

Az avar kori vaskohászat komplex rekonstrukciója

– a nagyméretű ékelt vasbucák készítechológája a gypvasércektől kezdve a faszénégetésen át a kohósításokig

Thiele Ádám

Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Rezümé

Magyarországon főként a Dunántúlon nagy számban ismertek az avar kori vaskohászat régészeti emlékei. Az elmúlt évtizedek iparrégészeti feltárásai nyomán napvilágra került objektumok és leletek, illetve a korábban a honfoglalás kori vaskohászat kísérleti régészeti módszerekkel történő felelevenítése során szerzett tapasztalatok alapján ez az írás az avar kori vaskohászat rekonstrukcióját mutatja be, részletes adatokat nyújtva a felhasznált gypvasércekről, a kisboksás faszénégetésről és a kohósításokról. A kísérleti munka legfontosabb támpontjává az a nagyméretű, avar kori, 9,3kg-os ékelt vasbucalelet szolgált, amely a petesmalmi halastavak egyikének medréből került elő mintegy húsz évvel ezelőtt.

Régészeti leletek alapján megépített, az avar korra jellemző átlagos, 38cm-es medenceátmérőjű kohóval elvégzett rekonstrukciós kísérletek során a petesmalmi gypvasérc kohósításával kapott 11-13kg-os tömörített bucák többszöri újraizzításával és ékelésével 8,7-9,9kg-os ékelt vasbucákat sikerült elkészíteni. E kísérleti eredmények alapján látható, hogy a korabeli vaskohások akár a petesmalmihoz hasonló, nagyméretű vasbucákat is előállíthattak egyetlen kohósítás során a honfoglalás- és Árpád-koriaknál jellemzően nagyobb méretű, 35-50cm-es medenceátmérőjű bucakemencékben. Egy ilyen kohósítás és az azt követő újraizzítások és az ékelés két ember kb. 12 órányi munkáját igényelte, összesen kb. 50kg vasércre és kb. 100kg faszénre volt szükség hozzá, amelynek előállításához kb. 2/3m³-nyi faanyag kellett. Bár hasonlóan nagyméretű vasbucák előállítása technikailag szintén lehetséges volt a kohósítások során kapott vasbucák tömörítésekor leeső, letöredező kisebb-nagyobb bucavas darabok, de akár különálló, kisebb méretű, tömörített vasbucák egyetlen nagyobb vasbucává való összehegesztésével is, az előbbi, egyfajta újrahaznosító technika gazdaságossági szempontból még igen, utóbbi azonban már egyáltalán nem indokolható.

A kísérleti eredmények alapján feltételezhető, hogy avar kori vaskohászat munkaszervezése jelentősen eltérhetett a későbbi, honfoglalás- és Árpád-kori magyar vaskohászatra jellemzőtől: bár az avarok nagyobb méretű, egyesével vagy párosával épített, részben vagy teljes magasságukban szabadon álló kohókban több vasérc és több faszén felhasználásával, hosszabb, akár egy teljes munkanapot igénylő kohósítások során nagyobb méretű vasbucákat állítottak elő, a magyarok a műhelygödörök oldalfalában kialakított több kisebb kohóban párhuzamosan dolgozva, rövidebb kohósítások során sok kisebb vasbucát nyerve összességében ugyanakkora, de akár nagyobb napi vastermelést is elérhettek egy-egy kohótelepen.

1. Bevezetés

1.1. Történeti, régészeti háttér, célok

Magyarország területén az elmúlt évtizedekben elvégzett régészeti feltárások alapján a legkorábbi nagy volumenű, iparszerű vaselőállítás nyomait az avar korból ismerjük. A legnagyobb avar kori vaskohászati telepeket a Dunántúlon, Somogyban tárták fel Zamárdiban¹, Kaposvár-Fészerlakon² és Kaposvár-Kisivánpusztán³, illetve nagyobb késő avar kori kohótelepre bukkantak Tolnában Bátaszék mellett⁴. Számos avar kori kohó ismert korábbi régészeti feltárásokból Sopron környékéről, pl. Nemeskér, Dénesfa, Harka, stb.⁵, Somogyból pedig pl. Magyaratád, Alsóbogát⁶ közelében és a Lábod melletti Petesmalmi Vidrapark egyik halastavánál⁷. Ma már az is látható, hogy az avar kori vaskohászat régészeti emlékei tovább folytatódnak Somogytól délebbre, Horvátországban, a Drávamelléki területeken is.⁸

Az avar kori vaskohászat rekonstrukálásához alapvető fontosságú egy avar kohó történelmileg hiteles másolatának megépítése. A régészeti feltárások alapján tudható, hogy a jellemzően egyesével, vagy párosával egymás közelébe épített avar kohók részben vagy teljes magasságukban szabadon állók, és általában nagyobb méretűek (kb. 35-50cm-es medenceátmérőjűek) voltak, mint a későbbi, műhelygödörök oldalfalába nagyobb számban beépített, kisebb (kb. 25-40cm-es medenceátmérő) honfoglalás-⁹ és Árpád-kori magyar kohók. Az avar kori vaskohászat rekonstrukálásához szükséges jellemző kohóméretekről (a medencénél mérhető legnagyobb belső átmérő és a kohó magassága) kevés

¹ GALLINA et al. 2007, GALLINA 2011

² GALLINA 2002

³ Gallina Zsolt 2022. május 2-4., 31. facebook posztjaiban szereplő ásatási fotók, valamint Gallina Zsolt a Magyar Nemzeti Múzeum Könyvtárában 2022. februárban az MTA VAB Iparrégészeti és Archeometriai munkabizottsága és a 2023. decemberben a Hadak Útján konferencia sorozaton tartott előadása alapján.

⁴ CZÖVEK 2010

⁵ GÖMÖRI 2000a, 102–126, 210–216, 185–196, GÖMÖRI 2012

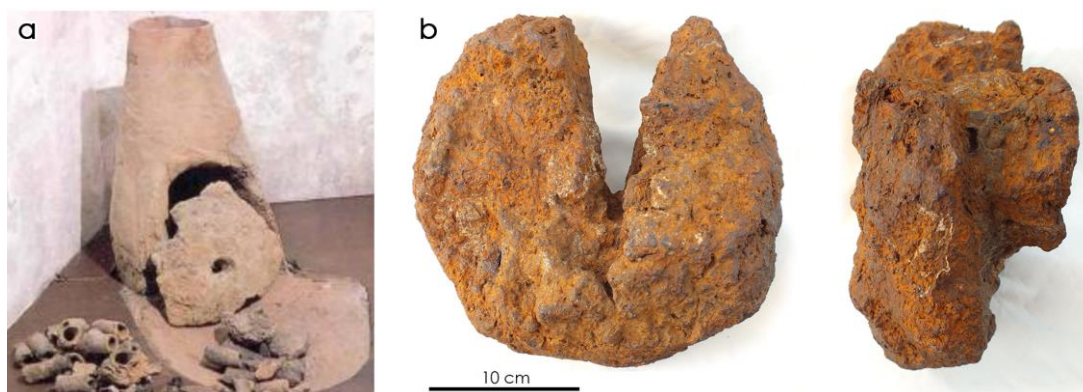
⁶ GÖMÖRI 2000b, 164, 172-174

⁷ KÖLTŐ 1999

⁸ IVANCAN 2021, BRENKO et al. 2022

⁹ A somogyfajsi Őskohó Múzeumban látható egy ilyen, a 10. századi vaskohászatra jellemző műhelygödör, több beépített kohóval.

konkrét adat lelhető fel, mert a beépített kohókkal szemben a szabadon álló kohók jóval lepusztultabb állapotban kerülnek elő a régészeti feltárásokon (többnyire csak a legalsó részük, a medence alja marad meg), így nehezen rekonstruálható az eredeti kohógeometria. A szabadon álló avar kohók méreteihez és alakjához jó támpontot nyújt a nemeskéri 3-as kohó, amelyet darabjaiból megépítve sokáig lehetett látni a soproni Liszt Ferenc Múzeum kiállításában (1a. ábra), ennek legnagyobb belső átmérője (medenceátmérője) 43cm, magassága a medence aljától mérve kb. 80cm volt.¹⁰ A magyaratádi avar kohók egyikének szintén ugyanekkora medenceátmérője volt.¹¹ Avar kohók méreteiről a Bátaszéki kohótelep vonatkozásában is sok adat áll rendelkezésre, mert az itteni avar kohók, a korszakra kevésbé jellemző módon teljesen beépítettek voltak, így jó állapotban őrződtek meg. Ezek a kohók 40-50cm-es (esetenként 55cm-es) legnagyobb belső átmérővel rendelkeztek, az eredeti magasságuk pedig a medence aljától kb. 100cm lehetett.¹² A Kaposvár-Fészerlakon, Kaposvár-Kisivánpusztán és Zamárdiban feltárt avar kohótelepek kohómaradványai alapján is jellemzően hasonló, vagy még nagyobb (Zamárdi esetében a legtöbb kohóra 50cm feletti)¹³ medenceátmérőket becsülnek. A Horvát régészek a drávamelléki avar kori kohók legnagyobb belső átmérőjét általában 36-40, maximum 42cm-ben határozták meg¹⁴.



1. ábra: a) A szabadon álló nemeskéri 3-as számú avar kohó (9-10. század), b) A petesalmi ékelt vasbucák (8-9. század)

A feltárt avar kohók maradványain és az egyéb vaskohászathoz köthető leleteken (salakok, fúvókák, stb.) kívül a rekonstrukciós kísérletekhez fontos támpontot jelentenek a korszakra datálható vasbucák. Ilyenekből sajnos csak hármat ismerünk. 2003-ban a Petesalmi Vidraparkban az avar kohóktól kb. százötven méterre egy leeresztett halastó gyeppasértes medréből egy nagyméretű (23x21x7cm-es befoglaló méretekkkel rendelkező), 9,3kg tömegű ékelt vasbucák került elő (1b. ábra).¹⁵ Zalavár-Várszigeten pedig további két, ehhez hasonló méretű (24x20x11 és 26x20x10cm-es), szintén az avar korra datált ékelt vasbucát találtak (ezeknél azonban nem biztos, hogy helyben készültek)¹⁶. Ezek a vasbucák jóval nagyobbak a későbbi, honfoglalás kori vaskohászatra jellemző néhány kg-os vasbucáknál, amelyek pl. a somogyfaiszi 10. századi vaskohászati műhely régészeti feltárásakor kerültek elő.¹⁷ Korábban azt feltételezték, hogy ezek az avar kori, nagyméretű ékelt vasbucák aligha születhettek meg egyetlen kohósítás eredményeképpen az általunk ismert kora középkori pannóniai bucakemencékben,¹⁸ ehelyett inkább a honfoglalás koriakhoz hasonlóan kicsi, 1-3kg-os vasbucákat állítottak elő, majd ezeket hegesztették össze.¹⁹ Ezzel szemben a nagyméretű kohók és az avar korra datálható nagyméretű vasbucák alapján az ebben az írásban bemutatott kísérleti munka kapcsán abból a hipotézisből indulok ki, hogy ezek a nagyméretű, ékelt vasbucák egyetlen kohósítással készültek. Eszerint tehát a nagyméretű ékelt vasbucák leletek nem kivételes darabok, hanem a késő avar korra jellemző fejlett és termelékeny vaskohászat produktumait reprezentálva azt mutatják, hogy a korabeli kohókban akár ekkora vasbucákat is előállíthattak. Az írás további részében azt mutatom be, hogyan.

¹⁰ GÖMÖRI 1978, 143-144

¹¹ GÖMÖRI 2000b, 173

¹² CZÖVEK 2010, GALLINA 2018

¹³ Gallina Zsolt szíves szóbeli közlése és megküldött ásatási fotói alapján

¹⁴ Tena Karavidović horvát régész szíves közlése alapján

¹⁵ A petesalmi nagyméretű ékelt vasbucák lelőhelyének pontos behatárolása és a megtalálás körülményei a terület tulajdonosa, a Somogy Természetvédelmi Szervezet (Somogy TVSZ) vezetője, Tömösváry Tibor szíves szóbeli közlése alapján röviden: Tömösváry Tibor a 2003-as év száraz nyári időszakában alacsony vízszint mellett madármegfigyelés közben vassalakdarabokat és fúvókátöredékeket vett észre a nádas tóparton, a kiszáradt tómeder szélén. A tómederben pár héttel később a terület gondnoka, Varjas Gábor találta meg az ékelt vasbucát (amelyet egy kohó aljaként azonosított) a vaskohászati maradványoktól 150-200m-re a halastó medrét borító gyeppasértes hordalékkúp szélén, a tóparttól 30-50m-re, a tóparti kilátóval szemben. A leletet Bayer László (szintén a Somogy TVSZ munkatársa) azonosította ékelt vasbucaként. A leletek bejelentését követően ősz végén Költő László (Somogy Megyei Múzeumok Igazgatósága igazgatója) vezetésével történt régészeti feltárás, a lelőhelyet a fúvókák és cseréptöredékek alapján az avar korra datálták. Később először Fehér András majd Török Béla kohómérnökök anyagvizsgálatokat végeztek a vasbucán.

¹⁶ Török Béla szíves szóbeli közlése

¹⁷ GÖMÖRI 2018, 81, 1. ábra

¹⁸ TÖRÖK et al. 2018a, 3

¹⁹ GALLINA et al. 2023, úgy vélem, hogy a poszteren leírtakkal szemben ez a technika a vasbucák heterogenitása és a kivágott minták kis mérete miatt pusztán anyagvizsgálatokkal nem, csak a technikát részleteiben rekonstruáló korábbi kísérleti munka (amelyről publikáció még nem, csak egy youtube videó született: <https://www.youtube.com/watch?v=0GpHU572pro>) eredményeinek ismeretében igazolható.

1.2. Kísérleti előzmények

A jelen írásban bemutatott avar kori, nagyméretű, ékelt vasbucákat előállító vaskohászatot rekonstruáló kísérleteket az elmúlt bő két évtized kísérletező munkája előzte meg²⁰, amelyek során számos próbakohósítást végeztem el fajszi típusú, 25-30cm-es medence átmérőjű, 80-90cm magas, beépített bucakemencékkel a somogyi honfoglalás kori vaskohászat rekonstruálása céljából,²¹ két esetben (Zamárdiban és Kaposváron) avar kori kohótelepek régészeti feltárásain is.²² A kis fajszi típusú kohókban elvégzett kísérletek során rendszerint csupán 1-3kg-os vasbucákat sikerült előállítani 8-15kg vasércből, 20-40kg faszén felhasználásával, 4-6 órás kohósításokkal²³. E kísérleti munka alapján korábban a vastermelés ugyanilyen alacsony volumenét, a 10-15kg vasérc és 15-20kg faszén felhasználásával előállított 1-3kg-os vasbucákat feltételezték a nagyobb avar kori kohók vonatkozásában is.²⁴

A kísérleteket az avar- és honfoglalás kori vaskohászat ércbázisául szolgáló somogyi gyevasérctelepek felkutatása előzte meg. A jó minőségű, a kohósításokhoz nagy mennyiségben rendelkezésre álló konkrét gyevasérc lelőhelyek korábban nem voltak ismertek. Szakirodalom alapján nem, csak éveken át tartó terepbejárások, a talált érceken elvégzett anyagvizsgálatok és próbakohósítások során sikerült néhány archeometallurgiai szempontból is releváns belső-somogyi gyevasérc telepet felfedezni, ezek genetikáját és fontosabb geokémiai jellemzőit leírni.²⁵

A belső somogyi gyevasérc próbakohósításai rávilágítottak egy, a területen fellelhető gyevasércekre általánosan jellemző problémára: ezek a biogén eredetű (vasbaktériumok közreműködésével keletkezett), késő pleisztocén vagy recens ércek a mocsári környezethez köthető genetikájuk miatt nagy foszfor (és néha szintén nagy arzén-) tartalmúak. A foszfor a kohósítás során nagy mennyiségben bekerülve a vasfázisba melegtörékenységet okoz, így a bucavasat kovácsolhatatlanná teszi, de már kisebb, pár tized tömeg %-os mennyiségben is szobahőmérsékleten nagy ridegséget, törékenységet mutató vasanyagot eredményez.²⁶ Ugyanakkor ezt a foszforvasnak²⁷ nevezett speciális, a mai iparban már nem létező, így többek közt mechanikai tulajdonságaira nézve sem ismert vasötvözetet ridegsége, törékenysége ellenére, nagyon kedvező optikai tulajdonságai miatt előszeretettel használták első sorban a középkori damaszkolt kés- és kardpengékben díszítő céllal.²⁸ Ennek oka, hogy a foszforvas és a foszfort nem, csak szén tartalmazó bucavas anyagok párosításával létrejövő kontrasztos mintázat és a különleges, (ecetgőzben való) maratással láthatóvá váló durvaszemcsés szövetszerkezet rendkívül dekoratív.²⁹

Arra, hogy a foszfornak mekkora szerepe lehetett a somogyi avar és honfoglalás kori vaskohászatban, leginkább a területről származó korabeli vasbucák anyagvizsgálata alapján lehet következtetni, de a salakminták is nyújtanak némi támpontot.³⁰ Megállapították, hogy a somogyfajszi vasbucák³¹ és a petesalmi nagyméretű ékelt buca³² is foszforvas. Ezek foszfortartalma annyira nem magas, hogy melegtörékenységet okozva kovácsolhatatlanná tegye a vasanyagot, de ezek a bucavasak ridegségük miatt csak alárendeltebb célokra használhatók. Bár tisztán foszforvasból készült középkori vaseszköz leletek néha előkerülnek, azonban ezek készítését jellemzően a jobb minőségű vasanyag hiányára vezetik vissza.³³ Mindezek alapján feltételezhető, hogy a néha kifejezetten magas vastartalmuk és a tömeges előfordulásuk ellenére e technológiai problémák is hozzájárhattak ahhoz, hogy az avar kort és honfoglalás időszakát leszámítva a somogyi foszfordús gyevasércek kohósítását mellőzték.

2. A kísérletekhez felhasznált gyevasérc

A korábban feltérképezett belső-somogyi, archeometallurgiai szempontból jelentős gyevasérc telepek két fő csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartoznak a főképpen a jelenkori patakok medreiben feltáródó, elsődlegesen, késő-pleisztocén ártéri mocsári, lápi környezetben, vasbaktériumok életműködése következtében kialakult biogén gyevasérc lencsék.³⁴ Ezek makroszerkezete néhány mm átmérőjű, limonittal lazán összecementált gumókból áll (2b.

²⁰ Ezeket pedig néhány még korábbi, pl. az 1962–64-es diósgyőri (HECKENAST et al. 1968, 195-232) és a 1992-es soproni (GÖMÖRI 2000a, 275-277) kísérlet előzte meg.

²¹ THIELE–DÉVÉNYI 2011, THIELE 2011

²² GALLINA–TÖRÖK 2018, GALLINA et al. 2023, ezekben a kísérletekben többek között részt vett Gallina Zsolt, Gulyás Gyöngyi, Tena Karavidović, Költő László, Gömöri János régészek, Török Béla és Fehér András kohómérnökök is.

²³ A kezdeti kísérletek kudarcai után apránként kibontakoztak a rég feledésbe merült bucavaskohászati technológia részletei és sok alkalommal vezetett eredményre nemcsak a somogyi, hanem az ország más területein előforduló kisebb vasérclelőhelyek különböző genetikájú, ásványos- és kémiai összetételű, de elegendően nagy vastartalmú érceinek kohósítása is. A nyaranta megrendezésre kerülő somogyfajszi Őskohász Táborban 50-70 résztvevővel immár 16 éve közösen elevenítjük fel a honfoglalás kori vasipar teljes vertikumát a vasércgyűjtéstől kezdve a faszénegetésen át a vasbucák előállításáig és vastárgyak kikovácsolásáig. A táborról és a honfoglalás kori vaskohászat technológiájáról szóló youtube videó: <https://www.youtube.com/watch?v=o3kPX2OEaBE&t=50s>

²⁴ GALLINA–TÖRÖK 2018, 64, TÖRÖK et al 2018b, 411, TÖRÖK et al. 2015, 236

²⁵ KERCSMÁR–THIELE 2015

²⁶ THIELE 2015

²⁷ A foszforvas olyan vasötvözet, amelyben a foszfor 0,1%-nál nagyobb mennyiségben fordul elő (VEGA et al. 2003, 338).

²⁸ THIELE et al. 2015

²⁹ Ezeket a jelenségeket egy 13. századi horvát damaszkolt késpenge pontos másolatának elkészítésével szemléltettem, ld. THIELE 2018

³⁰ Thiele et al. 2012

³¹ ÁGH–GÖMÖRI 1999

³² TÖRÖK et al. 2018a, TÖRÖK et al. 2017

³³ PIASOWSKI 1989, 51

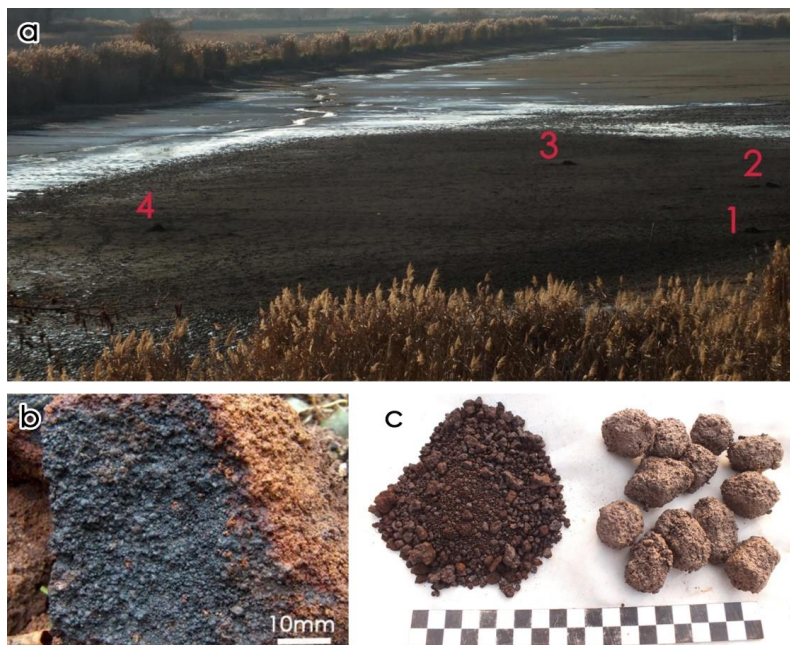
³⁴ Libickozma közelében, az Aranyos-árokban ilyen biogén gyevasérc feltáródásait mutatja be ez a youtube videó:

<https://www.youtube.com/watch?v=F-OnmlrUoD4>

ábra). Mikroszerkezetükre a legfeljebb 100nm átmérőjű, főként goethit (vas-oxid-hidroxid, FeOOH) ásványos fázisból álló, mikrobiális tevékenységre utaló gömbös, szemcsés halmaz jellemző. A második csoportba tartoznak azok a másodlagosan kialakult, áthalmozott gypvasércek, amelyek az idősebb biogén gypvasérc lencsék recens áthalmozásai és jelenkori patakok, tavak medreiben jelennek meg.³⁵

2.1. A vasérclelőhely

A kísérletekhez felhasznált gypvasércet (2c. ábra) a Petesmalmi Vidrapark egyik halastavából gyűjtöttem, a melynek fenekét kb. 5-10.000 négyzetméteres területen 5-20cm-es rétegvastagságban borít áthalmozott gypvasérc (2a. ábra), amely feltételezhetően a Rinya-patak korábbi folyása mentén (a folyás felsőbb szakaszán átvágott biogén gypvasérc lencsék lazán cementálódott gumóiból) felhalmozódott hordalék.³⁶ A tavat telente pár napra leeresztik, ilyenkor lehet lemenni a tómederbe.³⁷



2. ábra: a) A petesmalmi leeresztett halastóban felszínre bukkanó áthalmozott gypvasérc kb. 5-10.000 négyzetméter kiterjedésű hordalékkúpja (a piros számok a mintavételi helyeket jelölik). b) Tipikus biogén gypvasérc lencséből származó minta törete (Libickozma, Aranyos-árok, részletes vegyelemzési eredmények: Kercksmár- Thiele 2015, 62, I. Táblázat, 6-12 sor). c) A petesmalmi aprószemű gypvasérc (balra) és oltottmészsel granulálva (jobbra), 20cm-es léptékkel.

A tómederben elterülő, főként apró, 0-15mm szemcseméretű gypvasérc gumókból álló réteg makroszkópos megjelenését illetően homogén, de ritkán előfordulnak benne nagyobb, pár cm-es gypvasérc rögök is. A kémiai összetételben mutatkozó esetleges inhomogenitás meghatározása érdekében, négy helyen vett megszáritott, homogenizált mintán (ezek makroszkópos megjelenése a 2c. ábra baloldalán látható mintáéval megegyező volt) XRF vegyelemzés történt (1. táblázat).³⁸ Látható, hogy a lelőhely négy pontjáról származó minták kémiai összetétele kis szórást mutat, Fe_2O_3 -ra számolt vastartalmuk magas, 75-85% körüli. Érdekes még kiemelni a minták nagy foszfortartalmát, amely P_2O_5 -re számolva 5-7% között mozog. A vasércminták mindegyike tartalmaz továbbá pár százaléknyi CaO -ot, de inkább savanyú karakterisztikájúnak tekinthetők, SiO_2 tartalmuk 4-9% közötti. A megismert somogyi biogén gypvasérc lencsékben az érc kémiai összetétele nagyobb szórást és általában bázikusabb karakterisztikát mutat.³⁹ A kísérletekhez használt érc a lelőhelynek arról a részéről származik, ahonnan a 2-es minta, így a továbbiakban erre a mintára vonatkozó kémiai összetételt tekintem mérvadónak.

1. Táblázat: A petesmalmi (2a és c. ábra) és a libickozmai (2b. ábra) gypvasércminták kémiai összetétele a főbb oxidokra, * számított értékek

Minta	Főbb oxidok tömeg %-ban					
	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MnO	P_2O_5
Petesmalom 1	83,0	5,74	0,39	2,22	1,73	5,08
Petesmalom 2	82,4	4,19	0,28	2,39	3,79	5,04
Petesmalom 3	78,2	9,04	0,65	2,54	1,63	5,46
Petesmalom 4	73,9	9,55	0,86	3,56	1,75	7,23
Granulák *	80,2	4,08	0,27	4,78	3,69	4,91
Libickozma	73,5	9,30	0,48	9,10	1,30	3,32

³⁵ KERCSMÁR–THIELE 2015, 67-68

³⁶ A gypvasérclelőhelyet mutatató youtube videó itt tekinthető meg: <https://www.youtube.com/watch?v=ZQtUuwsnX0>

³⁷ Ennek a tónak a partján, a gypvasérc lelőhely szélén (a 2a. ábra fotójának jobb szélénél) ma is megtalálhatók a korábban említett avar kori salakmaradványok, ezekről rövid videó a Facebookon: https://fb.watch/r3C_Oyub7/

³⁸ Az anyagvizsgálatokat az ISD Dunafer, Spektrometriai Anyagvizsgáló Főosztály végezte, amelyért köszönet illeti Bocz András ügyvezetőt.

³⁹ KERCSMÁR–THIELE 2015, 62, I. táblázat 8-11. és 14-15. adatsora

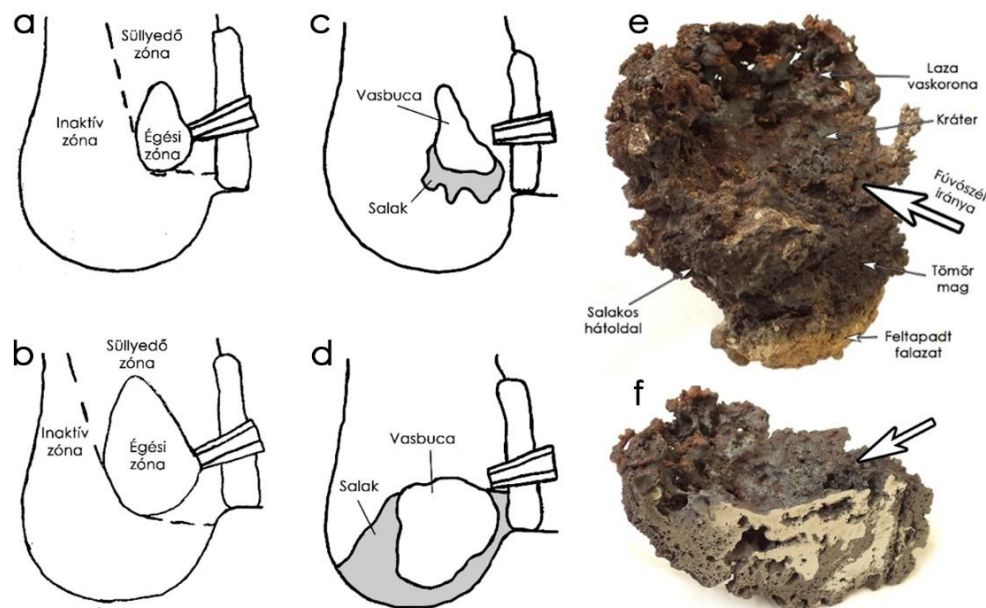
2.2. A granulációs technika

A petesmalmi gypevasérc felhasználásának előnyei a rekonstrukciós kísérletek szempontjából a történelmileg hiteles lelőhely, a nagy vastartalom, továbbá hogy könnyen és gyorsan nagy mennyiség gyűjthető belőle. A hátránya viszont a nagy foszfortartalom és az apró szemcseméret. Ezt a két problémát együttesen oldja meg az ún. granulációs technika, amelynek során kb. 25 tömeg %-nyi vizes oltottmészsel összekeverve a vasércet formázható masszáhozható létre, ebből pedig 20-30g-os, pár cm-es granulák gyúrhatók (2c. ábra). 500g-nyi nedves gypevasérc- és granulaminta szárításával meghatározható volt, hogy a vasérc tömege 87,6%-ra, a granuláké pedig 85,4%-ra csökken (hőkezelő kemencében egy órás 600°C-on való pörköléskor ugyanez az adatpár 73,0% és 71,6% volt), a kis különbségből látható, hogy a technika során főleg víz és csak kevés mészkő került a granulákba, számított, közelítő kémiai összetételüket ld. az 1. táblázatban. A granulákat a megformázásuk után pár órán belül, még nedves állapotban kohósítottam.

A granulációs technika, annak ellenére, hogy bizonyosan nem korhű, egyfajta ideális szemcseméretű és kémiai összetételű „gypevasérc modell” könnyű és gyors elkészítését tette lehetővé. Bár Belső-Somogyban több olyan gypevasérclelőhely is van (pl. Somogyszob, Kócsmóna-patak vagy Libickozma, Aranyos-árok)⁴⁰ ahol a viszonylag tömör biogén gypevasérc lencsék érce a kohósítás előtti szokásos pörkölés és aprítás után is nagyobb, pár cm-es darabokban marad (a poros frakciót célszerű szitálással leválasztani), illetve inkább bázikus, mint savanyú karakterisztikájú (1. táblázat), így a rekonstrukciós kísérletekhez ideális betétanyagok lettek volna, sajnos ezeken a lelőhelyeken nagyobb mennyiségű (több mázsá) érc gyűjtése nem volt lehetséges.

3. Technológiai alapok

A poros, kis szemcseméretű, nagy foszfortartalmú petesmalmi gypevasérc kohósításakor a korábbi fajszi kohós kísérletek során csak kisebb, néhány kg-os vasbucákat sikerült nyerni. A nagyméretű vasbucá előállítását célzó avar kohós kísérletekben két fő technológiai változtatásra volt szükség. Egyrészt a betétanyagok szemcseméretének növelésére, másrészt pedig az érc ún. „alulredukálására”.



3. Ábra: a) és b) A kohó főbb metallurgiai zónáinak eltolódása az égési zóna méretének növekedésével (a bucakemence alsó részének hosszmetézetében ábrázolva), c) Túlredukálódó vasérc esetén kialakuló vasbucá és salak. d) Alulredukálódó érc esete. e) Egy kisméretű, 2kg-os vasbucán megfigyelhető főbb morfológiai jellegzetességek. f) Egy hasonló vasbucá keresztmetsete

A további magyarázathoz szükséges a kohóban zajló néhány alapvető metallurgiai folyamat értelmezése⁴¹. Az aprószemű vasérc csak szintén aprószemű (a korábbi kísérletekben 6-25mm-es szemcseméretű) faszénnel kohósítható, különben az érc a nagyobb faszén szemcsék közt gyorsan a kohó inaktív zónájába (3a. és b. ábra), a kohó aljára és az égési zóna mögé pereg. A kis szemcseméretű faszén esetén viszont a fúvóka előtt kialakuló égési zóna (amelyben a faszén elég) kis kiterjedésű lesz, így az égési zóna alsó részén keletkező vasbucá nem tud nagyra növekedni. Az égési zónába felülről folyamatosan süllyed az elegyoszlopot alkotó faszén és vasérc, az égési zóna mögött lévő inaktív zónában viszont a faszén mozdulatlan a kohósítás folyamán (3a és b. ábra).

A kialakuló vasbucá méretének növelése szempontjából tehát az egyik lényeges technológiai jellemző az égési zóna méretének a növelése, amely a betétanyagok (első sorban a nagyobb térfogatú faszén) szemcseméretének és a befűjt levegő mennyiségének növelése tesz lehetővé (3b. ábra). A másik pedig a kohósítás során az érc alulredukálása, amelynek során a vasérc vastartalmának jelentős része elsalakul, így pedig a keletkező, nagy mennyiségű, nagy vastartalmú, az adott hőmérsékleten kis viszkozitású (híg folyós) salak részben vagy egészben feltölti a kohó

⁴⁰ KERCSMÁR–THIELE 2015, 60-62

⁴¹ Ezek előzményeként a bucavaskohászat metallurgiájával kapcsolatban: THIELE 2011

medencéjét és kiszorítva onnan az inaktív zóna alján lévő faszenet lehetővé teszi, hogy a kialakuló vasbuca mélyen a fúvóka alá, a folyékony salakba süllyedve nagy méretű és tömör legyen (3d. ábra). Foszfordús gypvasécek kohósításakor az alulredukálódás esetén további előny, hogy a keletkező vasbuca kis foszfortartalmú (így jól kovácsolható és hidegen is szívósabb) lesz, mert a foszfor megoszlással a vasfázis helyet a salakfázisba kerül nemcsak annak nagyobb mennyisége, hanem nagyobb vasoxidtartalma okozta nagyobb bázikussága miatt is. A granulációs technikánál alkalmazott oltottmész a salak CaO-tartalmát, ezzel pedig bázicitását tovább növelve a savanyú P_2O_5 megkötését még inkább elősegíti.⁴²

Ezzel szemben, ha az érc „túlredukálódik”, akkor kevés, és kisebb vastartalmánál fogva nagyobb viszkozitású (nehezebben folyó) salak keletkezik, amely kevésbé tölti fel a kohó medencéjét, így a kialakuló vasbuca mérete kicsi marad (3c. ábra). A túlredukálódás további hátrányos következményei, hogy egyrészt a foszfordús gypvasécek esetén a megoszlás révén a kevés salakba alig jut foszfor, ehelyett többnyire a kialakuló vasbucába kerülve azt törékennyé, gyakran kovácsolhatatlanná teszi, másrészt magas, laza „vaskoronával” rendelkező vasbuca alakul ki. A kialakuló vasbuca morfológiai jellemzője, hogy csak a fúvóka alá süllyedő, olvadt salakban úszó része lesz viszonylag tömör (az olvadt salakban jobb a vasfázis szinterződése), a fúvóka feletti, „szárazon” lévő része viszont egy laza vaskoronát alkot (ez a fúvóka előtt patkó alakban rakódik fel a vasbuca tömör magjának felszínén a fúvószél hatására kialakuló kráter körül, ld. 3e és f. ábra). A vaskorona a kohóból kihúzott vasbuca első tömörítése során gyakran összetöredezve elválik a vasbuca magjától.

Az aprószemű petesalmi vasérc esetén alkalmazott granulációs technikával tehát a kohósítás nagyobb szemcseméretű (a kísérletekben 25-50mm-es) faszénnel végezhető, a granulák kisebb fajlagos felülete pedig (és a nedves állapotban történt kohósításuk is) kedvez az alulredukálódásnak, így a nagyobb méretű és kisebb foszfortartalmú vasbuca kialakulásának. Az alulredukálás a kohó geometriai kialakításával is elősegíthető. A kohó aknájának szűkítésével, gyorsabban süllyedő elegyoszlop esetén kevesebb idő áll rendelkezésre a vasérc redukációjához (vö. a régészeti feltárásokon gyakran megfigyelhető körte alakú kohók, pl. Bátaszék esetében)⁴³.

Az érc alulredukálásának azonban nagy hátránya a vaskihozatal csökkenése. A középkori bucavaskohászat egyik sajátos technológiai jellemzője, hogy a nagy, tömör vasbucák előállítására csak sok hígfolyós salak keletkezése mellett, a vaskihozatal (egy kg ércből nyerhető vas tömege) csökkenése árán lehetséges. A korabeli vaskohászok ezt megértve és elfogadva nem a vaskihozatal, hanem inkább az előállított vasbuca tömegének maximalizálására törekedhettek.

4. Faszénégetési kísérletek

A kohósításokhoz szükséges faszenet magam égettem több alkalommal kisboksákban.⁴⁴ A faszénégető kísérletek célja egyrészt a kohósításokhoz szükséges nagy szemcseméretű faszén előállítása volt, amely a kereskedelmi forgalomban zsákos kiserelésben kapható, poros, jórészt kis szemcseméretű és drága faszén frakcionálásával nagyon gazdaságtalan. Másrészt a szakirodalom alapvetően az újkori nagyboksás faszénégetéssel foglalkozik, így a néhány köbméteres kisboksás faszénégetésre vonatkozó részletes technológiai adatok meghatározására és a munkaszervezési kérdések jobb megválaszolhatósága érdekében is célszerű volt ilyen kísérletek elvégzése, ezzel pedig az avar kori vasipar teljes technológiai vertikumának reprodukálása.

A faszénégetés a vaskohászathoz és a kovácsoláshoz szorosan kapcsolódó tevékenység volt, ez biztosította a tüzelő- és redukálóanyagot. Az eddig vizsgált korabeli faszendarabok döntő többsége kocsányos- és kocsánytalan tölgyből származott.⁴⁵ A tölgy felhasználásának feltételezhető okai között szerepel az, hogy egyrészt laza szerkezete miatt nagy, kémiaiilag aktív felülettel rendelkező és jó gázátbocsátó képességű faszén készült belőle⁴⁶, másrészt a tölgy és a bükk volt a legkönnyebben hozzáférhető fafajta. Bár az avar korból nem, de a honfoglalás kori kohótelepek régészeti feltárásain néhány alkalommal (Nemeskér-Tüskésrét⁴⁷, Tömörd-Csepregi-erdő⁴⁸ és Iván-Dudás-dűlő⁴⁹) sikerült megfigyelni a feltételezhető faszénégető boksák helyeit. Ezek kb. 180-200x250-300cm nagyságú, sekély, tányér alakú gödrök voltak.

4.1. A boksza megépítése

Az itt bemutatott két kisboksás faszénégető kísérlethez 1,35 ill. 2, 48m³ térfogatú csertölgy (*Quercus cerris*) rönkfát használtam. Bár a kora középkori kisboksákban feltételezhetően inkább méretre vágott vagy tört ág-, gally-, esetleg vékonyabb rönkfát használtak, a kísérletek során a pontosabb mérések és jobb megismételhetőség érdekében célszerűbb volt a vastag rönkfából vékonyra hasogatott faanyaggal való modellezés. A kísérletekhez használt faanyag tömegét, térfogatát (kéreggel együtt) és az ezekből számított sűrűségét a 2. táblázat mutatja. Néhány

⁴² THIELE–TÖRÖK 2020, ld. a poszter alján szereplő képletet a foszformegoszlásra

⁴³ CZÖVEK 2010

⁴⁴ Jelen írásban csak két kisboksás faszénégető kísérletet mutatok be részletesen, az egyikről szóló youtube videó itt tekinthető meg:

<https://www.youtube.com/watch?v=xSkY7ZovSws&t=610s>

⁴⁵ GÖMÖRI 2000a, 267, TÖRÖK 2011, 16

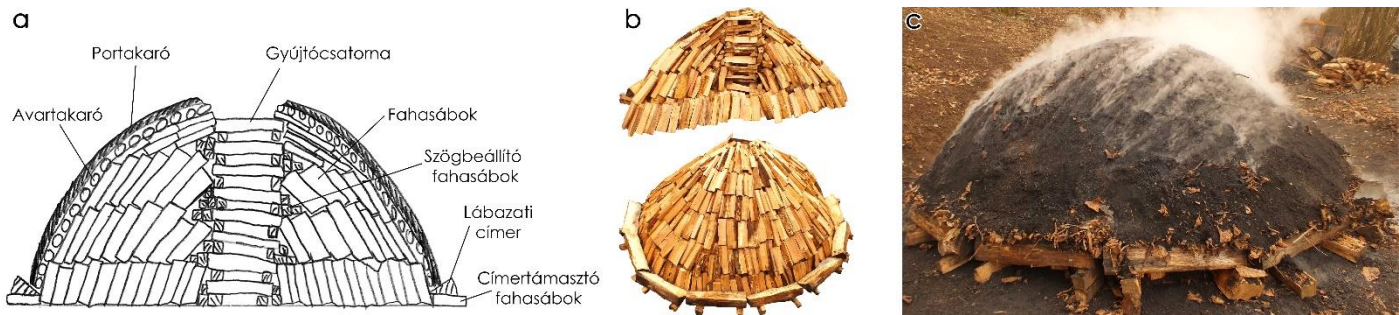
⁴⁶ TÖRÖK 2010, 228

⁴⁷ GÖMÖRI 2000a, 118, 122, 66. kép, 71–73. kép

⁴⁸ GÖMÖRI 2000a, 204, 147. kép

⁴⁹ GÖMÖRI 2000a, 85, 37. kép

próbahasáb abszolút szárazra szárításával meghatároztam a boksákba rakott faanyag nedvességtartalmát,⁵⁰ amely 57 és 65%-os volt, így a berakott faanyag abszolút száraz össztömege is kiszámítható volt (ld. 2. táblázat). A faanyag felhasogatása után mindegyik boksa esetén (kb. 300kg-nyi felhasogatott faanyagra a fahasábok darabszámából) meghatároztam a fahasábok átlagos tömegét (2. táblázat). A felhasogatott faanyagból (6. ábra) rakott boksák 250 és 320cm-es átmérőjűek (jól közelítve a régészeti feltárások vonatkozó adatait), illetve 90, 120cm-es magasságúak voltak, ebből a boksák térfogata (a boksák alakját gömbsüveggel közelítve) kb. 2,6 és 5,7m³-re adódott (2. táblázat), a boksák térfogata tehát kb. kétszerese lett a felhasznált faanyag térfogatának.



4. Ábra: a) A boksa keresztmetszeti rajza a főbb részek megjelölésével, b) Félíg megépített boksa keresztmetszete (fent) és hátulnézete (lent) takarás előtt. c) Boksa nyitott lábazati címerrel és betakart gyújtócsatornával a begyújtási szakasz után, a szénítési szakasz elején

A kisboksás faszénégetési kísérletek egy enyhe lejtésű (ez a faanyagból távozó kondenzvíz kifolyása miatt fontos), fáktól megtisztított, erdő széli területen történtek. A klasszikus, több szakirodalomban⁵¹ is részletesen bemutatott, félgömb alakú, földdel takart boksa megépítése a középpont és a leendő becsült átmérő kijelölése után a becsült magasságig az ún. gyújtócsatorna felépítésével kezdődik, amely négyzet alakban egymásra párosával rakott fahasábokból áll (ld. 4a. ábra). A kisboksáknál a gyújtócsatorna belső nyílása kb. 15x15cm-es volt. Ezután a gyújtócsatornát majdnem függőlegesen álló fahasábokkal kell körberakni a kijelölt átmérő eléréséig, majd erre egy kissé meredekebb szögben álló, kisebb átmérőjű fahasábsor következik, és így tovább, míg el nem érjük a gyújtócsatorna tetejét. A boksa tömegközéppontjának közelében a fahasábok lehetnek nagyobbak, attól távolodva pedig kisebbek. A fahasábokat a lehető legtömörebben illesztjük és a hézagokat szükség szerint kisebb fadarabokkal töltjük ki. A boksa lábazati részéhez ezután körbe címert rakunk (vízszintesen elhelyezett, alacsony lábakon feltámasztott hosszabb rönkfa vagy fahasábok), amely a lábazati részen lehetővé teszi a levegő beáramlását. A címer a kisméretű boksáknál egyszerű, az avar és portakarást megbontó, fahasábokból kirakott szellőzőablakokkal is helyettesíthető. A boksát a nyitott gyújtócsatorna kivételével pár cm vastagon avarral és földdel (még jobb, ha faszénporral keveredett porhanyós földdel) takarjuk be, amelyet a lábazati részen a címer tart meg. A boksát borító földtakaró funkciója egyrészt a levegő be- és kiáramlásának jelentős csökkentése, másrészt a hőszigetelés.

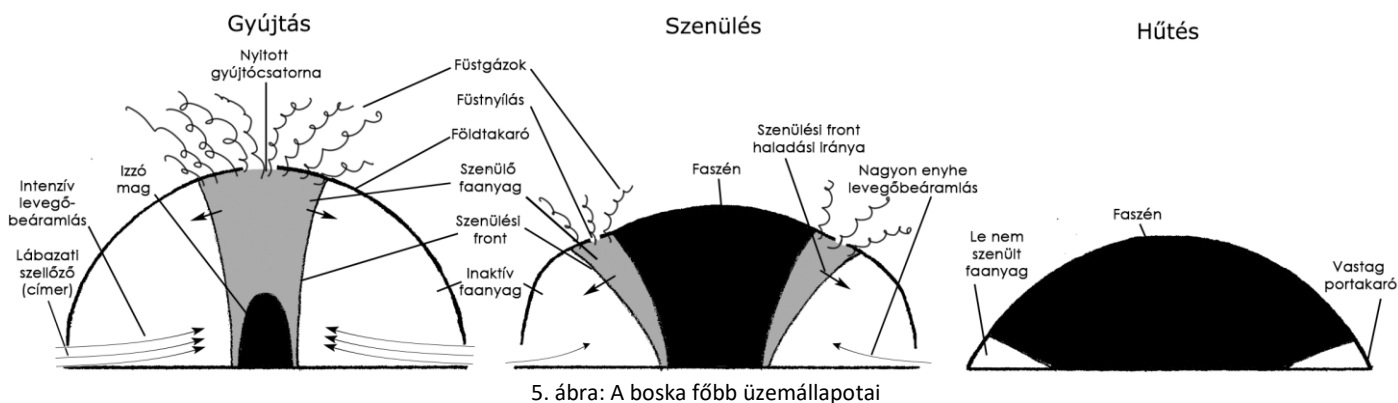
2. Táblázat. A kisboksás kísérletek adatai

Jellemzők		Kísérlet sorszáma	
		2024/1	2024/3
Faanyag jellemzői	nedves össztömeg (kg)	1278	2569
	nedves térfogat (m ³)	1,35	2,48
	sűrűség (kg/m ³)	947	1036
	nedvességtartalom (%)	57	65
	abszolút száraz össztömeg (kg)	814	1557
	fahasábok átlagos tömege (g/db)	705	740
Boksa jellemzői	boksa átmérője (cm)	250	320
	boksa magassága (cm)	90	120
	boksa térfogata (m ³)	2,6	5,7
Kihozatal	faszén (kg)	197	396
	nedves térfogatra (kg/m ³)	146	160
	abszolút száraz tömegre (%)	24	25
	le nem szenült faanyag (kg)	55	39
	veszteség nedves össztömegre (%)	4,3	1,5
Időtartam	szenítés (óra)	50	60
	kihűtés (óra)	20	10
	összesen (óra)	70	70
	termelékenység (kg/óra)	3,9	6,6

⁵⁰ nettó fanedvesség (%), $u = 100 \times (m_n - m_0) / m_0$, ahol m_0 az abszolút száraz tömeg, m_n pedig a nedves tömeg
⁵¹ pl. EMRICH 1985, 27-33

4.2. A boksa üzemállapotai

A boksa három főbb üzemállapotát különböztethetjük meg, a begyújtást, a szenítést és a lehűtést (5. ábra).



A néhány órás begyújtási szakasz a gyújtócsatornába öntött parázssal kezdődik, amelyre apró, száraz, könnyen gyulladó faanyag kerül, így feltöltve a gyújtócsatornát. Az elégett fát felülről folyamatosan pótoljuk. A begyújtási szakaszban a boksa gyújtócsatornája és a lábazati címer (szellőző) nyitott, sok levegő áramlik be, a boksában ekkor alakul ki a legnagyobb hőmérséklet (a gyújtócsatorna alján 1000°C feletti, a termopáros hőmérsékletmérések alapján). A begyújtási szakasz végén a boksa faanyaggal teletöltött gyújtócsatornáját avar és földtakarással zárjuk le.

A szenítési szakaszban a boksa portakarása majdnem teljes, így jelentősen csökken a huzat és a faanyag szenülése alacsonyabb, kb. $400-500^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleten folytatódik. A szenülés a gyújtócsatorna hossz tengelyétől radiálisan kifelé és lefelé szétnyíló kúppalást mentén terjed majdnem a talajszintig. A portakarót csak a kicsivel a szenülési front mögött kialakított füstnyílások és a címer bontják meg, ezeken keresztül történik a kezdetben legnagyobb részben vízgőzből álló füstgázok kiáramlása.

A boksa térfogata a szenítési szakaszban jelentősen csökken, a kísérletek során a magasság kb. az eredeti $2/3$ részére csökkent. A boksa már leszenült részét kezdetben óránként, majd $2-3$ óránként tömöríteni, döngölni kell az egyenletes térfogatcsökkenés és a horpadások, átlukadások elkerülése érdekében. Mivel a faanyag először a gyújtócsatorna környezetében, a boksa középvonala környékén szenül le teljesen, a tömörítések hatására a boksa „vállasodni” kezd, a váll a szenülési frontnál alakul ki (5. ábra).

A szenítési szakasz időtartamát a boksába áramló levegő mennyisége befolyásolja, amely a lábazati szellőzést biztosító címerrel és a portakarón kialakított füstnyílásokkal szabályozható: minél több levegő áramlik be, annál gyorsabb a szenítési szakasz és annál intenzívebb a füstképződés, de túl a nagy huzat csökkenti a faszénkihozatalt. Ahol a boksa szenülése befejeződött, ott a füstölés megszűnik. A faanyag a lábazatig, szerencsés esetben egészen a talajszintig faszénnek alakul (5. ábra), ez azonban általában nem egy időben történik meg a teljes terület mentén (a szenülés front haladási sebességét sok tényező, pl. oldalszél, huzat, a faanyag térkitöltése, stb. befolyásolja).

Amikor a szenülési front a teljes terület mentén nyugvópontja jut, mindenütt megszűnik a boksa füstölése, amely ekkora csak faszén esetleg a lábazatnál egy nagyon kevés le nem szenült faanyagot tartalmaz (6. ábra). Ilyenkor a füstnyílásokat lezárjuk, a kialakult faszén porral fedjük, a lábazati részre pedig vastag földtakarót hordunk, hogy a levegőbeáramlást minimalizáljuk. A lehűlési szakaszban a boksát összefüggő, szinte légmentes lezárást, így lassú lehűlést biztosító portakaró borítja (5. ábra).



6. ábra: Balról jobbra: a boksákba rakott fahasábok, félíg leszenesedett fahasábok a boksa lábazati részéről, teljesen leszenült fahasábok, a kohósításokhoz 25-50mm-esre tört, frakcionált faszén.

A boksákat fél-egy napos hűtés után bontottam ki, bennük a faszén hőmérséklete ekkor $250-300^{\circ}\text{C}$ körül volt. A lábazati részen a földtakaró és a le nem szenült fadarabok (6. ábra) elhordása után a faszénkupacot egy oldalra kihúzával legyező-szerűen szétterítettem, az esetlegesen beizzó részeket kevés vízzel belocsoltam. Pár óra elteltével a lehűlt nagy darabokból álló faszén töréssel és szitálással 6-25mm-es és 25-50mm-es frakciókba osztályoztam (6. ábra), amelyek aránya jellemzően kb. 1:3 lett szemben a kereskedelmi forgalomban kapható faszénre jellemző kb. 2:1 aránnyal.

4.3. Értékelés

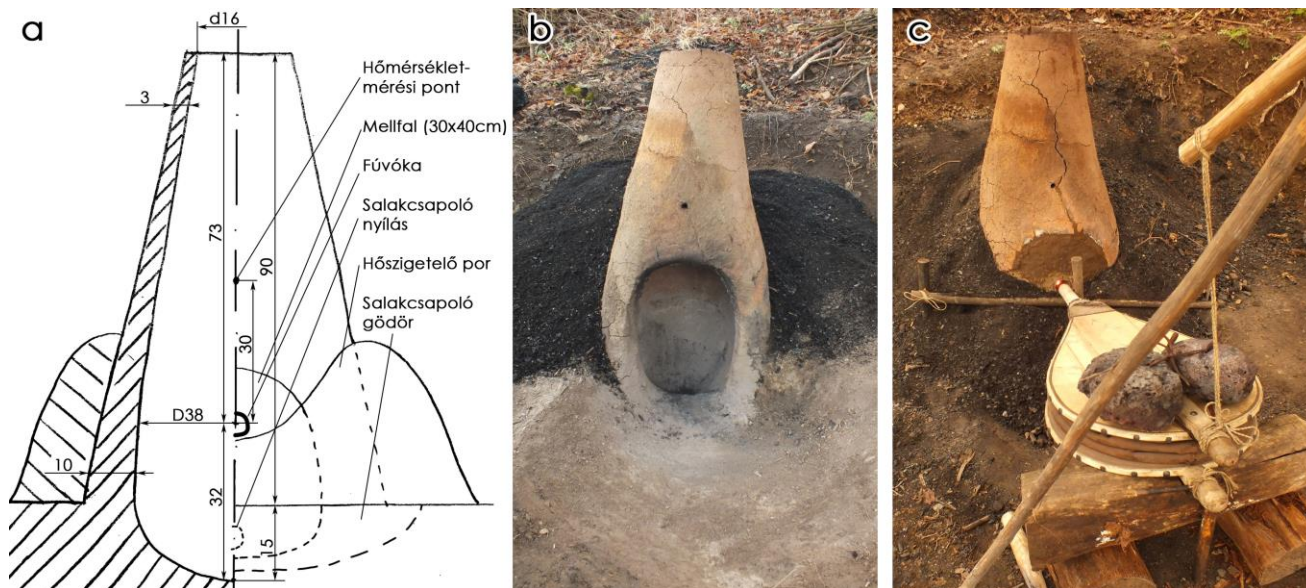
A faszénégető kísérletek pontos kihozatali és termelékenységi jellemzőit a 2. táblázat alsó fele foglalja össze. A boksában 197 ill. 396kg-nyi faszénét égettem, ez a felhasznált faanyag nedves térfogatára számítva mindkét boksánál hasonló, 146 ill. 160kg/m³-es kihozatali értéknek felel meg (ami a múlt század nagyméretű boksáira vonatkozó 150-170kg/m³-es adattal megegyező),⁵² és a kihozatal a faanyag abszolút száraz tömegére számolva is közel azonos.⁵³ Mindkét boksza lábazati részén maradt pár tíz kg-nyi le nem szenült faanyag, amely néhány %-os veszteséget jelentett. A termelékenységi jellemzőket illetően viszont nagyobb eltérések mutatkoznak, az 50 és 60 órás szenítési szakasz 3,9 ill. 6,6kg/ó (a bokásban óránként keletkező faszén tömege) termelékenységet jelent. A szenítési szakasz hossza, így a termelékenység a boksza földtakarójának részleges megbontásával (lábazati címer és füstnyílások) némileg szabályozható.⁵⁴

Mindezek alapján megállapítható, hogy a faszénkihozatal független a boksza méretétől, de a termelékenység a boksza méretének növelésével jelentősen javul.⁵⁵ A régészeti feltárásokon napvilágra került honfoglalás kori boksahelyek méretei alapján tehát a korabeli kisboksákban néhány mázsa faszén előállítására feltételezhető, ennyi faszén, mint később látni fogjuk, néhány kohósításra elegendő. A nagyobb kohókkal és vasbucákkal jellemezhető késő avar kori vaskohászatot tüzelőanyaggal ellátó boksák a jobb termelékenység érdekében feltételezhetően a honfoglalás kori boksáknál nagyobbak lehettek. A kísérleti eredmények alapján a jövőben esetlegesen előkerülő avar kori boksahelyek mérete alapján jól becsülhető lesz az előállított faszén mennyisége is.

5. Nagyméretű ékelt vasbucák készíttéstechnológiája

5.1. Kohósítások

A kohósításokhoz a nemeskéri 3-as kohó kissé karcsúbb másolatát építettem meg a száradási repedések csökkentése érdekében rövidre vágott fűszálakkal kevert agyagból⁵⁶, a medenceátmérőt 38cm-re, a kohó magasságát a medence aljától mérve 105cm-re alakítottam ki (7. ábra). A kohó homlokfalán a fúvóka felett 30cm-rel fűrt nyíláson keresztül termopáros hőmérsékletmérésre volt lehetőség. Lényeges, hogy a fúvóka a medence aljától 32cm-es magasságban helyezkedett el, így volt elegendő hely a fúvóka alatt a nagyméretű vasbuca kialakulásához. A szabadon álló kohót hátulról és oldalról kb. 30cm-es magasságig faszénporos földdel vettem körbe, amelynek funkciója a hőszigetelés volt. A kohó előtt kb. 50cm hosszú, 30cm széles, sekély salakcsapoló gödröt ástam. Szemben a műhelygödör oldalfalába beépített kisebb magyar kohókkal, a szabadon álló avar kohók sík területen is megépíthetők és ez a konstrukció, a kísérleti tapasztalatok alapján ugyanolyan tartósnak bizonyult.



7. ábra: A próbakohósításokhoz használt kohó. a) Főbb méretek hosszmetsetben. b) Előlnézet mellfal nélkül. c) Üzem közben bőrfújtatóval, mellfallal és hőszigetelő porral körbevett medencével.

Három kísérletet végeztem el,⁵⁷ mindhárom esetben granulált petesalmi vasérczel és 25-50mm-es szemcseméretű faszénal dolgozva. Az #1-es és a #2-es kohósítás során a levegőbefúvás centrifugál ventilátorral, a #3-as esetén kézzel működtetett, egykamrás bőrfújtatóval (szakaszos fújtatás) történt (7c. ábra), de a térfogatáram mindhárom esetben kb. 500 l/perc volt. A ventilátoros és a kézi bőrfújtatós fújtatás nem okoz lényeges technológiai különbségeket, de látni

⁵² VERES 2022, 245

⁵³ Amiből látható, hogy a kihozatal nem függött a felhasznált faanyag nedvességtartalmától.

⁵⁴ egy másik a 2024/1-es-hez hasonló kísérletben a szenítési szakaszban végig nyitott címerrel és korábbi bontással 6,4kg/ó termelékenységet sikerült elérni a kihozatal 132kg/m³-re csökkenése árán.

⁵⁵ Ezt alátámasztják a többi, itt nem részletezett kisboksás faszénégető kísérletek, és a nagyboksákra vonatkozó termelékenységi adatok is.

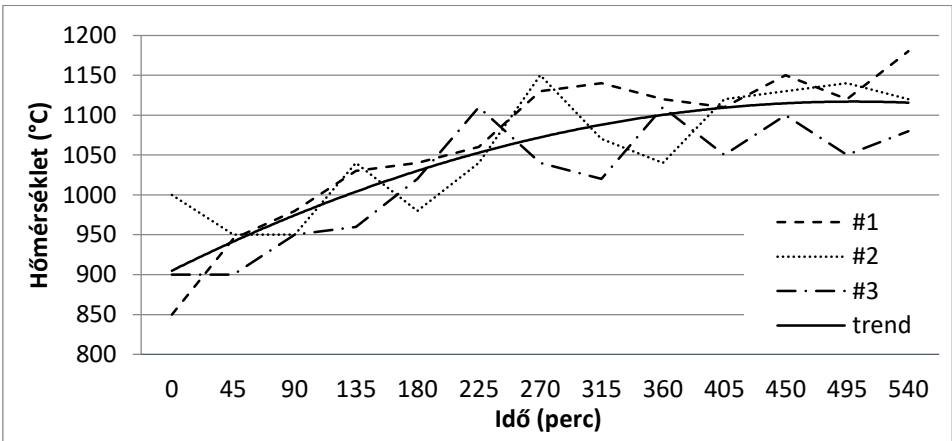
⁵⁶ Ahogyan ezen a kohóépítő youtube videón látható: <https://www.youtube.com/watch?v=JR2nENjWycA&t=6s>

⁵⁷ Az egyik kísérletről szóló youtube videó itt tekinthető meg: <https://www.youtube.com/watch?v=dNyvs-zCLSA>

kell, hogy a kohóba ténylegesen bejutó levegő mennyisége ennél kisebb (pl. a fúvókában esetlegesen fojtást okozó salak, a fúvóka és a fújtató csőre közötti hézag, stb. miatt). A granulákhoz felhasznált nedves vasérc tömege a kísérleteknél rendre 55, 50 és 50kg volt, ehhez kevertem kb. 25 tömeg %-nyi vizes oltottmeszet, ezek az előkészített granulák viszont már valamelyest szárazabb állapotban kerültek a kohóba (a száradás okozta tömegcsökkenés kb. 5%-os volt). A kísérletek során a granulákat 300g-os adagokban 300g faszénnel, azaz 1:1 tömegarányban kohósítottam összesen rendre kb. 78, 72 és 72kg faszén felhasználásával (a kohó előfűtésére kb. 12kg faszénre volt szükség). Mindezeket az adatokat ld. a 3. táblázatban.

3. Táblázat: A próbakohósítások adatai

Jellemzők			Kísérlet sorszáma		
			#1	#2	#3
Betétek	Vasérc (kg)		55	50	50
	Granula (kg)		63	60	60
	Faszén (25-50mm-es frakció) (kg)		78	72	72
	Granula : Faszén tömegarány		1 : 1		
	Levegő (l/perc)		kb. 500		
Időtartamok	Előfűtés		2 ó fa + 30p faszén		
	Adagolás		8 ó 30p	7 ó 45p	8 ó 20p
	6kg-os adagidők (perc)		48	47	49
	Lefűjtetés (perc)		30	30	40
Termékek	Vas (kg)	Buca az első tömörítés után (kg)	12,8	11,2	12,1
		Leesett vasdarabok (kg)	0,5	2,1	1,4
		Kipurgált, ékelt vasbuca (kg)	9,2	8,7	9,9
		Sűrűség (g/cm³)	5,1	4,9	5,2
		Befoglaló méretek (cm)	19x17x10	21x18x9	22x18x9
	Salak (kg)	Salakmedve	23,2	14,3	12,1
		Folyósalak	8,5	12,5	10,7
		Újraizzító salak	3,1	3,2	1,2
Kihozatal (%)	Tömörített bucára és vasdarabokra	Vasércre	24	27	27
		Granulára	21	22	23
	Kipurgált, ékelt vasbucára	Vasércre	17	17	20
		Granulára	15	14	17
	Kipurgált, ékelt vasbuca tömege az összes salakhoz		26	29	41



8. ábra: Hőmérsékletmérési eredmények

A kohósítás négy fő technológiai szakaszra bontható: előfűtés, adagolás, lefűjtetés és kohóbontás. Az előfűtés 2 órán keresztül fával és a kohó saját huzatával (levegőbeáramlás a fúvókán kívül a még nyitott salakcsapoló nyíláson is), 30 percig pedig már faszénnel feltöltve, fűjtetés mellett. Az adagolási szakasz folyamatos fűjtetés mellett kb. 8 órán keresztül tartott. A mellfal elé a fúvóka magasságáig ekkor szintén hőszigetelő por került. Az adagolási szakaszban 45 percenként végzett hőmérsékletmérési eredmények alapján látható, hogy a fúvóka feletti 30cm-es magasságban a hőmérséklet mindhárom kohósításnál hasonlóan alakult, kb. 900°C-ról indulva 1100°C környékén állandósult (ld. 8. ábra, átlagra illesztett polinom trendfüggvény). Mértem továbbá a 6kg-nyi granula beadagolásához szükséges időtartamot, amely átlagosan rendre 49, 47 és 48perc volt (40 és 55perces szélsőértékekkel), amelyből a faszén égési sebességére kb. 125g/perces érték adódik (korábbi kohósításoknál 6-25mm-es szemcseméretű faszén és kb. 250 liter/perces levegőtérfogatáram mellett a kisebb méretű égési zóna miatt a faszén égési sebessége ennek mindössze fele, harmada volt). Látható, hogy az azonos térfogatáramú levegőt biztosító ventilátoros és bőrfűjtatós kézi fűjtetés sem a hőmérsékletben, sem a faszén égési sebességében nem okozott lényeges eltérést (3. táblázat). Az adagolási szakasz addig tartott, míg az olvadt salak fel nem töltötte a

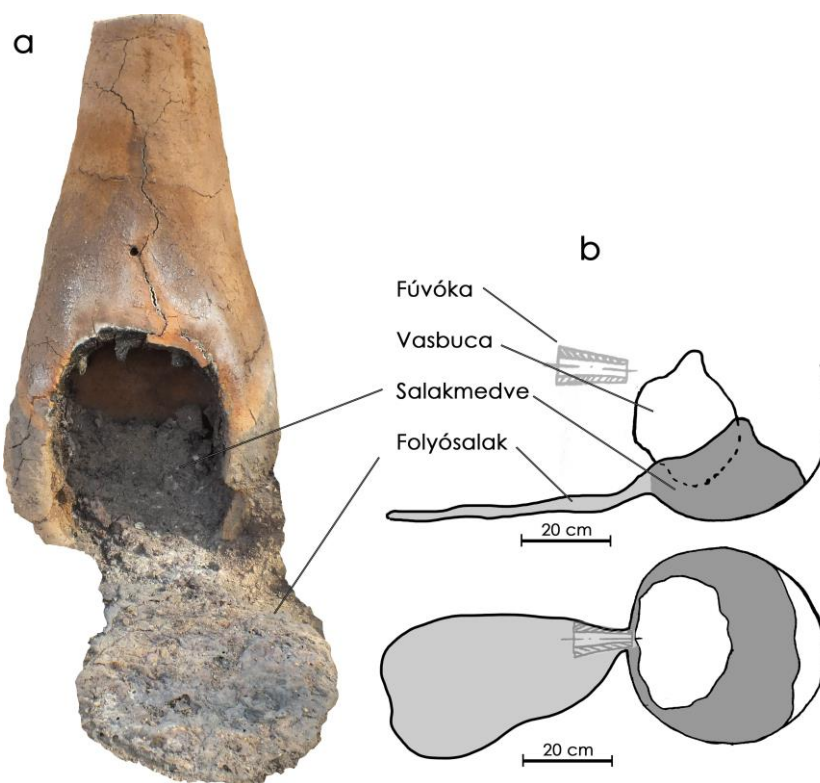
kohó medencéjét és szintje el nem érte a fúvóka alját, illetve a vasbuca a fúvóka elé, fölé nem kezdett növekedni.⁵⁸ A folyósalakot a kohósítás során mindvégig a kohóban tartottam elősegítendő a nagy méretű, tömör vasbuca kialakulását a korábban már elmagyarázott módon.

Az adagolási szakasz befejeztével az elegyoszlop lefűjtatása következett amelynek időtartama kb. fél óra volt. A kohósítások időtartam adatait a 3. táblázat mutatja.

A kohóbontás a mellfal előtti hőszigetelő por ellapátolásával kezdődött, majd a medencében felgyűlt folyósalakot a mellfal legalján ütött nyíláson keresztül a kohó előtt kialakított salakcsapoló gödörbe folyattam. Mivel a mellfal alja és a kohó medencéjének alja közel egy szintben volt, így a kohóban lévő összes olvadt állapotban lévő salak ki tudott folyni. Ezután a mellfal eltávolításával láthatóvá vált a vasbuca, amelyet a medence alján a falazathoz tapadó a szilárd salakmedve (kemencesalak) fészek alakban vesz körül (ld. 9. ábra). Ebből a fészekből kell a szilárd halmazállapotú, laza szerkezetű, salakos vasszivacsot felszakítani és kihúzni. A kohósítások során a kohóban kialakult vasbucák hozzávetőlegesen 30cm szélesek, 25cm magasak és befelé 20cm mélyek voltak.

Az izzó vasbucát a kohóból kihúzva farönkön fakalapáccsal a lehető legtömörebbre kalapálva kapjuk a kohósítás végtermékét, a tömörített vasbucát. A tömörítés közben a vasbuca laza vaskoronája rendszerint összetöredezve leesik, ezek a kisebb vasdarabok utólag összegyűjthetők (felhasználásukról később még lesz szó). Az egyes kísérletek során rendre 12,8, 11,2 és 12,1kg-os tömörített vasbucák keletkeztek, a leesett vasdarabok figyelembe vételével a vastermékek össztömege mindhárom kohósításnál 13,5kg körül alakult (3. táblázat). A vasbucák mindegyike jól tömöríthető volt, a kis foszfortartalmuknak köszönhetően melegtörékenysége nem jelentkezett, a tömörítés a legjobban a #3-as kísérlet bucájánál sikerült, a legkevesebb vasdarabka itt esett le. Az első, 12,8kg-os tömörített vasbuca vízkiszorításos elven történő sűrűségmérésével $4,3\text{g/cm}^3$ -es érték volt meghatározható.

A #2-es kísérlet másnapján a kibontott kohó előtt, a salakcsapoló gödörben megszilárdult folyósalak és a medencében maradt salakmedve látható a 9. ábrán. A kohók kitisztítása után mindegyik kísérletben megmértem a folyósalak és a salakmedve tömegét (ld. 3. táblázat).



9. ábra: a) Kibontott kohó a #2-es kísérlet másnapján: folyósalak a salakcsapoló gödörben és salakmedve a kohó medencéjében. b) Stilizált rajz a vasbuca és a salakmedve elhelyezkedéséről a kohóban és a kicsapolt folyósalakról.

5.2. Újraizzítás, ékelés

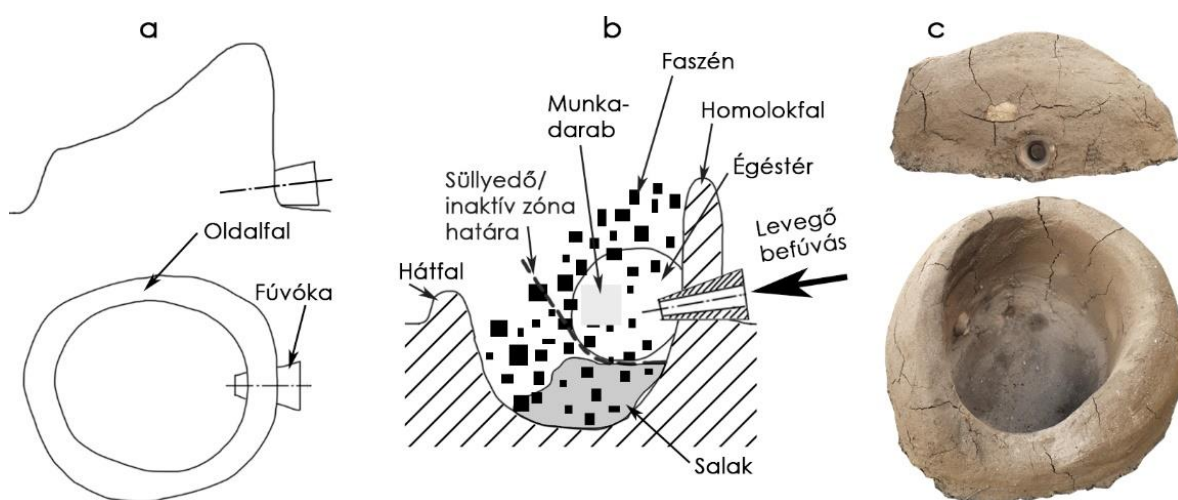
A tömörítés után a még vörösen izzó vasbuca újraizzítása következett az erre a célra kialakított újraizzító tűzhelyben, amely egy egyszerű, salakgödörös oldalszeles kovácstűhelynek tekinthető (ld. 10. ábra). A vasbuca itt néhány alkalommal újra felhevítve tovább tömöríthető faszerszámokkal. A fűjtatás két bőrfűjtatóval történik, hasonlóan a Hyllestad-i templom faragványán látható 12. századi kovácsábrázoláshoz.⁵⁹ Minden újraizzítás során a vasbucából salak folyik ki, amely a tűzhely medencéjében, a fúvóka alatt gyűlik össze. A tűzhely alján összegyűlt salak tömegét a kísérletek után szintén lemértem (3. táblázat). A vasbuca %-os vastartalma és sűrűsége az újraizzítások és tömörítések (purgálás) során így folyamatosan növekszik, tömege viszont csökken. Feltételezhetően a 9,3kg-os, 23x21x7cm befoglaló méretekkkel rendelkező petesmalmi ékelt vasbuca is több újraizzításon és tömörítésen esett át, mivel

⁵⁸ A salak magas szintje a fúvókán keresztül látható, a vasbuca mérete pedig kitapogatható egy a fúvókán át bedugott fapálcával.

⁵⁹ BARNDON 2005, 8, 3. ábra

sűrűsége kb. 5,1g/cm (saját mérés). A rekonstrukciós kísérletek során előállított kipurgált, ékelt vasbucák tömege rendre 9,1, 8,7 és 9,9kg, sűrűségük 5,1, 4,9 és 5,2g/cm³, befoglaló méretük 19x17x10, 21x18x9 és 22x18x9cm volt (3. táblázat), ezek tehát a petesalmi lelethez nagyon hasonló replikák lettek.⁶⁰ Egy ilyen vasbucát kb. 7kg-os, (7,9g/cm³-es elméleti sűrűségű) vastömbbé lehetne kovácsolni, ennyi a bennük lévő tiszta vas tömege.⁶¹

A korong alakúra tömörített vasbucák ékelését többszöri újraizzítással, kovácsfogóba fogott, kalapáccsal ütött laposvágó szerszámmal végeztem. Az ékelést a palástfelületről indítottam majd pár cm-es mélység után a homlokfelületeken, két oldalról folytattam a bevágást, igyekezve párhuzamosan haladni. Ennek a két oldalról történő ékelési, vágási technikának a nyomai a petesalmi bucánál is jól láthatók. Az ékelést az átmérő 2/3 – 3/4 részénél fejeztem be. A nagyméretű régészeti bucánál is megfigyelhető mély ékelés⁶² feltételezhető funkciója (szemben a korábbi minőségellenőrzéssel és szállíthatósággal összefüggő feltételezésekkel)⁶³ a későbbi kovácmunka megkezdése előtti félbetörhetőség (akár hidegen is egy vasékkal), a felek könnyebb felhevítése és átkovácsolása érdekében. A #2- és a #3-as kísérletben az újraizzítás és ékelés időtartama kb. 1óra 15perc volt, faszénigénye kb. 20kg, az #1-es kísérletben viszont szobahőmérsékletre visszahűlt tömörített bucából indulva 3 órára és 45kg faszénre volt szükség (ebből látható, hogy az újraizzítást célszerű még meleg állapotban azonnal megkezdeni). A rekonstrukciós kísérletek során kapott ékelt vasbucákat a 11. ábra mutatja.



10. ábra: Újraizzító tűzhely. a) Oldal- és felülnézeti vázlat. b) A tűzhely metallurgiai zónái és főbb részei hosszmetsetben. c) Fotók elől- és felülnézeten.



11. ábra: Az #1, #2 és #3 rekonstrukciós kísérletek során készített 9,2, 8,7 és 9,9kg-os ékelt vasbucák sorban felül- és előlnézeten, 20cm-es léptékkel.

⁶⁰ A két Zalavári késő avar kori 10,2 és 10,5kg-os buca nagyobb, 24x20x11 és 26x20x10cm-es befoglaló méreteik alapján feltételezhetően kisebb sűrűségűek (sűrűségmérés korábban ezeken nem történt) és csak egy tömörítést kaphattak, ékelésüket pedig közvetlenül az első tömörítés után elvégezték.

⁶¹ A korábbi kísérleti tapasztalatok alapján vastömb és a kipurgált, faszerszámokkal betömörtített állapothoz képest kb. 25%-os tömegvesztés jelentkezik.

⁶² PLEINER 2000, 134, 65. ábra, SOUCHOPOVA–STRANSKY 2008, 62, 29. ábra

⁶³ TÖRÖK et al. 2017

5.3. A kísérleti eredmények értékelése

A kihozatal értékelése kapcsán mindenekelőtt tekintsük az egyes kohósítások során keletkezett salak mennyiségét (3. táblázat). A legnagyobb mennyiségű salak az #1-es kohósításnál keletkezett, összesen közel 35kg, a másik két kísérletben viszont csak 30, ill. 24kg. Az eltérések oka feltételezhetően egyrészt az, hogy az #1 kohósításnál felhasznált kereskedelmi forgalomban kapható faszénből frakcionált faszén nedvesebb volt (a másik két kohósítást a saját égetésű faszénnel végeztem), másrészt itt 10%-kal több vasércet kohósítottam, harmadrészt pedig a megfigyelések alapján az másik két kísérletben a kohó falzatából (főleg a mellfalzatból és a mellfalzat fölötti homlokfalzatból) nagyobb mennyiség olvadt le és salakult el. Ha a kipurgált, ékelt vasbucák tömegét az összes salakhoz viszonyítjuk, akkor rendre 26, 29, ill. az utolsó, bőrfújtatós kézi fújtatós kísérletre kiemelkedően jó, 41%-os értéket kapunk, amelynek oka feltételezhetően a szakaszos fújtatás mellett a levegőbeszívás során a kohóban kialakuló redukálóbb atmoszféra.⁶⁴

A kihozatalt tovább elemezve érdemes még kiszámolni a tömörített ill. kipurgált vasbuca esetén a felhasznált vasércre ill. granulára számolt kihozatalokat, amelyek az #1 és #2 kísérletekre közel azonosak, a #3-asra pedig valamivel jobbak (3. táblázat). A kihozatali jellemzők közül a leggyakrabban a tömörített vasbuca és leesett vasdarabok együttes tömegét a felhasznált vasérchez viszonyító arányszámot szokás megadni, amely az egyes kísérleteknél rendre 24, 27 és 27% lett. Ezeket a korábbi, 2-4kg-os vasbucákat adó, a petesalmi vasércet „natúrban” kohósító kísérletek során elért kb. 25-35%-os kihozatali értékekkel összevetve látható, hogy azoknál nem sokkal kisebbek, a különbség oka, hogy az alulredukálódást elősegítő granulációs technika mellett több vas kerül a salakba, ez pedig csökkenti a vaskihozatalt. A kihozatal szárított granulák esetén várhatóan nagyobb lett volna.

Érdemes még meghatározni, hogy a vasércben lévő elemi vasra számolt vastartalom figyelembevételével hogyan alakul a vaskihozatal. A felhasznált kb. 50kg nedves petesalmi vasérc száraz állapotban (a szárítási kísérlet alapján) kb. 43kg lenne, ebben pedig (a vegyelemzés alapján) kb. 25kg az elemi vastartalom, a vasbucákban lévő vas tömege kb. 7kg, így a vaskihozatalra kb. 28%-os érték adódik. Ez azt is jelenti, hogy a többi, mintegy 72%-nyi vas a salakba került, ami jól mutatja a középkori bucavaskohászat technológiai korlátait a későbbi nagyolvasztós nyervasgyártással szemben, ahol az érc vastartalma közel teljes egészében kinyerhető és a salak csupán néhány százalékos mennyiségben tartalmaz vasat.

5.4. Újrahasznosítás – vasdarabok összehegesztése nagyobb vasbucává

A vasbuca tömörítése során leeső (kohósításonként nagyságrendileg néhány kg-nyi) apróbb vasdarabokat, de akár a nagy foszfortartalom miatt darabokra törő vasbuca nagyobb darabjait is összegyűjtve lehetséges azok újbóli összehegesztése egy nagyméretű, akár a petesalmihoz hasonlóan nagy vasbucává. Bár végeztünk ilyen kísérleteket is, ezekről terjedelmi okok miatt itt nincs lehetőség részletesen beszámolni. Ennek az újrahasznosító technikának a lényege, hogy az újraizzító tűzhelyben (salagödrös, oldalszeles kovácstűzhelyben, amely tk. egy akna nélküli bucakemencének felel meg) egy kohósításhoz hasonlóan felváltva adagoljuk a faszenet és a vasdarabokat, amelyekből a fúvóka alatt egy tömör vasbuca áll össze. A vasbuca mérete növelhető, ha a vasdarabok mellett folyósalak töredékeket is adagolunk, amely megolvadva feltölti a medencét, onnan kiszorítja faszenet és helyet biztosít a növekvő vasbuca mélyre süllyedésének. Az eljárás során ráadásul a melegtörékenységet okozó nagy foszfortartalom is csökken, így az újonnan összeálló vasbuca már kovácsolható.⁶⁵ Ilyen tűzhelyek nyomai, salakkal feltöltődött, 20-30cm átmérőjű, 10-15cm mély gödröcskék (amelyek feltételezhetően inkább kisebb-nagyobb bucavas darabok összehegesztésére, nem pedig a tömörített vasbucák újraizzítására szolgáltak)⁶⁶ jól megfigyelhetők voltak kissé távolabb, elkülönülve a kohóktól, mintegy külön üzemeget alkotva a kaposvár-kisvánpusztai avar kohótelepen.⁶⁷ Szintén hasonló salagödröket találtak a horvátországi drávamelléki avar kori vaskohászati műhelyek régészeti feltárásain.⁶⁸

Hasonló technikával természetesen kisebb méretű, pár kg-os tömörített vasbucák összehegesztése is lehetséges a petesalmihoz hasonlóan nagyméretű vasbucává („bucamáglyának” elnevezett technika),⁶⁹ ahogyan ezt korábban is feltételezték,⁷⁰ ill. a technikát leírták.⁷¹ Ilyenkor a különálló, tömörített vasbucákat szorosan egymás mellett helyezzük el a kovácstűz égésterének alsó részén a fúvóka előtt-alatt, ezek a bucák pedig a kovácshégesztési hőmérséklet elérésekor a saját súlyuknál fogva egymáshoz hegednek. Ez az eljárás azonban nagy faszén-, idő- és munkaigénye miatt gazdaságtalan és a kovácsoláshoz egyébként megfelelő méretű néhány kg-os vasbucák egy nagy vasbucává hegesztése, majd ismételt feldarabolása, félbevágása technológia szempontokból is indokolatlan.

⁶⁴ Azaz az érc alulredukálódása itt kisebb, de a nagyméretű vasbuca kialakulásának még továbbra is kedvező mértékű volt.

⁶⁵ erről itt tekinthető meg egy youtube videó: <https://www.youtube.com/watch?v=pTvBwjBvuGM>

⁶⁶ A vasbucák újraizzítására szolgáló újraizzító tűzhelyek salakkal való teljes feltöltődése a kísérleti tapasztalatok alapján nem jellemző, ill. a vasbucák újraizzítását a korábban leírt módon célszerű a tömörítést követően azonnal, még melegen, így a kohó közelében megkezdeni.

⁶⁷ Gallina Zsolt 2022. május 2-4., 31. facebook posztjaiban szereplő ásatási fotók, valamint Gallina Zsolt a Magyar Nemzeti Múzeum Könyvtárában 2022. februárban az MTA VAB Iparrégészeti és Archeometriai munkabizottsága és a 2023. decemberben a Hadak Útján konferencia sorozaton tartott előadása alapján. „Újraizzító centrum” helyett talán helyesebb a kohótelepnek ezt a részét „újrahasznosító centrumnak” nevezni.

⁶⁸ Tena Karavidović horvát régész szíves szóbeli közlése és ásatási fotói alapján

⁶⁹ erről ld. ezt a youtube videót: <https://www.youtube.com/watch?v=0GpHU572pro>

⁷⁰ TÖRÖK et al. 2018

⁷¹ GALLINA et al 2024

6. Következtetések

Egy szabadon álló, 38cm-es medenceátmérőjű, átlagos avar kohó másolatában elvégzett kísérletek során 50kg nagy vastartamú petesalmi gypvasérc granulációs technikával történő kohósításával, 20-50mm szemcseméretű faszénnel, 500 liter/perces levegő térfogatárral dolgozva (az érc alulredukálásával keletkező nagy mennyiségű, híg folyós salak és a nagy szemcseméretű betétanyagokkal megnövelt égési zónának köszönhetően), 11-13kg-os tömörített vascucákat lehetett kapni. Ezekből további újraizzítások (purgálás) és ékelés során 8,7-9,9kg-os ékelt vascucák voltak előállíthatók, amelyekből kb. 7kg-os vastömb lenne kikovácsolható (tisztaság). Ezek alapján az avar kori kohótelepek régészeti feltárásain napvilágra került 35-50cm-es átmérőjű kohókban is lehetséges volt ilyen nagyobb (pl. a petesalmi 9,3kg-os bucálelethez hasonló méretű), 10kg körüli tömegű vascucák előállítása⁷². Egy ilyen kohósításhoz és az azt követő újraizzításokhoz összesen kb. 100kg faszénre volt szükség, ehhez pedig kb. 2/3m³-nyi faanyag kellett, egy kohósításra egy teljes, 12 órás munkanapot lehet számolni és két ember munkáját igényli (egy fűjtat, egy az adagolást végzi). Ehhez adódtak hozzá az egyéb kapcsolódó tevékenységek, pl. vasércbányászat, -pörkölés, -aprítás, faszénégetés, kohó előkészítése újabb kohósításra,⁷³ stb. jóval hosszabb munkaidőigényei.

Mindezek alapján az avar kori vaskohászat munkaszervezése jelentősen eltérhetett a későbbi, honfoglalás és Árpád-kori magyar vaskohászatra jellemzőtől. Az ebben az írásban bemutatott avar kori vaskohászat és a korábbi években elvégzett honfoglalás kori vaskohászat rekonstrukciós kísérleteinek eredményeit összehasonlítva feltételezhető, hogy bár az avar korra jellemző nagyobb méretű, egyesével vagy párosával szabadon álló kohókban több vasérc és több faszén felhasználásával, hosszabb, egy teljes munkanapot igénylő kohósítások során nagyobb méretű vascucákat állítottak elő, a magyarok a műhelygödörök oldalfalában kialakított több kisebb kohóban párhuzamosan dolgozva, egymást (a rövidebb kihűlési idő miatt) gyorsabban követő és rövidebb kohósítások során sok kisebb vascucát előállítva összességében akár nagyobb napi vastermelést is elérhettek egy-egy kohótelepen.⁷⁴

Köszönetnyilvánítás

Az avar kori vaskohászat rekonstrukciós kísérleteihez nyújtott segítségért, szóbeli tanácsokért, együttműködésért köszönet illeti a régészeket, Gallina Zsoltot és az Ásatárs Kft.-t, Gömöri Jánost, Költő Lászlót és Tena Karavidović-t, a kohómérnök kollégákat, Bocz Andrást, Fehér Andrást, Hári Lászlót és Török Bélát, továbbá a bemutatott kísérletekben való részvételért Buti Zoltánt, Lakatos Leventét, Mina Évát, Mina Zsoltot és Papp Istvánt.

Irodalom:

- ÁGH–GÖMÖRI 1999 Ágh J., Gömöri J.: Investigation of materials from the Somogyfajsz workshop, In: Traditions and Innovations in the Early Medieval Iron Production, Hagyományok és újítások a korai középkori vaskohászatban, (Ed, Gömöri János) Dunaferr, Sopron-Somogyfajsz, 1999, 192-198.
- BARNDON 2005 Barndon R.: Sparks of Life The Concept of Fire in Iron Working, Current Swedish Archaeology Vol. 13, 1-19
- BRENKO et al. 2022 Brenko T., Karavidovic T., Borojević Šoštarić S., Sekelj Ivančan T.: The contribution of geochemical and mineralogical characterization of iron slags in provenance studies in the Podravina region, NE Croatia, Geologia Croatica 75(1):165-176, 2022
- CZÖVEK 2010 Czövek A: Avar kori kohótelep Bátaszék határában. WMMÉ 32. (2010), 213–241.
- EMRICH 1985 Emrich W.: Handbook of charcoal making, Solar Energy R&D in the European Community. Series E, Energy from biomass. 1985
- GALLINA 2007 Gallina Zs., Hornok P., Somogyi K.: Előzetes jelentés a Zamárdi, Zamárdit elkerülő 65101. sz. út 89.,58/a.58/b., 56. lelőhelyeinek feltárásáról. Somogyi Múzeumok Közleményei 17/A (2007), 153–168.
- GALLINA 2002 Gallina Zs.: Avar kori kohótelep Kaposvár-Fézerlakon. Somogyi Múzeumok Közleményei 15 (2002), 75–85.
- GALLINA 2011 Gallina Zs.: Avar kori vaskohászati és települési centrum Zamárdiban. In: Somogyvári, A. – Székely, V.Gy. eds., A Barbaricum ösvényein. Archeologia Cumanica 1, Kecskemét: Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat Katona József Múzeuma, 2011, 179–198.
- GALLINA 2018 Gallina Zs.: Vas és acél országa - az avar vasművesség virtuális rekonstrukciója, Poszter, Hadak Útján: a Népvándorlaskor fiatal kutatóinak XXVII. konferenciája, Mosonmagyaróvár, 2018
- GALLINA–TÖRÖK 2018 Gallina Zs., Török B.: Az avar kori vasművesség munkafolyamatai, korabeli mesterségei, Két világ határán. Szerk.: Varga Máté – Szentpéteri József, Kaposvár, 2018, 61–75
- GALLINA et al. 2023 Gallina Zs., Gulyás Gy., Török B.: Újraizzítva és újrajátszva... (Európa egyik legnagyobb feltárt vasműves telepe Kaposvár-Ipari Parkban, poszter, Sötét Idők Mesterei - régészeti konferencia, Debrecen, 2023. október 5-6.
- GÖMÖRI 1978 Gömöri J.: Jelentés a nyugat-magyarországi vasvidék Győr-Sopron megyei lelőhelyeinek kutatásáról, Arrabona 19-20, (1978), 109-158
- GÖMÖRI 2000a Gömöri J.: Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannoniában. Magyarország iparrégészeti lelőhelykatasztere I. Vasművesség. The archaeometallurgical Sites in Pannonia from the Avar and Early Árpád Period, 2000
- GÖMÖRI 2000b Gömöri J.: Az avar kori és X-XI. századi vaskohászat régészeti emlékei Somogy megyében. The archaeometallurgical sites of county Somogy in the Avar and early Árpád-period. Somogy Megyei Múzeumok Közleményei 14. (2000), 163-218.
- GÖMÖRI 2012 Gömöri J.: A pannóniai római kori vaskohászat továbbélésének kérdése. A Sopron-Deák téri, Árpád-kori vasolvasztó műhelyek. In: Vida, T. ed., Thesaurus Avarorum, Budapest: ELTE, MNM, MTA, (2012), 25–36

⁷² A 38cm-es medenceátmérőjű kísérleti kohónál még nagyobb, akár 45-50cm medenceátmérőjű avar kohókat feltételezem, hogy nem a még nagyobb, 10-15kg feletti tömegű tömörített vascucák előállítása érdekében, hanem inkább a kohó kisebb károsodása érdekében építették tágasabbra. A kohósítás során ugyanis a fúvóka síkjában a kohó belső falazatára jellemzően két oldalon vastagon feltapadó (onnan később a falazat károsodása mellett levésendő) salak mennyisége csökkenthető, ha a kohó falazatát az égési zónától az inaktív zóna faszene választja el (ahogyan a hátsó falazatot is).

⁷³ Amely a nagyobb avar kohók esetén meglévő hosszabb lehűlési idő miatt nem kezdhető meg a kohósítást követően azonnal, hanem csak másnap, szemben a kisebb honfoglalás és Árpád-kori kohókkal.

⁷⁴ „A kevesebb több” elven hasonló munkaszervezést fogalmazott meg Gallina Zsolt a kísérleti eredmények alapján szóban, beszélgetéseink során.

GÖMÖRI 2018 Gömöri J.: Technológia-kontinuitási kérdések a somogyi vasvidék „izzó” vasbucái fényében, Két világ határán. Szerk.: Varga Máté – Szentpéteri József, Kaposvár, 2018, 77–87

HECKENAST et al. 1968 Heckenast G., Nováki Gy., Vastagh G., Zoltay E.: A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban. Budapest, 1968

IVANCAN 2021 Sekelj Ivančan T.: The Archaeological Remains of Settlement at Sites with Smelting Workshop Features in the Podravina Region (Croatian Drava River Basin), in: Interdisciplinary Research into Iron Metallurgy along the Drava River in Croatia – The TransFER Project, eds: Tajana Sekelj Ivančan and Tena Karavidović, 2021

KERCSMÁR–THIELE 2015 Kercksmár Zs; Thiele Á.: A belső-somogyi gypvasércek genetikája és geokémiai jellemzői, földtani és archeometallurgiai megközelítés alapján / Genetic types and geochemistry of bog iron ore deposits from Inner Somogy, from a geological and archaeometallurgical perspective, Földtani Közlemények 142(1), 2015, 53-71

KÖLTŐ 1999 Költő L.: Korai vaskohászati lelőhelyek kutatása. Múzeumi tájékoztató (Somogy Megyei Múzeumok Igazgatósága), 1999/3-4, 18-21

PIASOWSKI 1989 Piaskowski J.: Phosphorus in Iron Ore and Slag, and in Bloomery Iron, Archaeomaterials 3, 1989, 47-59

PLEINER 2000 Pleiner R.: Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters, 2000, Praha

SOUCHOPOVA–STRANSKY 2008 Souchopova V., Stransky K.: Secret of early iron – The archaeometallurgy under the microscope, Technické muzeum v Brně, 2008, ISBN 978-80-86413-54-9

THIELE–DÉVÉNYI 2011 Thiele Á., Dévényi L.: Rekonstrukciós kísérletek a 10. századi fajszi típusú bucakemencében, In: Dr. Csibi Venczel-J (Ed.) OGÉT 2011 – XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Csíksomlyó, Románia, 2011.04.28-2011.05.01. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2011, 364-367

THIELE 2011 Thiele Á.: Az ércről a vastárgyig - a bucavaskohászat metallurgiája, Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 144(1), 2011, 2-5

Thiele et al. 2012 Thiele Á., Török B., Költő L.: Energy dispersive X-ray analysis (SEM-EDS) on slag samples from medieval bloomery workshops – the role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron in Somogy County, Hungary, Proceedings of the 39th International Symposium on Archaeometry, Leuven, 2012, 102-112

THIELE 2015 Thiele Á.: A foszfor szerepe a vas archeometallurgiájában - a Somogyban folyó avar és honfoglalás kori vaskohásztól kezdve a korabeli damaszkolt pengéig, Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 148(6), 2015, 6-8

THIELE et al. 2015 Thiele Á., Hošek J., Kucypera P., Dévényi L.: The role of pattern-welding in historical swords – mechanical testing of materials used in their manufacture, Archaeometry 57(4), 2015, 720-739

THIELE 2018 Thiele Á.: The manufacturing technology of a pattern-welded knife from Kobilić (Republic of Croatia), Archeologické rozhledy LXX–2018, 2018, 457-467

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

TÖRÖK 2010 Török Béla: Archeometallurgia, a múlt kohászata, a jelen műszaki vizsgálataival, a jövő régészettudományáért. Gesta IX (2010) 25-29.

TÖRÖK 2011 Török Béla: Vasérc, vasbuca, vastárgy. Az első magyar vaskohászok műhelyei a Kárpát-medencében. Bányászattörténeti Közlemények XII/VI. évf. 2 (2011) 3–29.

TÖRÖK et al. 2015 Török B., Kovács Á., Gallina, Zs.: Ironmetallurgy of the Pannonian Avars of the 7–9th century based on excavations and material examinations. Der Anschnitt – Beiheft 26, 2015, 229–237.

TÖRÖK et al. 2017 Török B., Barkócy P., Kovács Á., Költő L., Fehér A., Szőke B. M.: A comparative archaeometric study of early medieval split blooms from Pannonia, Poszter, CPSA conference Prague, 30 May - 1 June 2017

TÖRÖK et al. 2018a Török B., Barkócy P., Kovács Á., Költő L., Fehér A., Szőke B. M.: Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata, BKL Kohászat 2018 151/3, pp. 1-4

TÖRÖK et al. 2018b Török B., Gallina Zs., Kovács Á., Kristály F.: Early medieval iron bloomery centre at Zamárdi (Hungary): Complex archaeometrical examinations of the slags, Archeologické rozhledy, 70(3), 2018, 404-420

VERES 2022 Veres G.: A Bükki faszénégetés a 20. század utolsó évtizedében. ACTA Universitatis, Sectio Historiae, Tom. XLIX. pp. 2022, 235-247.

VEGA et al. 2003 Vega E., Dillmann P., Lheritier M., Fluzin P., Crew P., Benoit P.: Forging of Phosphoric Iron. An Analytical and Experimental Approach. In Archaeometallurgy in Europe, Vol. II, Milan, 2003, 337-346