

Próbakohósítások a nemeskéri típusú szabadon álló avar kohóval

2023. augusztus

Bevezetés - problémafelvetés, célok

Számos avar kori kohótelep iparrégészeti feltárása alapján elmondható, hogy az avar kori vaskohászok kohói némileg nagyobb méretűek (kb. kétszeres belső térfogatúak) voltak, mint a későbbi, Árpád-korra jellemző magyar kohók. Az avar kohók önmagukban, vagy párosával épültek, részben vagy teljesen szabadon állók voltak, az árpád-kori magyarok pedig egy műhelygödör oldalfalába beásva alakítottak ki több kisebb kohót. Korábban több rekonstrukciós kísérletet végeztünk már el a honfoglalás- és az Árpád-korra jellemző beépített bucakohókkal (jellemző fúvósíkbeli átmérő kb. 30 cm, magasság a fúvósík felett kb. 70 cm, alatta kb. 30 cm). Kísérleteink során ezekben a kohókban legfeljebb 3-4kg-os vasbucákat tudtunk előállítani (ez az első tömörítés utáni tömeg, a tömörített buca ilyenkor kb. 4 g/cm³-es sűrűségű). A késő avar korból viszont ismertek kb. 10 kg-os (faszerszámokkal teljesen betömörített, kb. 6 g/cm³-es sűrűségű), ún. ékelt vasbucák, egy Petesmalomról, kettő pedig Zalavárról. Kérdésként vetődik fel, hogy ezek a nagy bucák hogyan készülhettek? Egyetlen kohósítás eredményei-e vagy esetleg több vasbucából lettek összeállítva?

Az elmúlt két évben kísérleteket végeztünk arra vonatkozóan, hogy miképpen hegeszthetők össze és készíthető el kisebb vasbucákból egy nagyobb méretű ékelt vasbuca, és megállítottuk, hogy az oldalszeles kovácstűzbe megfelelően elhelyezett különálló vasbucák pusztán a súlyuknál fogva képesek egymáshoz hegedni (azaz nem a klasszikus, alakítással járó kovácshegesztésről, hanem inkább egyfajta diffúziós hegedésről van szó), tehát kisebb vasdarabok, vagy nagyobb tömörített vasbucák felhasználásával felépíthető a kívánt méretű nagy buca. Az ide vonatkozó kísérletekről beszámoló itt: <http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/egyeb/2021-11-21-Bucam%C3%A1glya1.pdf>, és itt: <http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/egyeb/2022-05-06-Bucam%C3%A1glya2%20-%20welding%20pit%20experiment.pdf>, Youtube videó itt: https://youtu.be/0GpHU572pro?si=DBWzSCCYmv3CC_og, és <https://youtu.be/pTvBwjBvuGM?si=gqG9qFL7wgaWwLLZ>

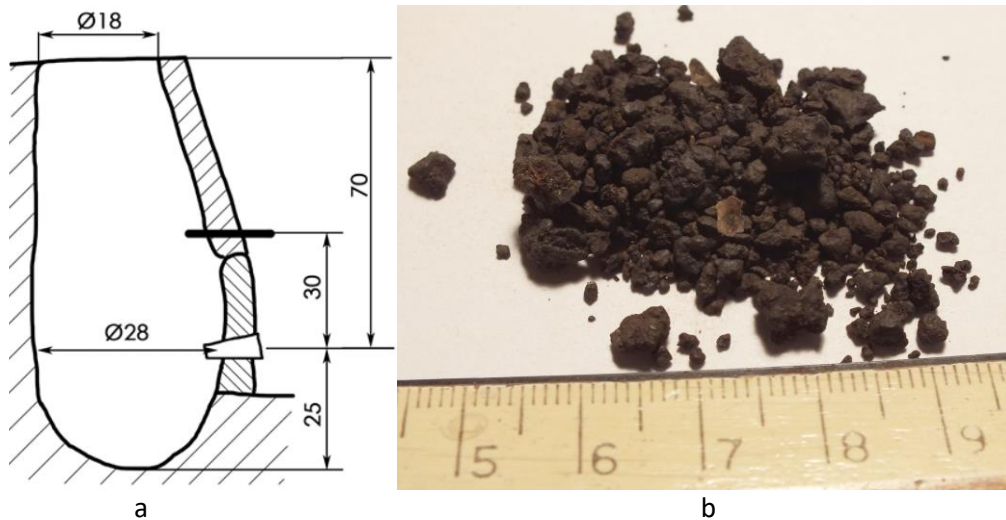
A másik lehetőség szerint a kb. 10 kg-os, faszerszámokkal teljesen betömörített ékelt vasbucák egyetlen kohósításból származnak. Ehhez feltételezhetően egy akkora vasbucát kellett nyerni, amelynek tömege az első tömörítés után legalább 15 kg volt (a további tömörítések során a vasbuca tömege csökken). Azért, hogy lássuk, vajon lehetséges-e ekkora vasbuca előállítása az avar kori vaskohászatra jellemző technológiai színvonalon, a nemeskéri szabadon álló avar kohó másolatát (amelyhez egyébként méretben nagyon hasonló avar kohó került elő Magyaratádon is) építettük meg (jellemző fúvósíkbeli átmérő 43 cm, magasság a fúvósík felett 75 cm, alatta 25 cm), és végeztünk el benne több olyan próbakohósítást, amelynek célja a minél nagyobb méretű vasbuca előállítása volt.

A kohósítások során a történelmi hitelességre törekedve a Petesmalmi Vidrapark egyik halastavából származó gyevasércet kohósítottuk (a tóparton korábban avar kohók maradványait tárták fel, és ebből a tóból való az egyik nagy ékelt avar buca is). Erről a vasérclelőhelyről részletes beszámoló itt: <http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/egyeb/2021-12-15-Gyepvasercinhomogenitas.pdf>, Youtube videó itt: <https://youtu.be/ZQtUuwsnX0?si=Cj4nQFtLpVzszFUX>, és <https://youtu.be/GLNxy30HCSQ?si=bbwnZkRZwvJTeHF5>

Kísérleti előzmények

A petesmalmi gyevasércet kb. száz alkalommal kohósítottuk már a fajszi típusú beépített kohóban, amelynek főbb méretei az 1a ábrán láthatók. A petesmalmi vasérc nagy előnye, hogy nagy vastartalmú, korlátlan mennyiségben áll rendelkezésre és könnyen gyűjthető, nagyon alkalmas a kísérletezgetésekhez. A petesmalmi gyevasérc szemcsemérete apró, 0-15mm-es frakcióból áll, de jellemzően ennek is bő 2/3-ad része 4mm alatti szemcseméretű (ld. 1b ábra). Ez a gyevasérc valószínűleg biogén gyevasérc lencsék áthalmozódásával került a Rinya-patak korábbi árterére, amire jelenleg egy völgyzárógátas halastavat duzzasztottak (a telente pár hétre lehalászás miatt leeresztik, ilyenkor lehet összelapátolni az agyagos tófenékről a gyevasércet, amely kb. 1,5ha-os területet 5-20cm-es rétegvastagságban borít). A vasérc jellemző kémiai összetétele: 80% Fe₂O₃, 7% P₂O₅, 6% SiO₂, 3% CaO, 2% MnO, 2% egyéb, tehát ez egy alapvetően nagy vastartalmú érc, amelyben viszont sajnos nagyon sok foszfor is van (a foszfor bekerülve a vasfázisba törékennyé teszi azt, a kapott vasbucák emiatt gyakran összetörnek már az első tömörítés során). A korábbi próbakohósítások során három fő probléma volt ezzel az érccel:

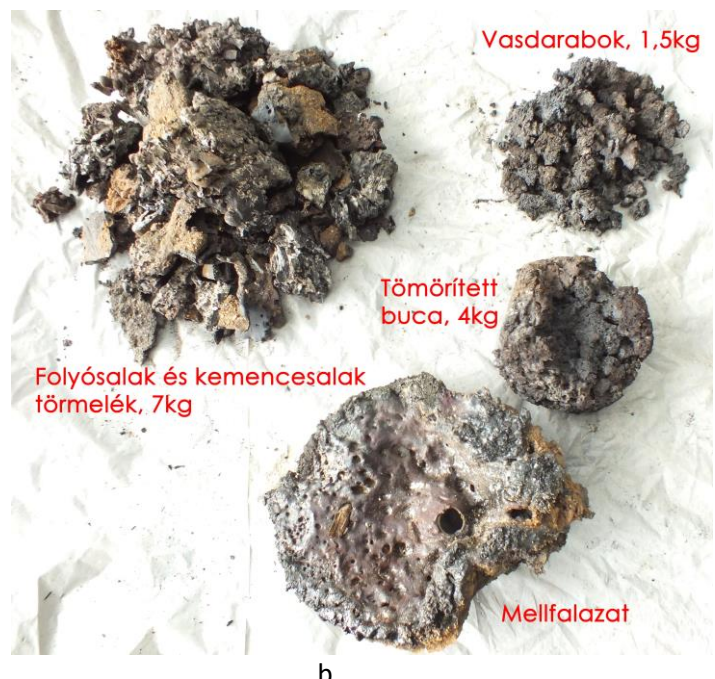
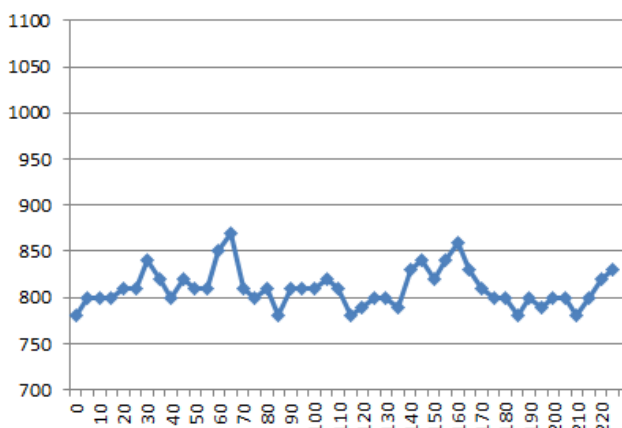
- gyakran tapasztaltuk a nagy foszfortartamú vasbucák melegtörékenységet,
- az apró szemcseméret miatt az érc a nagyobb szemcseméretű faszén között könnyen átpergett és nem növelte a vasbucát,
- kevés salak keletkezett, a kapott vasbucák „szárazak” voltak, nehezen lehetett őket tömöríteni



1. Ábra: a) A korábbi próbakohósításokhoz használt fajszi típusú, beépített kohó főbb méretei (a fúvóka fölött 30cm-rel termopár a hőmérsékletmérésekhez). b) Gyepvasérc a Petesalmi Vidraparkból.

Az avar kohós kísérleteket megelőzően elvégeztem egy előkísérletet a szokásos fajszi kohóban a petesalmi vasércet kohósítva úgy, hogy egy kevés homokot (közönséges sárga bányahomok egy játszótéri homokozóból) adtam az érchez salakképzőnek, így próbálva a három említett probléma közül az utolsót orvosolni (az elsőre, a melegtörékenység elkerülésére jó megoldás az apró szemű döglöttmész, azaz mészkő beadagolása, ezzel általában jó bucákat, esetleg kissé szárazakat kaptunk). Ebben az előkísérletben minél nagyobb méretű vasbuca előállítás volt a cél, ezt a fúvóka előtt kialakuló égéstér (ez az a zóna, ahol az atmoszféra még elegendően oxidáló ahhoz, hogy a faszén elégjen) megnövelésével lehet elérni, amely így nagyobb bucát képes magába foglalni. Az égéstér növelése érdekében a kohósításhoz használt faszén szemcsemérete a szokásos 6-25mm vagy 6-40mm-es frakcióhoz képest 25-40mm-es volt, a befújt levegő mennyisége pedig 250 l/perc (a szokásos centrifugál ventilátor 3-as fokozata, ami egy közepes intenzitású kézi fújtatásnak felel meg). Összesen 20kg vasércet kohósítottam 1:1 arányban faszénnel (a szokásos 300g-os betétagokkal, a további kísérleteknél is 1:1 az arány végig), és 10%-nyi homokkal. A kohó előfűtése 75perc volt fával majd 30perc faszénnel, az adagolás 225percig, a lefújtatás pedig 75percig tartott. Az adagolási szakaszban mért hőmérsékletek a 2a ábrán láthatók.

A kohósítás jól sikerült az első tömörítés után, 4kg-os, egyben maradt vasbuca keletkezett, illetve további 1,5kg-nyi vasdarabok (ezek kialakulásának okáról később még lesz szó), tehát a teljes vasmennyiség 5,5kg volt (ld. 2b ábra). A homok hatására sok salak töltötte ki a kohó medencéjét és a bontást megelőző salakcsapolásnál is szép, híg, szürkés-fekete töretű salak folyt ki a salakcsapoló nyíláson. A teljes salakmennyiség 7kg volt.



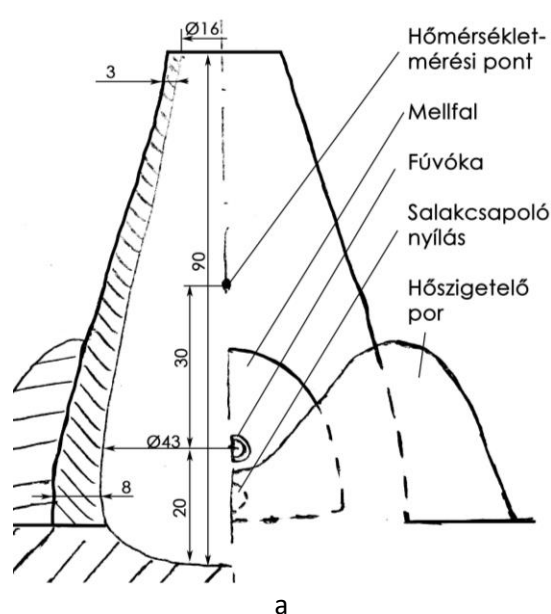
2. Ábra: a) Az előkísérlet hőmérsékletmérési eredményei. b) A kapott vas és salak.

A hőmérsékleti adatokból jól látható, hogy a nagyobb szemcseméretű faszén hatására az égési zóna kiterjedésével a fúvóka fölött 30cm-rel lévő hőmérsékletmérési pontban is a szokásosnál jóval nagyobb, 800-900°C körüli érték volt (150 liter/perc befújt levegő és 6-25-ös szemcseméretű faszén esetén jellemzően 600-700°C szokott lenni ugyanebben a pontban). A nagyobb égési zóna nagyobb méretű vasbuca kialakulását tette lehetővé, általában 10-12kg vasérc kohósításával a peresalmi ércből 2-3kg-os tömörített bucákat szoktunk kapni. A vaskihozatal jónak tekinthető, 20kg vasércből 5,5kg-nyi vasra 27,5%, vagy a 4kg-os tömörített bucára számolva 20%-os volt a kihozatal. A keletkezett salak és vas aránya is kedvező, a kettő ösztömegének 44%-a lett a vas.

Avar kohós kísérletek

A nemeskéri kohó másolatát Gömői János iránymutatásával és az iparrégészet kataszter oldalon lévő leírások alapján (<https://archeoindustrysites.com/hu/site/ir58-nemesker?fbclid=IwAR0ARhkF5dCN3af3Zxaqme29a9naqJVxMtY2fN1e371LQUFsYaP65vQjeio>) építettem meg és összesen négy kísérletet végeztem el benne. A kohóhoz 6mm-es szitán átszitált helyi agyagot használtam (a kísérletek helyszíne a bátori kovácsműhelyem udvara volt, ahol agyagos a hegyoldal), amelyet hosszú szálú fúvel kevertem össze. Ebből a nagyon jól formázható agyagból megépítve a kohót nagyon kevés és csak vékony repedéseket tapasztaltam, amelyek utólag szépen javíthatók is voltak. A kohó falazata alul kb. 7cm, felül 2cm vastag volt, ez a masszív kohó az egyes kohósításokat követő esetleges javításokkal akár több tíz kohósítást is képes elviselni. A kohó magassága 90cm volt, a fúvósíkban 43cm-es átmérővel, a torokban pedig 16cm volt az átmérő. Ez a kohó kb. 65 liter belső térfogatú, a kísérletezgetésre szokásosan használt fajszi típusúval viszont csak 35 literes). A fúvóka 20cm magasan volt az első három kísérletben. A fúvóka felett 30cm-es magasságban volt kialakítva a szokásos hőmérsékletmérési pont. A fúvóka belső átmérője 35mm volt (a szokásos 25mm helyett).

A kohót hőszigetelés céljából a mellfalazat felső részéig porral vettem körbe, a kohóbontáskor ezt a port el kellett lapátolni a mellfalazat elől. A kohó vázlatos rajzát (félmetszet-félnézetben) a főbb méretekkel a 3a ábra mutatja, a 3b ábrán a kitisztított kohó, a 3c ábrán pedig az üzem közbeni kohó látható fotókon.



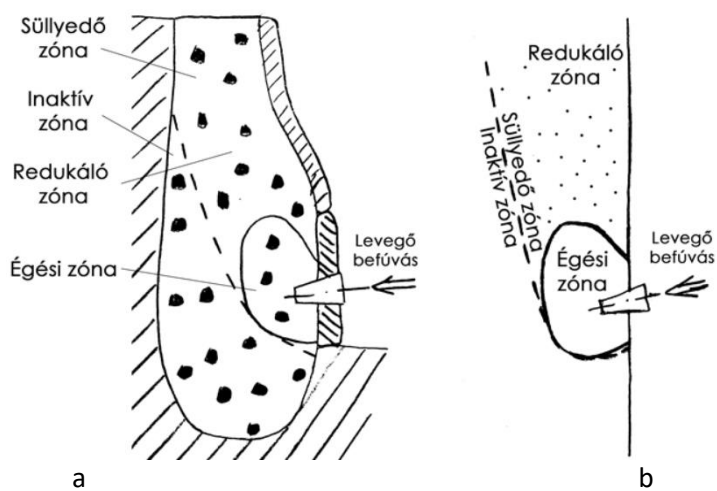
3. Ábra: a) A kohó vázlatos rajza a főbb részekkel és méretekkel. b) A kitisztított kohó, előtte salakgödörrel. c) A kohó üzem közben centrifugál ventilátorral fújtatva és hőszigetelő porral körbevéve.

I. kohósítás (2023. aug25)

Ennek során a ugyanazok voltak a technológiai paraméterek, mint a korábban bemutatott előkísérletnél, annyi eltéréssel, hogy a faszén frakciója 12-50mm volt (itt saját égetésű tölgyfaszenet használtam, a faszénégetős kísérletről beszámoló itt: http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/egyeb/2023-04-03_Faszenegetes1.pdf, Youtube videó pedig itt: <https://youtu.be/xSkY7ZovSws?si=2ueiqhv8xQyPBhiH>) és a ventilátor 5-ös fokozatával kb. 350 l/perc levegőt fújtam be (ez nagyon intenzív kézi fújtatásnak felel meg a szokásos egykamrás fújtatóval). Összesen 30kg-nyi 0-15mm-es szemcseméretű petesalmi vasércet kohósítottam 10%-nyi homokkal. Az előfűtés 90percig fával majd 15percig faszénnel történt, az adagolási szakasz 190percig tartott (10kg vasércenként a beadagolásához 70+60+60perc volt szükséges), a lefűjtás pedig 35 perces volt. Az adagolási szakaszban mért hőmérsékletek 1000°C körül voltak. Salakcsapolást a lefűjtési szakaszban végeztünk, ekkor nagyon szépen hígan folyó, szürkés-fekete töretű salak folyt ki olyan nagy mennyiségben, hogy feltöltötte a kohó előtt kialakított kb. 50x25cmx5cm-es salakcsapoló gödröt. A kohósítás során a fúvókán keresztül bepiszkálva már 10-15kg-nyi érc beadagolása után érzékelt a fúvóka előtt

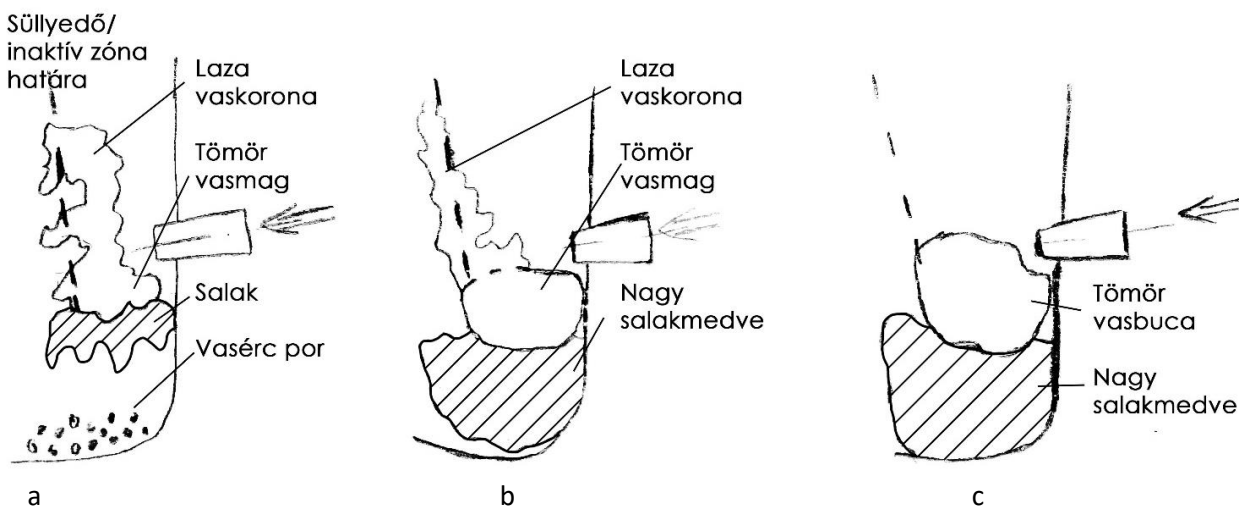
tornyosuló laza vaskoronát, ami a durva szemcsés faszén között a kohó inaktív zónájába lepergő apró szemű vasércből alakult ki. Ez a laza vaskorona nem süllyedt lefelé és nem hegedt hozzá a vasbucához, a tömör vasmaghoz, hanem egyre magasabbra növekedett. Persze a laza vaskorona kialakulása mellett a beadott vasérc egy része mindemellett a vasbucát növelte. A kohósítás során látható volt az is, hogy ilyen technológiai paraméterek mellett több vasérc beadagolása nem lett volna lehetséges. A kohóbontás után a vasbuca tömör magja egyben jött ki, de tömörítés közben azonnal darabokra tört feltételezhetően a nagy foszfortartalom miatt. Az összetört buca összesen 3,7kg-os volt. Ezen kívül a laza vaskoronából további 4,4kg-nyi apró, szivacsos vasdarab került ki a kohóból. A salak tömegét nem mértük meg pontosan, de kb. 10kg-nyi lehetett. Összesen tehát mintegy 8,1kg-nyi vas keletkezett, viszont ez nem alkotott egy masszív, betömöríthető vasbucát, így a kísérlet nem tekinthető sikeresnek. A kapott vasanyag a 12. ábrán látható.

A kísérlet nagy tanulsága az volt, hogy ha a faszén szemcseméretének növelésével szeretnénk az égési zónát kiterjesztve növelni az előálló vasbuca méretét, akkor ez az apró szemű petesmalmi vasérc sajnos nagyobb részben leperog a faszéndarabok között a kohó inaktív zónájába (ld. a 4. ábrát, amelyen a kohó főbb zónáit mutatom be), ahol laza vaskoronát képez (az inaktív zónába pergő vasércből is tud színvas kialakulni az ott uralkodó hőmérséklet és redukáló atmoszféra hatására).



4. ábra: a) Főbb zónák a bucakohóban. b) Ugyanez sematikusan.

A tömör vasbuca a fúvóka alatt-előtt képes kialakulni az égési zóna alján. Ha keletkezik elegendő hígán folyó salak, akkor az képes a faszénat kiszorítani a kohó medencéjéből, így lehetővé téve azt, hogy a vasbuca lejjebb süllyedjen, azaz nagyobbra növekedjen. Ideális esetben nagy salakmedve tölti ki a kohó medencéjét, amibe felül, a fúvóka alatt-előtt beágyazódik egy tömör vasbuca. Ezt mutatja az 5c ábra. Durva szemű faszén esetén a petesmalmi vasércet önmagában (azaz homok vagy egyéb salakképző nélkül) kohósítva az 5a ábrán mutatott módon első sorban laza vasszivacs keletkezik, ill. egy kis tömörebb vasmag, amihez alulról kevés salak tapad. Ilyenkor a buca „száraz”, tömörítéskor darabokra törik. Kohóbontás után sokszor lehet a medencében finom szemcsés vasércport találni, akár kilószám. A bemutatott első avar kohós kísérletnél az 5b ábrán látható módon megjelent egy nagyobb méretű tömör vasmag de felette jókora laza vaskoronával, alatta viszont a salakképzőként adagolt homok miatt sok salak töltötte ki a kohó alját.



5. ábra: A vasbuca jellemző kialakulása a petesmalmi vasérc kohósításakor. a) Salakképző nélkül kohósított apró szemű vasérc esetén. b) Homokkal kohósított apró szemű vasérc esetén. c) Granulációs technikával, oltottmeszet használva.

A laza vaskoronából származó egy kisebb, fémtisztára csiszolt (bizonyítandó, hogy színvasról van szó) vasszivacs darabról mutat közeli képet a 6a ábra, amelynek baloldalán az apró szemű petesmalmi vasérc is ott látható a tenyeremben. Jól látható, hogy a kis vasszivacs darabka szimplán a színvassá redukálódott apró vasércszemcsékből hegedt lazán össze, az ilyen vasszivacs kézzel is szétmorzsolható.



6. ábra: Fémtisztára csiszolt vasszivacs darabka és az apró szemű petesmalmi gyevasérc.

II. kohósítás (2023. aug26)

A második kohósítás technológiai paramétereiben az elsőhöz képest annyi változtatást tettem, hogy a faszén szemcsemérete az apró szemű petesmalmi vasérchez ideális szokásos 6-40mm-es volt, a vasérből pedig csak a 4-15mm-es frakciót kohósítottam (egy 4mm lyukméretű szitán fennmaradó ércet), remélve, hogy a durvább szemű vasérc nem képez magas, laza vaskoronát.

Az előző kísérlethez képest finomabb szemű faszén kisebb égési zónát eredményezett, így az elegy is lassabban süllyedt, emiatt a beadagolási szakasz (ugyanúgy 30kg vasércre) ez előző kísérlet 190perces időtartamához képest jelentősen megnyúlt, 330perces lett (10kg vasércenként a beadagolásához 85+110+135perc volt szükséges). A kisebb égési zóna miatt a mért 900-950°C hőmérsékletértékek is kissé elmaradtak az első kísérletben mértetekhez képest.

Nagyjából 15 kg vasérc beadagolása után már a vasbuca tapinthatóvá vált a fúvóka előtt, illetve kevés laza vasszivacs itt is kitapogatható volt a fúvóka felett. 20 kg-nyi vasérc kohósítása után már a fúvóka fölé magasodó vasbuca nem növekedett tovább, a beadott további 10kg-nyi érc valószínűleg elsalakult (azaz ennek a további 10kg-nyi ércnek a beadagolása felesleges volt). A kohóbontáskor a buca egyben jött ki, de tömörítés közben kettétört. A két fél együttes tömege 4,7kg volt ezen felül további 1kg-nyi vasszivacs darabka került még ki a kohóból. A kísérlet tanulsága, hogy a kisebb szemcseméretű faszén tehát kisebb égési zónát eredményezett, így összességében csak 5,7kg-nyi vas lett a beadott 30kg-nyi nagy szemű petesmalmi vasérből, de a laza vaskorona mérete a jobban összepasszoló faszén-vasérc frakciók miatt jelentősen csökkent.

III. kohósítás (2023. aug30)

Ebben a kísérletben a petesmalmi vasérchnél korábban már alkalmazott granulációs technikával (ld. erről posztet itt: http://www.bucavasgyuro.net/data/publikaciok/Poszter+rovidcikk/Poszter_SI2020.jpg) végeztem el a kohósítást. Ennek a technikának két fő előnye van. Egyrészt lehetőség van a granulákhoz használt agyag és oltott mész (vagy döglöttmész) mennyiségeinek változtatásával a kívánt összetételű, bázikus salak kialakítására, amely a vasszivacs akár teljesen is képes foszfortalanítani, így a kapott vasbucánál melegtörékenységek nem lesz tapasztalható. Másrészt a granulák szemcsemérete nagy, ezek néhány cm-es golyók, így nem peregnek át a durva szemű faszén között sem. A korábbi kísérletek alapján látható volt, hogy a vasbuca méretének a növelése az égési zóna méretének a növelésével lehetséges, amihez durvább szemű betét és nagyobb befűjt levegőmennyiség kell. A granulációs technika két hátránya, hogy egyrészt időigényes, másrészt a kevésbé jól redukálódó nedves granulák esetén a sok salak keletkezése miatt romlik a vaskihozatal.

30kg-nyi vasérből 1 : 0,2 : 0,05 = érc : oltott mész : agyag arányok mellett, kevés vízzel kb. 30g-os granulákat gyúrtam (10 granula tett ki egy adagot), ld. a 7. ábrát. Az alaposan átgondolt kísérlet során azonban sajnos ismét elkövettem

egy hibát. Bár 12-50mm-es, nagyszemű faszenet szerettem volna használni, a frakcionálást a saját égetésű, durvább szemű faszén helyett a finomabb szemcsés, szendrői tölgyfaszénnel (Szendőn a Petró Bt-től szoktuk venni a grillezéshez gyártott faszenet) végeztem, így a 12-50mm-es helyett kb. 80%-ban 12-30mm-es és 20%-ban 30-50mm-es frakció állt elő. A 90+15perces fás majd faszenes előfűtés után 285perces adagolási szakasz és 45 perc lefűjtési szakasz következett. A nedves granulák miatt a hőmérsékletmérési pontban csak 900°C körüli hőmérséklet volt mérhető. A finomabb szemcseméretű faszén ismét kicsi égésteret eredményezett, a fúvóka előtt egy széles és magas, a fúvóka elé érő vasbuca állt össze, ami azonban befelé nem volt mély. A kohóbontás után a buca jól tömöríthető volt, egyben maradt, 4,3kg-os lett, azaz sajnos nem túl nagy (az előkísérletben 20kg vasércből több lett a vas, mert kevesebb salakult el). Laza vaskorona nem volt, viszont a kohóból közvetlenül a bontás előtt sok, híg folyó folyósalakot (a folyósalak viszkozitása nagyon kicsi volt, mint a víz, úgy folyt, nem is kellett salakcsapoló nyílást ütni mellfalon a kifolyatásához, a hőszigetelő porréteg elkaparásakor a folyósalak kiömlött a kohóból) lehetett kicsapolni és a kohó medencéjének elülső részét is kitöltötte egy nagyméretű salakmedve, de nem ért el a kohó hátuljáig (az I. kísérletben a durvaszemű faszénnel kialakuló nagy égéstérben a salakmedve egészen a kohó hátuljáig ért). A salak összességét itt sem mértem le.

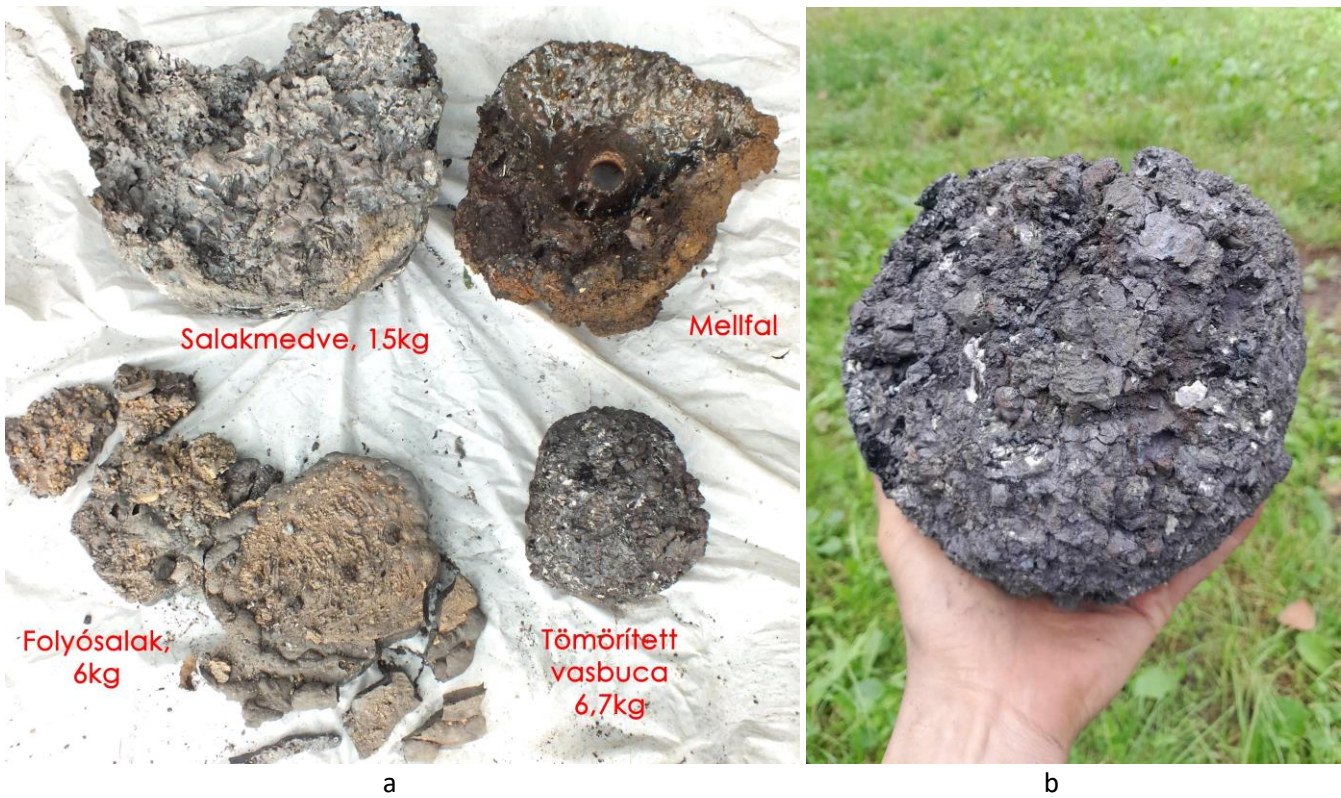


7. ábra: Granulák 1 : 0,2 : 0,05 = érc : oltott més : agyag arányok mellett

IV. kohósítás (2023. szept2)

A negyedik kohósítás során az égési zóna méretét megnövelendő az eddigi legdurvább frakciójú faszénnel, 25-50mm-es szemcseméretűvel végeztem el a kohósítást. Ezen kívül, hogy a vasbuca lejjebb süllyedhessen a kohó medencéjébe kitöltő salakban, a kohó alját 10cm-rel kimélyítettem, így a 3a ábrán láthatóhoz képest a fúvóka alatt 20cm helyett 30cm-nyi hely volt. Ezen kívül a jobb redukálhatóság érdekében valamivel kisebb méretű, 20g-os (15db granula került egy adagba) granulákat gyúrtam. Összesen 40kg vasércet felhasználva 50kg-nyi granulát készítettem elő (ez előző kísérlethez képest tehát plusz 10kg-nyi vasércet kohósítottam). A többi technológiai paraméter változatlan volt.

90+30perces előfűtés után 330perces adagolási szakasz következett. A vasbuca csak 30kg-nyi vasérc (37,5kg granula) beadagolása után vált a fúvóka alatt tapinthatóvá, tehát a tömör buca mélyen volt. 40kg-nyi vasérc után a buca már a fúvóka előtt is tapintható volt, azonban feltételezem, hogy további 10kg vasérc is gond nélkül befért volna még a kohóba. A kohóbontást salakcsapolással kezdtem (a kohósítás alatt nem volt szükség salakcsapolásra). A salak híg folyt és feltöltötte a kohó előtti salakcsapoló gödröt. Egészen a mellfal aláig kitágítva a salakcsapoló nyílást, kifolyattam a salakot a kohóból, majd a mellfal kitörése után a még izzó faszenet kilapátolva láthatóvá vált a vasbuca, amely szelvében teljesen kitöltötte a kohót (a szélessége kb. 30cm volt), magassága 25cm, mélysége 20cm volt. A vasbucát kihúzva a kohóból a szokásos módon betömörítettem, darabok nem estek le róla, jól tömöríthető volt, egyben maradt és a tömege 6,7kg lett, ami bár az eddigi legnagyobb buca, csak 17%-os vaskihozataalt jelent. A kicsapolt folyósalak 6kg volt. A kohó medencéjéből másnap vettem ki a masszív salakmedvét, amelynek tömege 15kg volt és kitöltötte a medence majdnem teljes térfogatát, 5cm híján teljesen hátraért a kohó hátsó falzatához. A 8. ábrán láthatók a salakok, a vasbuca és a mellfal.



8. ábra: a) A IV. kohósítás salakjai, vasbucája és mellfalazata. b) A tömörített, 6,7kg-os vasbuca.

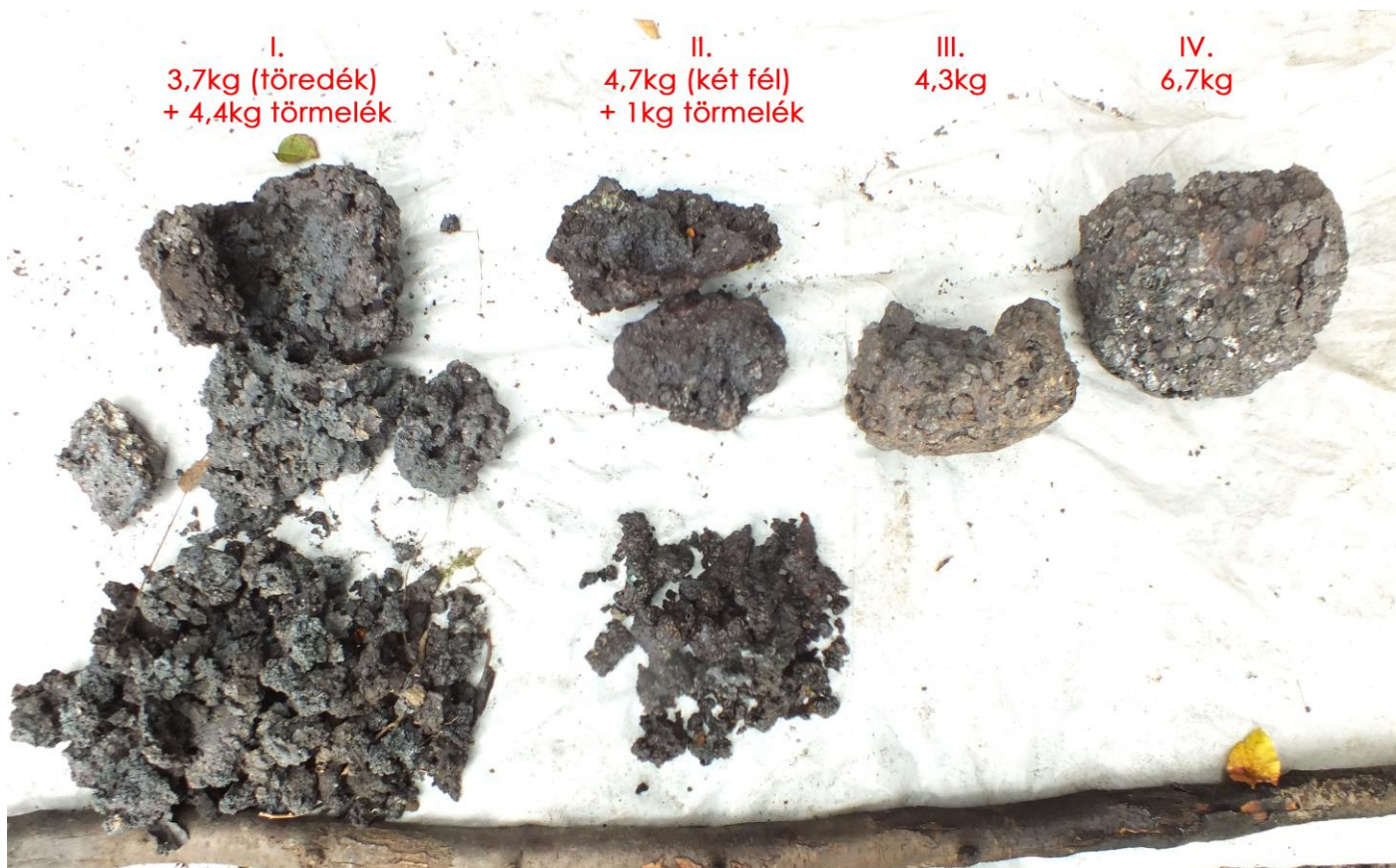
A kohó környékét kitakarítva pár fotót készítettem a kicsapolt folyósalakról és a kohóban maradt salakmedvéről, ezek láthatók a 9. ábrán.



9. ábra: A IV. kohósítás után a kohóban maradt salakmedve és a kohó elé kifolyt folyósalak.

Összességében elmondható, hogy a IV. kohósítás jól sikerült, a vasbuca nagy lett és egyben maradt, azonban látható az is, hogy lehetséges lenne a vasbuca méretének a további növelése is. Az eredmények további értékelésében szó lesz arról is, hogyan.

A 10. ábrán látható az egyes avar kohós kísérletek során kapott vasanyagok.



10. Ábra: Az egyes avar kohós kísérletek során kapott vasanyagok.

Az eredmények értékelése

A minél nagyobb méretű vasbuca előállítását célzó kísérleti eredmények összehasonlító értékelése kapcsán általánosságban elmondható, hogy a nagyobb szemcseméretű faszén és a több befújt levegő együttesen nagyobb égéster kialakítását teszi lehetővé a kohóban, ami nagyobb méretű vasbuca kialakulásához vezet. Ez a megállapítás tk. triviális, azonban a gyakorlati megvalósítás során számos problémával szembesültem. A petesalmi vasérc kohósításakor kisebb vasbucák előállításához a vasérc „a la nature”, olyan finomszemcsés állapotában, ahogyan a tófenékről összelapátolható is megfelel (bár a foszfor néha okozhat melegtörékenységet), azonban a nagyobb méretű vasbucákhoz granulálni célszerű. A faszén ideális szemcsemérete is a gyakorlati tapasztalatok alapján határozható meg, a legkedvezőbb a 25-50mm-es szemcseméret. A befújt levegő mennyiségét illetően a 350l/p-es térfogatáram (ami a szokásos ventilátor 5-ös fokozatának, és a szokásos bőrfűjtatóval való intenzív fűjtatásnak felel meg) a 43cm-es belső átmérőjű avar kohó esetén megfelelő volt, nagyobb kohónál viszont tovább lehetne növelni.

A 11. ábrán és az 1. táblázatban a bemutatott kohósítások hőmérsékletmérési eredményei és fontosabb adatai szerepelnek, kiegészítve egy korábbi, a torockói vasércel elvégzett kohósításával (ahol 150l/p-es levegőmennyiség és 6-25-is finom szemű faszén felhasználásával 6,9kg-nyi vasércet kohósítva 2,5kg-os tömörített bucát állítottam elő).

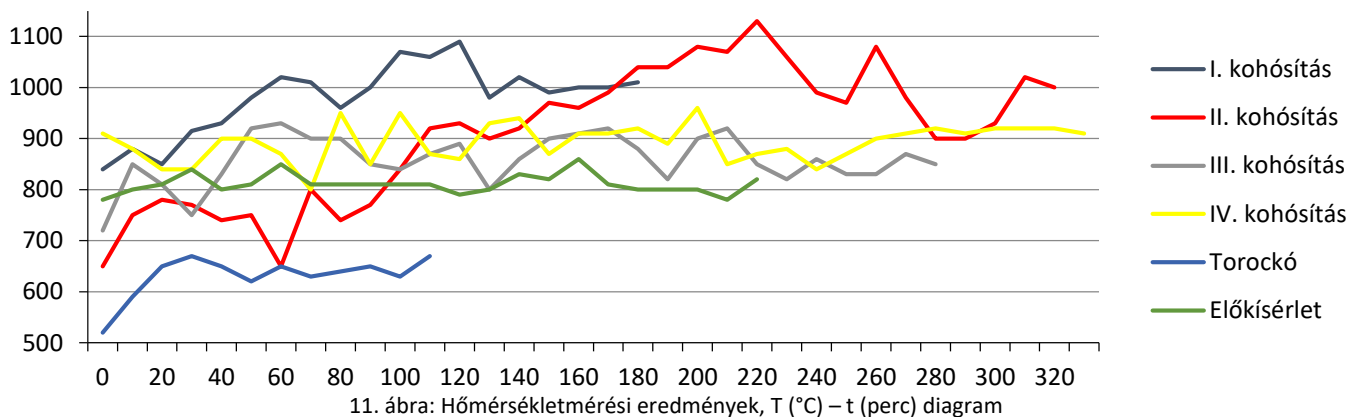
Figyeljük meg, hogyan változik az égéster mérete a konkrét faszén szemcseméret-befújt levegőmennyiség párosítások esetén. Bár a fúvóka előtt kialakuló égéster méretét nem tudjuk cm-ben megadni (a kohóbontás előtt lemérhető lenne a kialakult vasbuca mérete, ebből lehetne következtetni), jól jellemezhető a faszén égési sebességével, ami viszont pontosan mérhető a kohósítás alatt. Legegyszerűbben az adagolási szakaszban határozható ez meg, a beadagolt faszén mennyiségének és az adagolási szakasz időtartamának hányadosaként. tekintsük pl. a #1-es torockói vasérces és a 3-as I. Avar kohós kísérlet égési sebességét, előbbi 63g/perc, utóbbi kb. 2,5x-szerese ennek, 158g/perc. Ennek oka, hogy bár a beadagolt vasérc szemcsemérete közel azonos volt, a faszén szemcsemérete és a befújt levegő mennyisége az avar kohós kísérletben jóval nagyobb volt. Összehasonlítva a két kísérletben a fúvóka felett 30cm-rel mérhető átlaghőmérsékleteteket (631°C vs. 979°C) jól látható a kb. 350°C-os különbség.

A hőmérsékletértékek összehasonlítása kapcsán elmondható, hogy a granulációs kísérletekben (a nagyobb méretű granulák biztosította jobb átszellőzés ellenére) hasonló szemcseméretű faszén esetén a hőmérséklet kb. 100°C-kal alacsonyabb a granulációs kísérletekben (#4 vs. #5, ill. #3 vs. #6), tehát látható, hogy a nedves granulák hűtik a kohót.

Érdekes még elemezni a vaskihozatal kérdését. A granulációs kísérletekben a vaskihozatal értéke jóval alacsonyabb, kb. csak fele annak, mint amikor natúrban kohósítottam a petesalmi vasércet: 14% és 17%, szemben a 27-28%-kal (a #4-es kísérletben a túladagolt vasérc jó része vsz. elsalakult, így a 19%-os vaskihozatali érték itt most nem releváns). Ennek az az oka, hogy a granulák jóval kevésbé redukálódnak, mint a finomszemű vasérc, azaz kevesebb vas színiül belőlük és több vas kerül a salakba. A granulációs technikánál kialakuló nagy mennyiségű salak tehát részben a redukálatlan

vasoxidokból, részben pedig a mintegy plusz 30%-nyi meddőből (oltottmészből és agyagból) származik. A redukálatlan vasoxidok viszont növelik a salak FeO tartalmát, amelytől a salak nagyon jól kezelhető, kedvezően folyékonyvá válik. A régészeti salakok is általában nagy vastartalmúak, jól átolvadtak és tömörek, így az ilyen salak nemcsak technológiai szempontból jó, de korrúciónak is mondható, a nagy vasvesztés ellenére.

Itt érdemes még kitérni arra, hogy az oltottmészrel való granulálás során mennyi CaO-ot viszünk be a salakba. Az oltottmész Ca(OH)_2 moláris tömege 72g/mol, amely a $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ folyamattal előbb dőglöttmészé (mészkövé, kalcium karbonáttá) alakul, ami a $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ során 65g/mol tömegű CaO-vá bomlik, azaz a felhasznált oltottmész tömegének jó része (kb. 90%-a) a salakba kerül.



1. Táblázat: Az elvégzett kísérletek fontosabb adatai

	#1 Torockói vasérc	#2 Előkísérlet	#3 Avar I.	#4 Avar II.	#5 Avar III.	#6 Avar IV.
Vasérc	6,9kg torockói vasérc 0-20mm-es szemcseméret	20kg natúr pet. + 10% homok	30kg natúr pet. + 10% homok	30kg nagy szemű pet. + 10% homok	30kg pet. (37,5kg granula, 20% omész, 5% agyag)	40kg pet. (50kg granula, 20% omész, 5% agyag)
Faszén frakció	6-25mm	25-40mm	12-50mm	6-40mm	12-50mm (főleg 12-30mm)	25-50mm
Levegő térfogatáram (liter/perc)	150l/p (vent. 1)	250l/p (vent. 3)	350l/p (vent. 5)	350l/p (vent. 5)	350l/p (vent. 5)	350l/p (vent. 5)
Előfűtés	60+30p	75+30p	90+15p	90+30p	90+30p	90+30p
Adagolás	110p	225p	190p	330p	285p	330p
Faszén égési sebessége	63g/p	88g/p	158g/p	91g/p	132g/p	152g/p
Lefűjtetés	90p	35p	35p	60p	35p	35p
Átlaghőmérséklet (30cm-rel a fúvóka felett)	631°C	811°C	979°C	910°C	858°C	893°C
Tömör buca	2,5kg	4kg	3,7kg (összetört)	4,7kg (kettétört)	4,3kg	6,7kg
Összes vas		5,5kg	8,1kg	5,7kg		
Salakmedve	n.a.	7 kg	n.a.	n.a.	n.a.	15kg
Folyósalak						6kg
vas aránya a salak+ vas össztömegből	n.a.	44%	n.a.	n.a.	n.a.	24%
Vaskihozatal (vasércre)	36%	28%	27%	19%	14%	17%

Következtetések és további perspektívák

Ideális, durva szemcseméretű faszén és vasérc felhasználása esetén (a petesalmi vasércnél granulációs technikával és 25-50mm-es frakciójú faszénnel) a Nemeskéri kohó másolatában könnyedén elérhető volt egy 6,7kg-os tömörített buca előállítás. Valószínűleg pusztán több vasérc beadagolásával a IV. kísérlet hosszabbra nyújtásával előállítható lenne egy max. 8-9kg-os vasbucá, de a 10kg-os méret sem elképzelhetetlen. Ez azonban még mindig nem elegendően nagy buca, ennek tömörítésével, többszöri újraizzításával és ékelésével jelentős tömegvesztés következik be: egy 10kg-os egyszer tömörített bucából (a kisebb bucákon végzett tömörítési tapasztalataim szerint) kb. 6-7kg-os teljesen

betörmörített buca jönne létre, azaz a buca elvesztené a tömege kb. harmadát. Ezt figyelembe véve a késő avar kori kb. 10kg-os ékelt bucák egyszer tömörített állapotban kb. 15kg-osak kellett volna, hogy legyenek, ekkorát bucát viszont a Nemeskéri kohó másolatában nem lehetne elkészíteni.

A még nagyobb méretű (tömörítve akár 15kg-os) vasbuca előállítására érdekében a jól sikerült IV. avar kohós kísérlet tapasztalataiból kiindulva:

- egyrészt célszerű lenne a granulációs technika esetében is a vaskihozatalt növelni.
 - A granulák oldaláról ennek érdekében egyrészt a granulák redukálhatóságát kellene javítani, pl. úgy, hogy az előkészített granulákat meg lehetne szárítani (becslésem szerint kb. 15-20%-os tömegcsökkenés lenne lehetséges), esetleg pörkölni, másrészt pedig a granulák elkészítéséhez csak oltottmeszet kellene használni, agyagot nem, mert az a nagy SiO_2 tartalmánál fogva fayalitos ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) salakot képezve csökkenti a vaskihozatalt.
 - A kohó oldaláról pedig a redukció számára jobb feltételeket biztosítandó érdemes lenne a kohó magasságát kis mértékben növelni, de sokkal inkább a kohó kúpszögét csökkenteni, azaz nagyobb torokátmérő (d) mellett hengeresebb kohót építeni, amelyben lelassul az elegyoszlop süllyedése, így több idő marad a redukcióra.
- másrészt lehetne a kohó fúvósíkbeli átmérőjét tovább növelni, felmenni akár $D=50\text{cm}$ -re is (ha ez régészetiileg indokolható). Egy kismértékű növeléssel, $D=50\text{cm}$, $d=30\text{cm}$ és 110cm -es magasság esetén az avar kohós kísérletekben használt kohó térfogata megduplázódna, 140 literesre nőne.
- az égési zóna méretét tovább lehetne növelni egy nagyobb belső átmérőjű kohó esetén, de nem a faszén szemcseméretével, amely gyakorlati okokból nem igazán növelhető 25-50-es frakció fölé, hanem a befűjt levegő mennyiségével (pl. a kísérletekben két ventilátort használni, ami megfelelne egy fúvókához párban csatlakoztatott egykamrás fűjtatókkal való intenzív fűjtetésnek)

20%-os vaskihozatal feltételezve egy 15kg-os egyszer tömörített bucához 75kg-nyi vasércre (granulációs technika esetén kb. 100kg-nyi nedves granulára, vagy kb. 85kg-nyi száraz granulára) volna szükség. Ennyi vasércet valószínűleg le lehetne kohósítani, ha a Nemeskéri kohómásolat $D=43\text{cm}$, $d=16\text{cm}$, $m=100\text{cm}$ – es méreteit, $D=50\text{cm}$, $d=30\text{cm}$ $m=110\text{cm}$ -re növelnénk (Gallina Zsolt 2018-as poszterén egy hasonló méretű avar kohó szerepel, itt: <https://archeindustrialsites.com/sites/default/files/pdf/gallina-zsolt-vas-es-ace-orszaga-az-avar-vasmuvesseg-virtualis-rekonstrukcioja-poszter-in-hadak.pdf>).

Itt fontos még azt megjegyezni, hogy ha ismernénk olyan gyepvasérc lelőhelyet, ahonnan nagy mennyiségben, könnyedén fejthető jó minőségű vasérc, akkor azt pörkölés, aprítás és a poros frakció (kb. 6mm alatti szemcseméret) leszitálása után a granulációs technika mellőzésével jól lehetne kohósítani. Somogyban csak a Libickozma közelében lévő Aranyosi-árokban és Somogyszobon a Kócsmóna-patakban tudok olyan biogén gyepvasérc lencséről, amikben esetleg alkalmasak lennének erre, azonban mindkét hely nehezen megközelíthető, innen nem gyűjthető könnyen gyepvasérc.

Végezetül pedig érdemes még rávilágítani arra, hogy a nagy méretű avar kohók, amelyek belső térfogata kb. 2x-ese volt a későbbi honfoglalás kori és Árpád-kori kohókénak, jóval nagyobb méretű vasbucák előállítását tették lehetővé. A kísérleti tapasztalatok alapján pl. a fajszi típusú kohóban, amelynek fúvósíkbeli átmérője kb. 30cm legfeljebb 4-kg-os tömörített vasbutát tudunk előállítani. Ezzel szemben a 43cm-es fúvósíkbeli átmérőjű Nemeskéri avar kohóban közel 7kg-os vasbuca keletkezett, ami viszont lehetett volna még pár kg-mal nehezebb is. Az avar kori kohók méreteit figyelembe véve nagyjából 2x, 3x nagyobb méretű vasbucák előállítására feltételezhető, mint a későbbi magyar kohókban.