveletet a hatodik órájában be kellett fejezni.

A mellfalazat szétverésével kihúzhatóvá vált a még izzó bucavas, amely a fűvóka előtt, de valamivel annak síkja alatt, a salakban helyezkedett el. Vízbe merítés után a salak nagyobb részét le lehetett kapálni róla (a régiek nem így jártak el, hanem a még izzó bucavasat az újraizzító tűzhelyben felhevítették, majd átkovácsolták). A vasbuca tömege 1,05 kg volt. A felső része jóval több vasat tartalmazott

mint az alsó, ahol már csak salakba ágyazott, fémesen nem összefüggő vasrögök voltak. A vasbuca félbevágása lehetővé tette szerkezetének jobb megismerését.

A próbaolvasztások tapasztalatait egybevetve összességében kijelenthető, hogy egy próbaolvasztás sikerét leginkább a salakkezelés befolyásolja. Mindegyik idő előtt befejezett kísérlet oka a fúvókába fagyott salak fojtó hatása következtében kihűlő fúvósík volt.

#### 4. A bucaavaskohászat során lejátszódó folyamatok

A bucakemecében zajló folyamatok értelmezéséhez – már az eddigiek alapján is látható – nem elegendő annyit kijelentünk, hogy ugyanaz történik, mint a modern nagyolvasztóban, csak éppen kisebb léptékben. A jelentős eltérés abban mutatkozik, hogy egyrészt a vas a bucakemecében elérhető kis hőmérsékleten nem olvad meg, másrészt a redukációs folyamatok nagy mennyiségű olvadt salakban mennek végbe. Kövessük végig a betétanyagok útját egészen a vasbuca kialakulásáig, és vizsgáljuk meg a feltételezhetően lejátszó kémiai és fizikai folyamatokat!

A jellemzően hematit-limonitos ( $Fe_2O_3$  és  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ), nagy meddőtartalmú ( $SiO_2$ , kisebb mennyiségben  $CaO$  és  $Al_2O_3$ )

gyepvasérc az ércpörkölő gödörben elveszti hidrátvíztartalmát, és néhol már magnetitté ( $Fe_3O_4$ ) redukálódása is megtörténik. A kemence torkába adagolt előredukált gyepvasérc és faszén rétegek süllyedésük közben keverednek. A fújtatóval befújt levegő oxigéntartalma a szénrel szén-monoxiddá ( $CO$ ) és szén-dioxiddá ( $CO_2$ ) ég el, amelyek aránya a fúvósíkban uralkodó hőmérséklettől függően a Boudouard-reakció szerint módosulhat (a  $CO/CO_2$  arány kb.  $700\text{ }^\circ C$ -on egy, felette nő, alatta csökken). A gyepvasérc hematittartalmát a felfelé áramló nagy  $CO$ -tartalmú gáz magnetitté redukálja. Az elegyoszlop tovább süllyed, a magnetit wüstitté ( $FeO$ ) redukálódik, amely a gyepvasérc meddőjének nagy  $SiO_2$ -tartalmával  $1170\text{ }^\circ C$  olvadáspontú fayalitos ( $2FeO \cdot SiO_2$ ) salakot képez. A gyepvasérchez adott fahamu és a meddő  $CaO$ -tartalma a salak olvadáspontját tovább csökkenti, a meddő  $Al_2O_3$ -tartalma kis mennyiségben szintén olvadáspontot csökkent.

A vas atomos formában, feltételezhetően direkt redukcióval (a faszén karbonja redukál), az olvadt fayalitos salakfázis izzó faszénnel érintkező határfelületén alakul ki, majd gyors olvadékfázisú diffúzióval a salak belsejébe vándorol. Itt ausztenites állapotú vaskristály keletkezik, amely növekszik, így a salak belsejében sok kis vasgolyó alakul ki (ld. 4. ábra jobb alsó mellékábrája). A salakfázis belsejében a vasgolyó növekedésének hajtóereje a felületi feszültség csökkenése. Ezért csak ritkán fordul elő, hogy a salak-faszén fázishatáron válik ki a színvas. Ilyenkor ún. vashártya keletkezik, de a bucavas fő tömegét a vasgolyók adják.

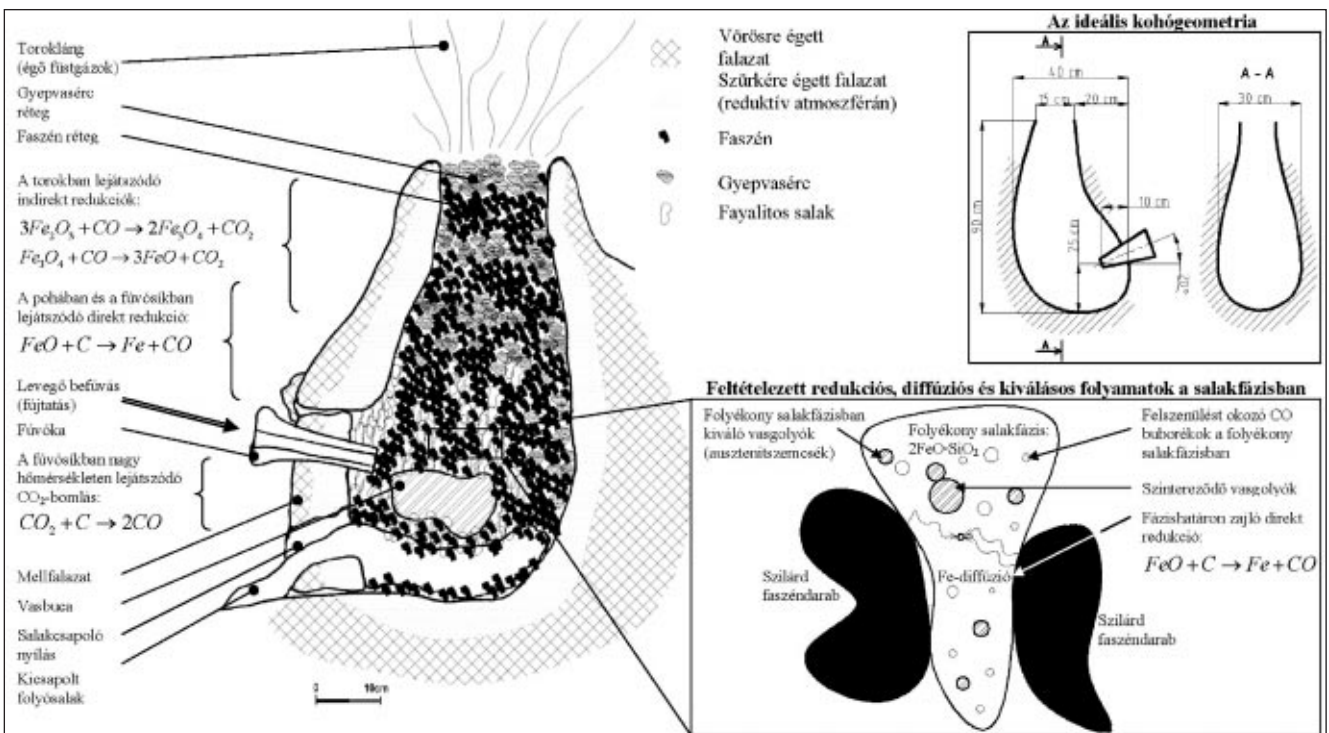
ben sok kis vasgolyó alakul ki (ld. 4. ábra jobb alsó mellékábrája). A salakfázis belsejében a vasgolyó növekedésének hajtóereje a felületi feszültség csökkenése. Ezért csak ritkán fordul elő, hogy a salak-faszén fázishatáron válik ki a színvas. Ilyenkor ún. vashártya keletkezik, de a bucavas fő tömegét a vasgolyók adják.

A növekvő vasgolyókat tartalmazó olvadt, salakos részek egyesülnek, tovább süllyednek és eléri a fúvósíkot. Az egymáshoz közel került és érintkező vasgolyók a diffúzió révén „összeszintereződnek”. Az összehegedő vasgolyók így néhány cm-es vasrögöket alkotnak, amelyek szintén összehegednek, és közülük a híg folyós salak kiolvad. Így jön létre a bucavas.

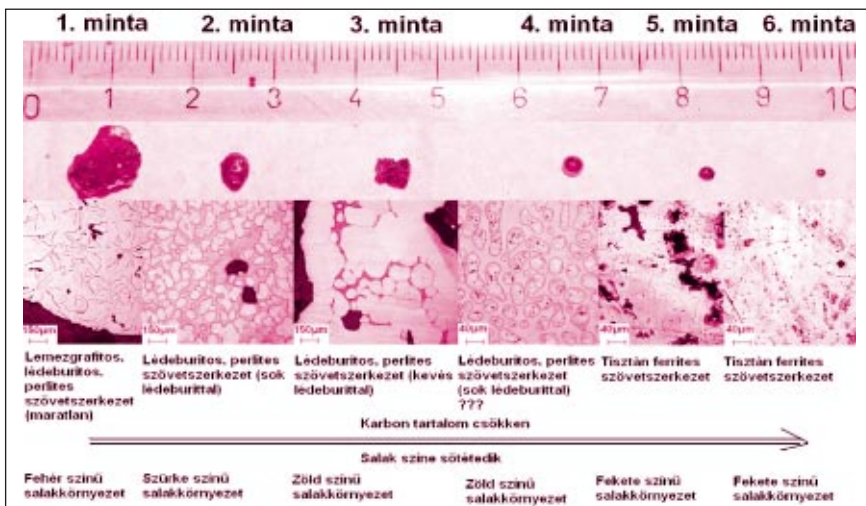
A bucavas tehát vasgolyókból és vasrögökből salakfázisban szintereződött vaszivacs. A vasgolyókat és a vasrögöket feltételezhetően a salakfázisban feloldódott és néhol buborékokat is képző szén-monoxidban gazdag kemenceatmoszféra a  $CO/CO_2$  arányának megfelelő mértékben felszeníti. A kialakult bucavas a kemence redukív atmoszféráján tovább cementálódik.

A fent leírt folyamatok követhetők végig a 4. ábrán.

A történelmi bucavas jól kovácsolható, karbon tartalma általában kicsi, többnyire ferrites vagy ferrit-perlites szövetszerke-



■ 4. ábra. A bucakemecében lejátszódó metallurgiai és kinetikai folyamatok



■ 5. ábra. Összefüggés a vasrög karbontartalma és a környezetében levő salak színe között, feltüntetve a minták szövetszerkezeti képét és a feltételezett szövetelemeket

zetű. A próbaolvasztások során nyert bucavas egy része viszont helyenként lédeburitos-perlites szövetszerkezetű volt. Az ilyen bucát valószínűleg nem lehet átkovácsolni. A túlzott felszenülés oka feltételezhetően a nagy faszén-érc arányban és a túl intenzív fűjtetés következtében a fúvósíkban kialakult nagy hőmérsékletben keresendő. Ezek miatt ugyanis a kohó atmoszférája erősen redukív volt, azaz nagy lehetett a CO/CO<sub>2</sub> arány, amely a bucavas karbontartalmának növekedését okozta [9].

A kísérleteket követő vizsgálatok alapján összefüggés figyelhető meg a vasrög karbontartalma és salakkörnyezetének színe között. Hat ismert salakkörnyezetű vasrögminta szövetszerkezeti vizsgálatát és az ezekből levont következtetést foglalja össze az 5. ábra, feltüntetve a feltételezett szövetelemeket. Valószínűsíthető, hogy minél nagyobb a fúvósíkbeli hőmérséklet, és minél nagyobb az atmoszféra CO/CO<sub>2</sub> aránya, annál inkább elszegényedik a fayalitos salak FeO-ban, és ezzel párhuzamosan egyre jobban felszenül a vasrög. Ez a változás a salak fakulását okozza. A nagy FeO-tartalmú salak fekete, míg kevés FeO mellett szürkés, majd fehér színű. (A 4. minta karbontartalma túl nagy, nem illik a sorba.)

### Összefoglalás

Az elvégzett próbaolvasztások során nyert tapasztalatok segítségével nagy vonalakban sikerült tisztázni a bucavas kora középkori gyártástechnológiáját. Akadnak azonban még megoldandó problémák a

salakkezelés terén, illetve a kovácsolhatóság érdekében nem engedhető meg a bucavas túlzott felszenülése sem. A problémákra még modern műszerek nélkül is megoldást nyújthat a bucakemence üzemi tulajdonságainak csupán tapasztalati megfigyelése. Így például a torokláng színéből következtethetünk az atmoszféra CO/CO<sub>2</sub> arányára, a kicsapolt és megdermedt salak töretének színéből a növekvő vasbucva karbontartalmára, a kohó hangjából a salakcsapolás szükségességére stb. A nyert információ visszacsatolásával pedig változtathatjuk a beadagolt faszén-érc arányt, a fűjtetés intenzitását, és salakösszetételt módosító anyagokat használhatunk. Mindezt az őskohász, sokkal nagyobb tapasztalatának felhasználásával, szintén megtehetette. Modern műszerekkel viszont lehetséges lenne az üzemi paraméterek mérése (pl. a fúvóöv hőmérséklete, a torokgáz összetételének vizsgálata stb.). Ezek értékelésével tapasztalatok hiányában is sikeres kohászat folytatható.

A salakban lezajló szilárd fázisú folyamatok fenti értelmezése azonban pontosítást igényel. Ehhez kapcsolódóan fontos lenne a bemutatott szövetelemek azonosítása (mikrovizsgálattal, továbbá kéménységméréssel), valamint a salakminták további vizsgálata.

Noha ez a munka a kora középkori vasgyártás reprodukálását tűzte ki elsődleges céljának, mégis modernkori technológiák kidolgozását alapozhatja meg. A direkt acélgártás előnye az indirekt eljárással szemben az, hogy lehetőséget adhat több technológiai lépés kihagyására (frissítési eljárás, hengerlés) így gazdaságosabbá

téve az acélból készült alkatrészek gyártását. A modern porkohászati eljárások megteremtették ennek lehetőségét: a direkt acélgártás termékét (a bucavasat) porrá őrölve lehetőség nyílik az alapanyag mechanikai tisztítására és ötvöztetésére, amely porkohászati eljárással késztermékké alakítható. Mindeközben egyszer sem léptük túl az alapanyag olvadáspontját. Természetesen ennek kihasználása további vizsgálatokat igényel.

Köszönetemet fejezem ki *dr. Grega Oszkár*nak (ME) a vegyelemzésekben nyújtott segítségével, *dr. Solyom Jenő*nek (MTA-ME Anyagtudományi Kutatócsoport) röntgendiffrakciós vizsgálataiért, *Márkus Róbert*nek (ME Metallurgiai és Öntészeti Tanszék) a vegyelemzésekben és a röntgendiffrakciós vizsgálatokban nyújtott segítségével, *Bartha Lászlónak* gyakorlati tanácsaiért, tapasztalatainak átadásáért és *Farkas Gábornak*, a próbaolvasztásoknak helyet adó földterület tulajdonosának.

### Irodalom

- [1] *Gömöri J.*: Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában. Sopron, 2000. Kiadja a Soproni Múzeum Régészeti Gyűjteménye és az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága
- [2] *Heckenast G. – Nováki Gy. – Vastagh G. – Zoltay E.*: A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban (A honfoglalástól a XIII. század közepéig). Akadémia Kiadó, Bp. 1968
- [3] *Kerpely A.*: Adatok a vas történetéhez Magyarországon. Bp. 1898
- [4] *Terry S. Reynolds*: Az ipari forradalom középkori gyökerei. Tudomány, 1985/2.
- [5] *Dr. Török B.*: A Magyar Királyság vaskohászata a Rákóczi-szabadságharc előestéjén és idején. Oktatási segédlet, Miskolc, 2005
- [6] *Wolf, G.*: Bau eines Rennofens und Verhütten von Eisenerz, Göttingen, 1971
- [7] *Heckenast G.*: A magyarországi vaskohászat története a feudalizmus korában. Akadémia Kiadó, Bp. 1991
- [8] *Johannsen, O.*: Geschichte des Eisens, Düsseldorf, 1953
- [9] *Thiele Á.*: A bucavas kora középkori előállításának korhű gyártástechnológiája a korszerű anyagtudomány tükrében. TDK dolgozat, 2009