

KESZTHELY-FENÉKPUSZTA KÉSŐ RÓMAI LELŐHELYRŐL SZÁRMAZÓ RENDKÍVÜLI MÉRETŰ VASBUCÁK ARCHEOMETRIAI VIZSGÁLATA

ARCHAOMETRICAL EXAMINATION OF IRON BLOOMS OF EXTRAORDINARY SIZE FROM THE LATE ROMAN SITE OF KESZTHELY-FENÉKPUSZTA •

TÖRÖK, Béla¹  & BARKÓCZY, Péter¹ 

¹Miskolci Egyetem, Anyag- és Vegyészmérnöki Kar, Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportja (ARGUM)

E-mail: bela.torok@uni-miskolc.hu, peter.barkoczy@uni-miskolc.hu

Abstract

Five large split iron blooms were unearthed at the site of a former Pannonian Late Roman fortress in Keszthely-Fenekpuszta (Hungary). Because of their extraordinary parameters, these findings are some of the most interesting features of the archaeometallurgy of ancient iron making in Europe. The manufacturing process of them has been a technological mystery since they were founded.

A complex archaeometrical analysis was carried out on two of the blooms to find answers to some fundamental questions about the characteristics of the microstructure and chemical composition, and to reveal the technological circumstances of the smelting process and the further usability of these blooms.

A slice in 10 mm thickness was cut off from one of the blooms by water jet cutting. Ten 4x4 cm pieces, cut off from the slice, were examined by optical microscopy and scanning electron microscopy equipped with energy dispersive spectrometry. The C-content of the samples was detected by optical emission spectrometry.

Based on the results, it can be concluded that there was no metal forming after the smelting. The examined bloom has a large number of gas pores and an extremely high C-content. The structure of the slice of bloom was heterogeneous; only two samples contained extended ferrite-pearlite areas with relatively low carbon content. Surprisingly, a low number of slag inclusions can be observed, which originated from the smelting.

Based on the structure, the bloom was manufactured at about 1200°C temperature for a long smelting time. It is conceivable that smaller blooms or smaller slaggy pieces of blooms, broken off during the purification hammering after previous smelting processes, were charged back to the furnace, and they were melted together again.

Three experimental forging of heated pieces from the slice of bloom were carried out in order to investigate the behaviour of the material during hammering. Even the sample with the lowest carbon content was only moderately forgeable, while the other samples were not or only with difficulty.

Kivonat

Keszthely-Fenekpusztán egy egykori pannoniai késő római kori erődítmény lelőhelyén öt nagyméretű ékelt vasbucát találtak. Rendkívüli paramétereik miatt ezek a leletek az ókori európai vaskohászat archeometallurgiájának egyik legérdekesebb darabjai. Előállításuk folyamata megtalálásuk óta technológiai rejtély.

Két vasbucán komplex archeometriai vizsgálatot végeztünk, hogy választ kapjunk néhány alapvető kérdésre a mikroszerkezetet és a kémiai összetételt illetően, illetve, hogy mit lehet megtudni a kohósítás technológiai körülményeiről, valamint a vasbucák további felhasználhatóságával kapcsolatban.

• How to cite this paper: TÖRÖK, B. & BARKÓCZY, P., (2023): Keszthely-Fenekpuszta késő római lelőhelyről származó rendkívüli méretű vasbucák archeometriai vizsgálata / Archaeometrical examination of iron blooms of extraordinary size from the Late Roman site of Keszthely-Fenekpuszta (in Hungarian with English abstract), *Archeometriai Műhely XX/2* pp. 177–190.

doi: [10.55023/issn.1786-271X.2023-013](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2023-013)

Vízugaras vágással egy 10 mm vastagságú szeletet vágtak le az egyik bucából. A szeletből kialakított tíz 4x4 cm-es darabot optikai mikroszkóppal és energiadiszipatív spektrométerrel ellátott pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltunk. A minták C-tartalmát optikai emissziós spektrométer segítségével detektáltuk.

Az eredmények alapján arra lehetett következtetni, hogy a kohósítás után nem volt utólagos alakítás. A vizsgált bucában nagyszámú gázpórus volt megfigyelhető és rendkívül magas volt a C-tartalma. A bucaszelet szerkezete heterogén volt, csak két mintában találtunk ferrit-perlites kiterjedt területet relatíve alacsonyabb karbon tartalommal. Meglepően kevés salakzárvány volt megfigyelhető, amelyek az olvasztásból származtak.

A szerkezet alapján a vasbucát körülbelül 1200°C hőmérsékleten, hosszú olvasztási idő alatt állították elő. Elképzelhető, hogy kisebb vasbucákat vagy korábbi kohósítások után a salaktalanító kalapálás során letört kisebb salakos bucadarabokat visszaadagoltak a kemencébe és újra egybeolvasztották őket.

Három kovácsolási kísérletet végeztünk a vasbuca szeletből hevített darabok kovácsolásával, hogy megvizsgáljuk az anyag viselkedését a kalapálás során. A legkisebb karbon tartalmú minta is csak közepesen volt kovácsolható, a többi minta viszont nem, vagy csak nehezen.

KEYWORDS: METALLOGRAPHY, IRON BLOOMS, SEM-EDS, OM, OES

KULCSSZAVAK: METALLOGRÁFIA, VASBUCA, SEM-EDS, OM, OES

Bevezetés

1970-ben Sági Károly és munkatársai Keszthely-Fenekpuszta 5. századi lelőhelyén végzett ásatásuk során egy üres gabonás veremben jelentős mennyiségű vasleletet találtak (Rupnik 2013). A leletek között előkerült egy négyszögletes alakú vasüllő, illetve öt darab, extrém nagy méretű, igen nagy súlyú, ékelt vasbuca is (Sági 1979). A lelőhely a pannoni késő római „belső erődök” egy sajátos csoportjába tartozik. Ezek a vidéki környezetben, főként latifundiumokon vagy azok közelében épült erődök logisztikai központokként, illetve élelmiszerek, katonai felszerelések és egyéb anyagok raktárbázisaként is szolgáltak (Heinrich-Tamáskó & Szabó 2015, Visy 2018a,b, Heinrich-Tamáskó & Szabó 2019). A fenékpusztai vasbucák számos kérdést felvetettek, eredetüket, készítésüket, a vonatkozó technológiai jellemzőket, illetve felhasználhatóságukat illetően.

A korai vaskohászat primer termékének számító vasbucák a Kárpát-medencében ritka leletnek számítanak. A Dunántúlon előkerült vasbucák, bucadarabok közül a 10. századi somogyfajsi műhelyben előkerült 2–4 kg körüli tömegű darabok (Gömöri 2018), méretüknél, jellegüknél fogva egyértelműen, de még az avar- és Karoling-korinak datált Lábod-petesalmi és zalavári, egyaránt 10 kg körüli, egyébként szintén ékelt vasbucák (Török et al. 2018, Gömöri 2018) is más kategóriába tartoznak, mint a Keszthely-fenekpusztai, 60 kg körüli ékelt bucák. Azokhoz méretben inkább a Hévízi-tóban talált 47,5 kg-os vasbuca, a Sopron-Kányaszurdokon talált két 50 kg-os ékelt vasbuca (Gömöri 1979, Gömöri 1981) illetve a Somogy-megyei Szalacs-kőről származó, a hasítéka mentén félbevágva 25 kg-os bucadarab (Gömöri 2018) rokonítható. Ezeknek a vasbucáknak az alapvető paramétereiket megállapító mérései mellett, néhányuk kicsiny, lepattintott mintáján sok évvel ezelőtt alapvető optikai mikroszkópos vizsgálatokat is végeztek (Hegedűs

1961, Rozsnoki 1979). A keszthelyi bucákkal kapcsolatosan Rozsnoki Zsuzsanna megállapította, hogy magas karbon tartalmúak (ledeburított is azonosított a vizsgált szövetszerkezetben), szerkezetük nem homogén, így a bucák átfogó fémtani jellemzésére, készítés technológiai, illetve felhasználással kapcsolatos következtetések megállapítására nem elegendő egy-két lepattintott kis darabka vizsgálata (Rozsnoki 1979).

A lipcsei Leibniz-Institut für Geschichte und Kultur des östlichen Europa (GWZO) megbízásával, a keszthelyi Balatoni Múzeum engedélyével és közreműködésével, a Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportjának (ARGUM) kutatói komplex vizsgálati és kísérleti projekt keretében, roncsolásos archeometriai-archeometallurgiai vizsgálatokat végeztek két Keszthely-fenekpusztai vasbucán, melyek részletes eredményei a *Castellum Pannonicum Pelsonense* sorozatban kerülnek átfogó megjelenésre (Török et al. in press).

A méretei, jellege miatt egyedinek, európai viszonylatban is ritkaságnak számító vasbucákból való mintavétel speciális eljárást igényelt a vágást illetően. A leletek mikroszkópos metallográfiai vizsgálata az egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének szerkezetvizsgáló laboratóriumában történt, illetve az egyik vasbuca esetében műhelylaborban végrehajtott próbakovácsolási kísérleteket is végeztünk.

A vizsgálat sorozat és a kísérletek főbb céljai a következők voltak:

- Melyek a bucák jellemző anyagszerkezeti és összetételi sajátosságai (szövetszerkezet, karbon tartalom, szennyezők, zárványok)?
- Mit lehet megállapítani, feltételezni a vasbucák készítés technológiai jellemzőiről?
- Anyagszerkezeti szempontból hasonló vagy különböző vasbucákról van-e szó?
- Mit lehet megállapítani a további felhasználhatóságukról?



1. ábra: A vizsgált 1971.106.21 számú vasbuca

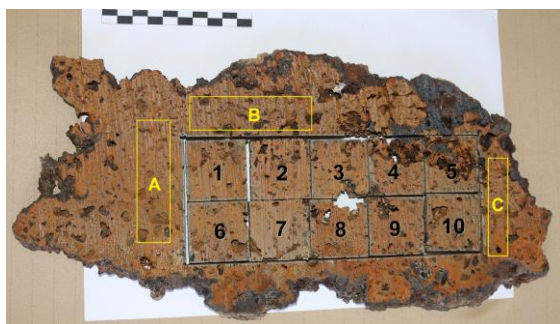
Fig. 1.: The examined iron bloom No. 1971.106.21

Anyag és módszer

A vasbucáknál alkalmazandó vizsgálati módszerek tervezésénél alapvetően figyelembe kellett venni a darabok jelentős méretét, tömegét, illetve nagy keménységét. A Miskolci Egyetemre szállított három vasbuca méreteinek három dimenziója 39–43 cm, 25–38 cm és 12–16 cm között voltak. Az általunk mért tömegek: 1971.106.21 ltsz.: 61,0 kg, 1971.106.22 ltsz.: 65,4 kg, 1971.106.23 ltsz.: 58,3 kg. Törekedtünk arra, hogy a kérdések megválaszolásához csak szükséges, de elégséges mértékű roncsolást hajtsuk végre. Mindenképpen szükségünk volt az egyik vasbuca teljes

keresztmetszetére, illetve az azon elvégzett vizsgálatok eredményeinek függvényében egy másik darabból is vettünk mintát.

A teljes keresztmetszet vizsgálatát az 1971.106.21 leltári számú vasbucából (B1) 10 mm vastag szelet kivágásával biztosítottuk (**1. ábra**). A tekintélyes keresztmetszetű, nagy felületű vasbuca szeletet nagy nyomású, vízugaras ipari vágógéppel vágtuk le úgy, hogy az anyag vizsgálendő felülete a vizsgálendő mélységig nem hevült fel olyan állapotba, hogy az a mikroszerkezet vizsgálata során esetleges téves következtetésekhez vezetett volna.



2. ábra: Az 1971.106.21 számú bucából vágott szelet és a vizsgált minták

Fig. 2.: Cut section and examined samples from iron bloom No. 1971.106.21.

A mikroszkópos vizsgálatok technikai lehetőségeit figyelembe véve, a levágott szelet belsejéből 10 darab, 40x40 mm alapterületű részt vágunk ki, amit sorrendben számoztunk, ahogy az a **2. ábrán** látható. Az így kapott minták felületeit síkköszörűvel párhuzamosítottuk. Mechanikus csiszolást, polírozást és 2%-os töménységű nitalos (salétromsav és metanol elegye) maratást követően a mintákat optikai mikroszkóppal (Zeiss AxioImager M1m) és EDAX típusú, energiadiszipatív spektroszkóppal ellátott pásztázó elektronmikroszkóppal (Zeiss EVO MA 10) vizsgáltuk (OM és SEM-EDS). Az optikai mikroszkóppal minden mintát sorra vizsgáltunk, ami által a szövetelemek, fázisok alakját, eloszlását figyeltük meg, és jól tanulmányozható, általános szövetelepet kaptunk.

Elektronmikroszkópos vizsgálatot csak a 2. és 4. minta esetében láttunk célszerűnek és szükségesnek. A 2. minta optikai mikroszkópos vizsgálata alkalmával a szövet szerkezetét nem lehetett megfelelő részletességgel felbontani, így annak teljes feltárására a SEM vizsgálat szolgált. Az optikai mikroszkópos vizsgálat egyedül a 4. mintában tárt fel zárványokat, amelyeknek alapvető jellege az ugyan optikai mikroszkópi képeken is látható, azonban a zárványszerkezet részletesebb vizsgálata és a kémiai összetétel miatt fontos volt az EDS-sel ellátott SEM vizsgálat is, amely lokális és átlagos elemösszetételt is szolgáltatott.

Mivel az OM vizsgálatok során tapasztalt szövetszerkezetek sok esetben szokatlanul nagy karbon tartalomról tanúskodtak és az EDS vizsgálatok nem adtak volna megbízható karbon tartalom értékeket, valamennyi mintán - mérésre alkalmas, tehát nem pórusos felületeken, amelynek megkeresése a gázüregekkel teli felszínen nem volt könnyű feladat - szikragerjesztésű optikai emissziós spektrométerrel (OES) C-tartalmat mérettünk. A

tanulmányban valamennyi EDS és OES módszerrel mért koncentráció érték tömegszázalékban értendő.

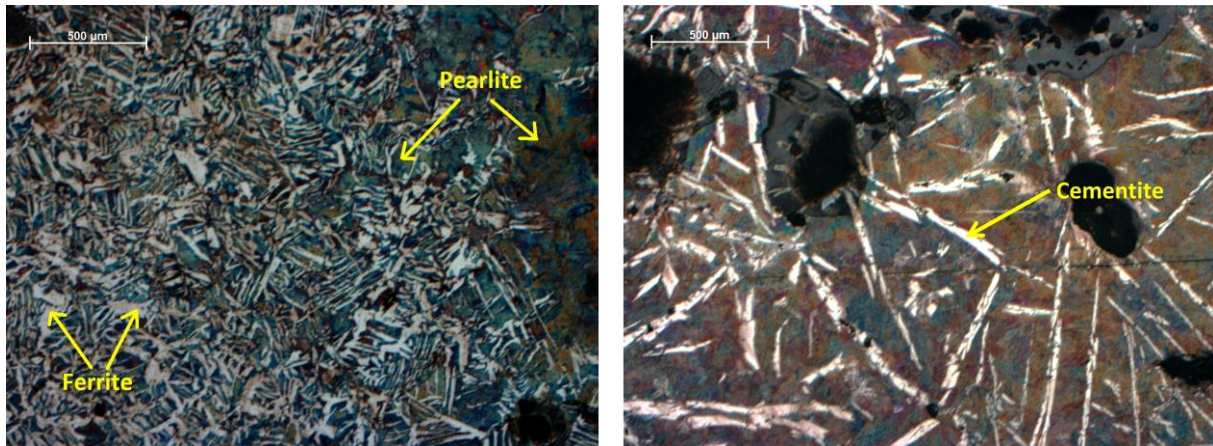
Az 1971.106.21. számú vasbuca vizsgálati eredményeinek speciális és alapvető megállapításait feltétlenül össze akartuk vetni egy másik bucából vett minta legalább jelzés értékű vizsgálatának eredményével. Ezért az 1971.106.22. számú vasbuca (B2) sarkából levágtunk egy kis darabot, amit a másik buca darabjainál is alkalmazott minta előkészítési procedúra után az említett optikai mikroszkóppal vizsgáltuk meg.

Vizsgálati eredmények, megállapítások

Az 1971.106.21. számú vasbuca mintáinak vizsgálati eredményei

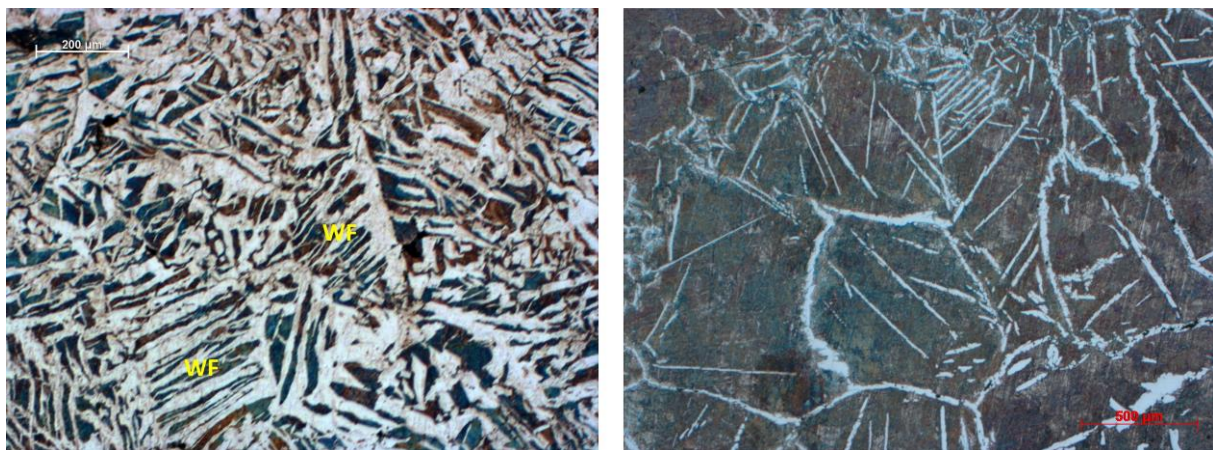
1. minta

Az 1. minta szerkezete alapvetően inhomogén, zömében ferrit-perlites szövetből épül fel (**3. ábra**), egyaránt megtalálhatók a csaknem teljesen perlites, illetve ferrites térfogatrészek is. Az alakított, tömörített, esetleg már kovácsolt tárgyak esetében rendszerint tapasztalható deformált szemcseszerkezet nem fedezhető fel, még a csaknem teljesen ferrites területen sem. Mindez, illetve a jelentős méretű gázüregek és a nagyszámú, kisméretű, gömbszerű pórusok is arra utaltak, hogy a buca nem esett át tömörítésen, képlékeny alakításon. A perlites területeken csak nagyon minimális mennyiségű ferritet találtunk. Mivel a perlit csak a magas hőmérsékleten stabil ausztenitből alakul ki eutektoidos folyamatban, más módon nem, ez arra utal, hogy a vasbuca sokáig relatíve magas hőmérsékleten volt. A ferrit-perlites területekre ún. Widmanstätten-ferrites szerkezet volt jellemző. Ezt a szerkezetet az ausztenites átalakulásakor a perlit szemcsék határán keletkező ferritháló, illetve az ausztenit szemcsék belseje felé nőtt ferrit-tűk jelzik (**4. ábra**). Ezek alapján is arra lehetett következtetni, hogy az anyag sokáig volt magas hőmérsékleten – huzamosabb ideig tartózkodott ausztenites mezőben, azaz 912°C-tól, de inkább 950°C-tól is nagyobb volt a buca hőmérséklete – és szabad levegős hűléssel, vagy esetleg attól csak kicsivel gyorsabb sebességgel hűlt le. A metszetben zárvány nem volt található. A teljesen perlites szerkezetben szekunder cementit fedtünk fel, de csak kis mennyiségben (**3. ábra**, jobb oldali kép). Itt a vas-karbid megjelenésére is a Widmanstätten-jelleg jellemző. A mikroszkópi felvételek alapján a minta inhomogén eloszlású karbon tartalmát 0,20 és 0,85% közötti értékekre, átlagosan 0,60%-osra lehetett becsülni. Optikai emissziós spektrométerrel (OES) 0,35 és 0,42%-os C-tartalmakat lehetett detektálni.



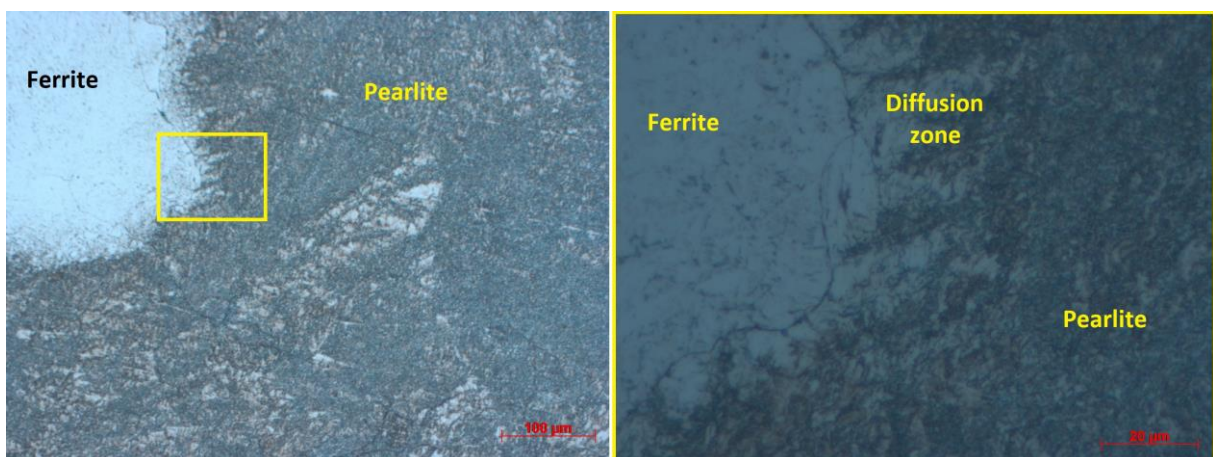
3. ábra: Az 1. minta jellemző mikroszerkezetei, ferrit-perlites szerkezet (balra) és szekunder cementit perlites szerkezetben (jobbra).

Fig. 3.: The structure of sample 1. with ferritic-pearlitic microstructure (left) and secondary cementite in pearlitic structure (right).



4. ábra: Az 1. mintában talált Widmanstätten-típusú ferrit (az ábrán WF jelzéssel).

Fig. 4.: Widmanstätten-type ferrite in sample 1. (WF notation)



5. ábra: A 2. minta jellemző szövetszerkezete: ferrit-globulitok és környezetük.

Fig. 5.: The structure of sample 2: ferrite globulites and the surrounding area.



6. ábra: A 2. mintában látható cementit-perlites, finomszerkezetű globulit.

Fig. 6.: The cementite-pearlite structure in sample 2. with fine globulites

2. minta

A 2. minta átlagos karbon tartalma sokkal nagyobb volt, mint az 1. mintáé. Egy pórusmentes felületen végrehajtott OES mérés 2,56%-os C-tartalom értéket adott. A minta jellemző mikroszkópi képein 1. mintához képest sokkal nagyobb arányban találtunk perlitet, mégpedig nagyon finom szerkezettel. A perlites területben apró szemcsés tiszta ferrites térfogatok záródtak be. Az **5. ábrán** jól látható az a határ, ami elválasztja egymástól az egyes részeket – ez tapasztalható volt az 1. minta esetében is – azaz a ferrit-globulit és a perlit más-más direkt redukációs folyamat következménye. Erre utal az is, hogy a feltételezett magas hőmérséklet ellenére a diffúziós zóna kiterjedése a ferrit-globulitok körül vékony (**5. ábra** jobboldali nagyítása). Ez azt mutatja, hogy a karbon diffúzió a perlites területből csak akkor indult meg, amikor a szemcsék szinterelődtek. A ferrites terület ausztenitesedési hőmérséklete jóval magasabb, mint perlitesé. Emiatt az ausztenit karbon koncentrációjának kiegyenlítődésére nem állt azonos idő rendelkezésre, ezért maradhatott így fent ez a fajta heterogén szerkezet. A ferrit-globulitok jelenléte nem volt általános a bucában, csak bizonyos mintákban lelhetők fel, kevés helyen, ebben a mintában viszont kiemelkedő számban fordultak elő. A globulit szemcse szerkezete arra utalt, hogy a karbon a globulit szinte teljes térfogatába bediffundált vélhetően kohósítás során, ez eredményezte apró szemcsés jellegét is.

Ebben a mintában is találtunk cementit-perlites szövetet, amely a vizsgált bucaszelet teljes egészére jellemző volt. A 2. mintában az 1. mintához képest nagyobb perlithányadot lehetett találni, azonban itt is jellemző az ausztenit-szemcsehatáron keletkező cementitre a Widmanstätten-jelleg. A mintában megjelent egy, a vizsgált bucaszelet szinte

valamennyi mintájában több helyen, elsősorban megjelenő, ugyancsak általánosan jellemzőnek nevezhető szövetszerkezet: globulitokban kialakuló, finom cementit-perlit, illetve szögletes, szinte síklapokkal határolt cementit a perlitben (**6. ábra**). Ez a szövetszerkezet nem jellemző a kovácsolt vasanyagok mikroszerkezetére. Kialakulásának kinetikája jövőbeni kutatás tárgya lehet. A sok perlitet tartalmazó területeken kis mennyiségben, szekunder cementit formában is megtalálható a vas-karbid, viszont erre a mintára ez a megjelenési forma nem mondható jellemzőnek. A szekunder cementit ugyancsak az ausztenit hülésekor alakult ki. Az alapszövetéhez képest sokkal nagyobb volt a karbon tartalma, ezért kialakulásakor a karbon környezetéből elvonja, így jelenhetett meg mellette a ferrit az ilyen jellegű területeken.

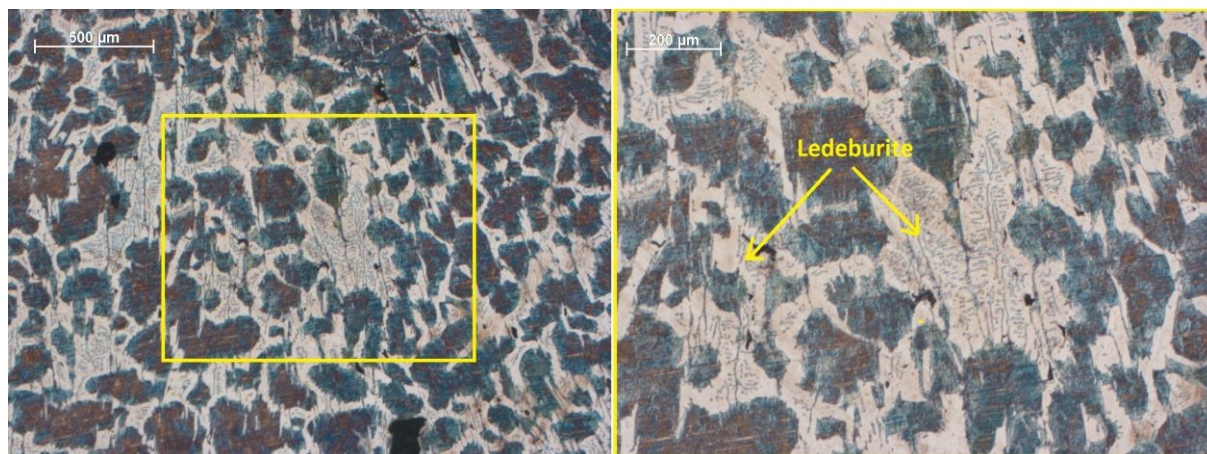
A perlit rendkívüli finomsága miatt indokolt SEM-EDS vizsgálat kimutatta, hogy a perlit lemezes jellegét néhol már közel szemcsés jelleg váltja fel. Ezt a finom perlites szerkezetet a nagy karbon tartalom és az említett Widmanstätten-szerkezetet létrehozó, relatíve gyors lehűlés okozta.

3. minta

A 3. minta mikroszerkezete nagyrészt szintén a vizsgált bucaszeletre általánosan jellemző cementit-perlites szövetszerkezetből állt. Azonban megjelent a bucában a ledeburit (ausztenit és cementit 4,3% C-tartalmú, metastabil eutektikuma, tkp. cementitbe ágyazott ausztenit kristályok, 2,06%-nál nagyobb C-tartalmú vasötvözetekben) is (**7. ábra**). A ledeburitra jellemző, hogy olvadékból kristályosodással keletkezik, ha a buca hőmérséklete tartósan 1147°C fölé volt. Természetesen a kialakuláshoz szükséges volt az is, hogy a fázisok és szövetelemek olyan koncentrációban és arányban legyenek jelen, hogy a lokális megolvadás megtörténhessen. A ledeburit és a környezetében lévő cementit háló rideg, kovácsolhatatlan anyagot eredményezett. A bucaszelet egészére azért ez nem volt általánosan jellemző, kiterjedt területen is csak egy mintában volt (10.) azonosítható a ledeburit. Az OES vizsgálat a 3. minta esetében 2,06% karbon tartalmat mért.

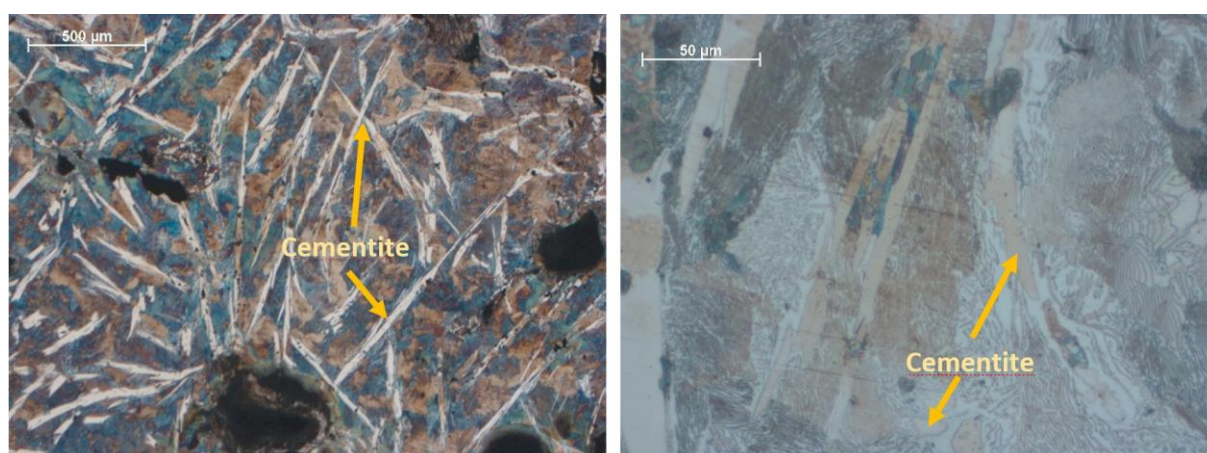
4. minta

A minta nagy részére szintén a kevés cementitet tartalmazó perlites szövet a jellemző. A 3. mintával közös határvonalhoz közel, kevés mennyiségben ebben a mintában is találtunk ledeburitot, a korábban tárgyalt, jellemző szövetszerkezetben. A nagy karbon tartalmú területen nagyméretű, vékony cementit lapok is képződtek (**8. ábra**), és itt is megfigyelhető ferrit a cementit lapok körül. OES vizsgálatokkal a mintán 2,37 és 3,31% közötti, tehát extrém magas karbon tartalmakat lehetett mérni a szokásos bucavas összetételekhez képest.



7. ábra: A 3. mintában talált ledeburitos szerkezet

Fig. 7.: Ledeburite found in sample 3.



8. ábra: A 4. minta nagy karbon tartalmú perlités területe, ahol megjelenik a szekunder cementit körül a ferrit

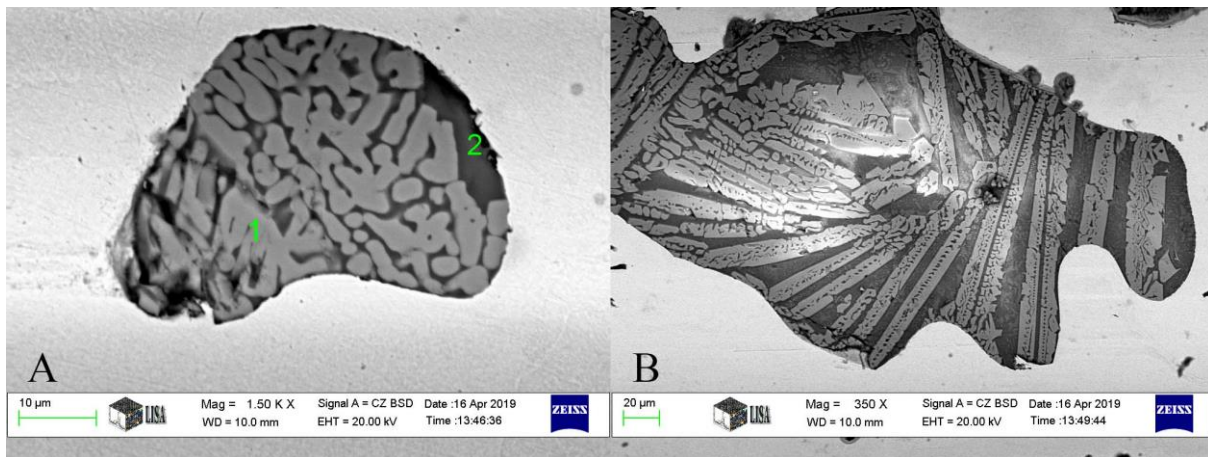
Fig. 8.: The high carbon content pearlite area of sample 4. where the ferrite appears around the secondary cementite

Csak ebben a mintában találtunk salakzárványt. Egyes zárvány optikai mikroszkópon látható dendrites jellege miatt SEM-EDS vizsgálat volt indokolt. A zárványok csak a relatíve kis karbon tartalmú, ferrites területekben voltak megtalálhatók, a nagyobb méretű gázbezáródások, pórusok határán, illetve közvetlen közelében.

A 4. mintában talált kisméretű zárványok alapvetően vas-szilikát jellegűek és minden bizonnyal még a kohósítás során keletkeztek, illetve annak technológiai örökségeként záródtak a fémbe. A visszaszórt elektronokkal készült, rendszám érzékeny SEM-képeken azok a területek, ahol főként nagyobb rendszámú elemek (pl. vas) találhatóak világosabbak, a relatíve kisebb rendszámúaké (pl. alumínium, szilícium) sötétebbek. „Agyvelőhöz” hasonló formációban található, dendritszerűen megszilárdult vas-oxidos, vas-szilikátos részek figyelhető meg a **9/A ábrán**, körülveve komplex Ca-Al-Fe-szilikát hálóval,

amely a 2 pontban lett elemezve. Tisztán vas-oxidos (FeO) részek, wüstit dendritok nem voltak jellemzők egyik zárványra sem. Pedig korábbi vizsgálataink, illetve szakirodalmi példák szerint ezek ferrites vas zárványaiban rendszerint előfordulnak (Török et al. 2018; Buchwald 2015).

A **9/B ábrán** lévő SEM-képen jellegzetes szerkezetet lehet megfigyelni; hosszú, világosszürke vas-szilikát lécek (véltetően fayalit – $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ – illetve az EDS átlagösszetételének relatíve nagy mangántartalma miatt Mn-tartalmú fayalit, bár ásványi összetétel elemzés nem készült) láthatóak, középen jellemző mintával, hálószerűen körbevéve nagy Ca- és Al-tartalmú, valószínűleg piroxén területekkel. Hasonló jellegű SEM-képpel többször is talákoztunk korábbi vizsgálati projektjeink során, amikor kora középkori buca kemence ún. folyósalakját vizsgáltuk. Ez a jellegzetes szerkezet a szakirodalomban többször is megjelenik (Buchwald 2005; Török et al. 2017).



9. ábra: A 4. mintában talált zárványokról készült SEM-BSE felvételek. Az A kép Az 1-es pontjában mért kémiai összetétel (tömegszázalékban): O: 27.33; Mg: 0.86; Al: 0.50; Si: 16.92; P: 0,25; K: 0.22; Ca: 1.20; Ti:0.21; Mn: 8.02; Fe: 44.48. A 2-es pontban mért kémiai összetétel (tömegszázalékban): O: 20.89; Mg: 0.19; Al: 13.61; Si: 25.81; P: 1.72; K: 5.13; Ca: 11.33; Ti: 0.97; Mn: 2.34; Fe: 18.01. A B képen látható zárványon mért átlagos kémiai összetétele (tömegszázalékban): O: 34.83; Mg: 0.90; Al: 3.37; Si: 21.51; P: 0.42; S: 0.20; K: 1.72; Ca: 2.92; Ti: 0.29; Mn: 6.42; Fe: 27.42.

Fig. 9.: SEM-BSE images of slag inclusions found in sample 4. The chemical composition of point 1 in the image A (in wt%): O: 27.33; Mg: 0.86; Al: 0.50; Si: 16.92; P: 0,25; K: 0.22; Ca: 1.20; Ti:0.21; Mn: 8.02; Fe: 44.48. The chemical composition of point 2 in the image A (in wt%): O: 20.89; Mg: 0.19; Al: 13.61; Si: 25.81; P: 1.72; K: 5.13; Ca: 11.33; Ti: 0.97; Mn: 2.34; Fe: 18.01.

The average chemical composition of slag inclusion in the image B (in wt%): O: 34.83; Mg: 0.90; Al: 3.37; Si: 21.51; P: 0.42; S: 0.20; K: 1.72; Ca: 2.92; Ti: 0.29; Mn: 6.42; Fe: 27.42.

A zárványokban alacsony foszfortartalmakat lehetett mérni, a vasban pedig egyáltalán nem volt említésre méltó foszfor, ami arra utal, hogy ez az egyébként a vas nagyobb keménységét, de egyben meleg törékenységét és rosszabb kovácshegeszthetőségét okozó elem mennyisége nem mérvadó a vasércben.

5. minta

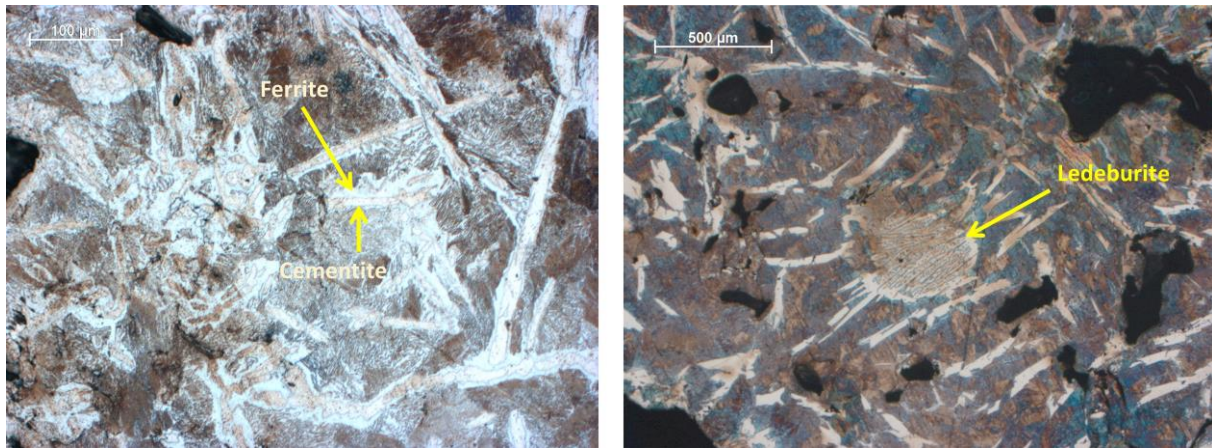
Az 5. mintában szintén a bucára jellemző cementit-perlites mikroszerkezet dominált. Nagyon kis mennyiségben ledeburit is megjelent, de a minta szerkezetére nem jellemző, csak lokálisan volt fellelhető. A buca ezen területén viszont markánsan megjelent a ferrittel körbevett szekunder cementit (**10. ábra**). Az, hogy éppen melyik módosulat látható a mikroszerkezetben, a lokális karbonkoncentrációtól függ. Relatív kisebb karbon tartalom mellett alakulhatott ki a ferrit, annak hatására, hogy a megjelenő cementit táblák megjelenése és növekedése elvonja környezetéből a korbont. Egy OES vizsgálat 2,39% karbon tartalmat állapított meg a minta mérésre alkalmas felületrészletén.

6. minta

Ez esetben szintén a már szokásos cementit-perlites mikroszerkezetet lehetett megfigyelni. Nagyobb területen vastagabb cementit lapok kisebb területen vékony, néhol Widmanstätten-jellegű cementit volt jellemző. A minta felületén végzett OES vizsgálattal 3,09% karbon tartalmat lehetett mérni, ami a legtöbb mintához hasonlóan igen magas érték.

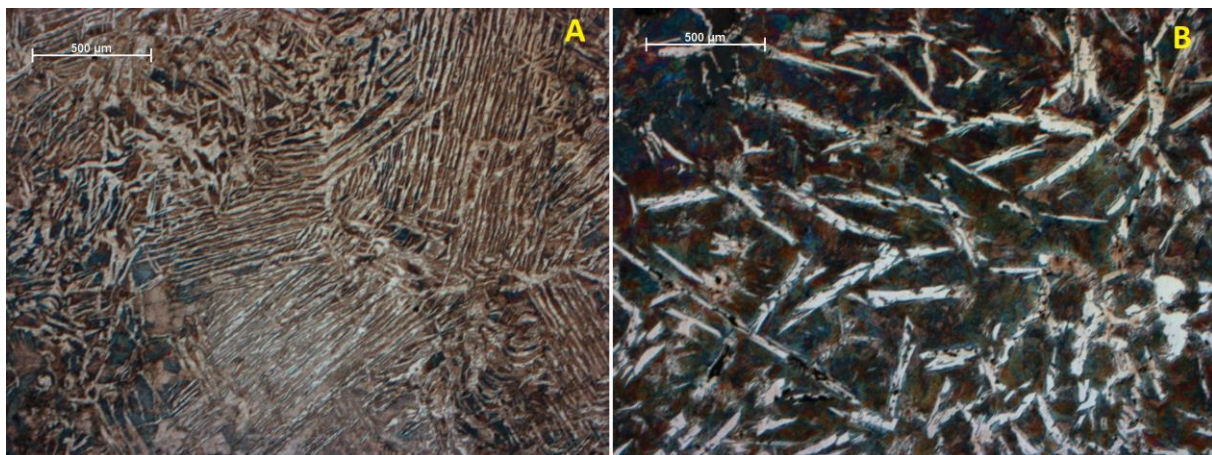
7. minta

A 7. minta – akárcsak az 1. minta – rendkívül heterogén szerkezetű volt. Ferrit-perlites terület (**11/A. ábra**) figyelhető meg cementit-perlites szövetszerkezetű részek (**11/B ábra**) mellett. Ebben az esetben is, úgy, mint az 1. mintában, a ferrit-perlites terület egybefüggően, egy nagyobb területen jelentkezett. A ferrit a minta csaknem a teljes vizsgált területén Widmanstätten-jellegű. A mintának a legtöbb vizsgált minta karbon tartalmához képest alacsonyabb értékét az optikai emissziós spektrométer mérései is igazolták; több kivitelezhető mérési ponton a karbon tartalom 0,60 és 1,06% közötti értéken volt detektálható, amely az 1. minta után a második legalacsonyabb C-tartalom értékeket jelenti.



10. ábra: Ferrittel körbevett szekunder cementit az 5. mintában

Fig. 10.: Secondary cementite surrounded by ferrite in the sample 5.



11. ábra: A 7. mintában található ferrit-perlites (A) és cementit-perlites (B) terület jellemző szerkezete

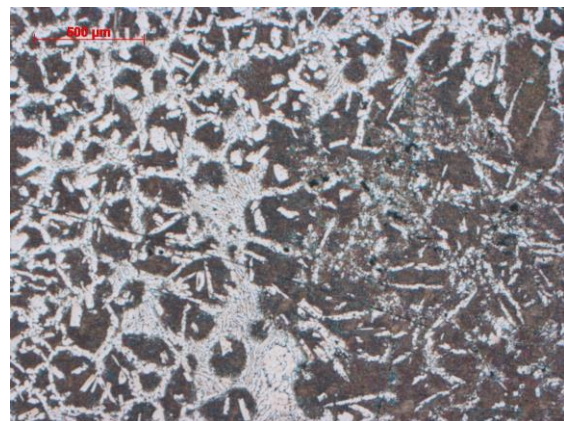
Fig. 11.: The characteristic ferrite-pearlite (A) and cementite-pearlite (B) structure of sample 7.

8. minta

A 8. minta szövetszerkezetére a legtöbb vizsgált minta esetében tapasztalttól kevesebb cementit volt jellemző, vékony, lemezes jellegű megjelenéssel. Ez a vizsgált terület kisebb karbon tartalmának eredménye, illetve emiatt szinte a teljes területen találtunk ferritet a cementit mellett. A minta felületén a pórusok miatt nem volt olyan részlet, ahol hiteles eredményt produkáló OES mérést lehetett végezni.

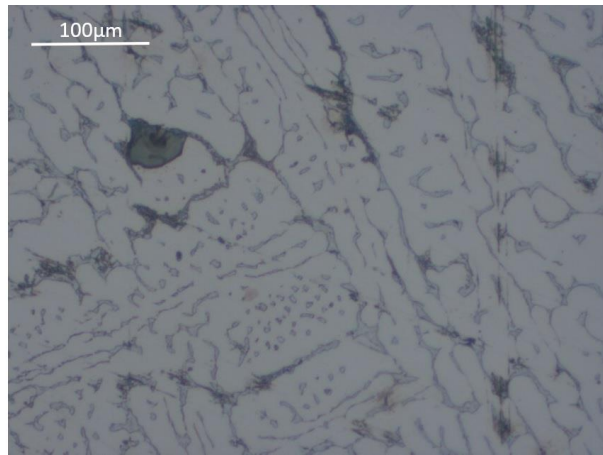
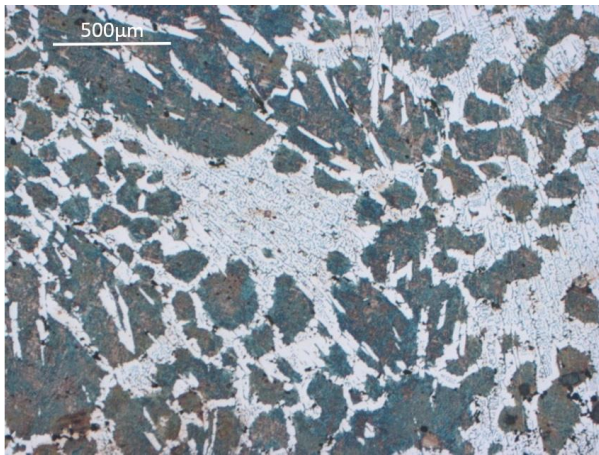
9. minta

A 9. minta szerkezetére a fentiekben rendszeresen említett cementit-perlites szövet volt jellemző. Azonban a minta néhány vizsgált részén apró szemcsés cementitet találtunk. A **12. ábrán** jól látható, hogy ezek a vegyületfázis szemcsék apró perlit szemcséket zárnak közre és ledeburit hoz nagyon hasonló szerkezet alakul ki.



12. ábra: A 9. minta szemcsés cementit területei, amelyek néhol perlit szemcséket is magukba zártak

Fig. 12.: The structure of sample 9 with cementite grains enclosing smaller pearlite grains



13. ábra: A 10. mintában található ledeburitos terület
Fig. 13.: The ledeburite area of sample 10

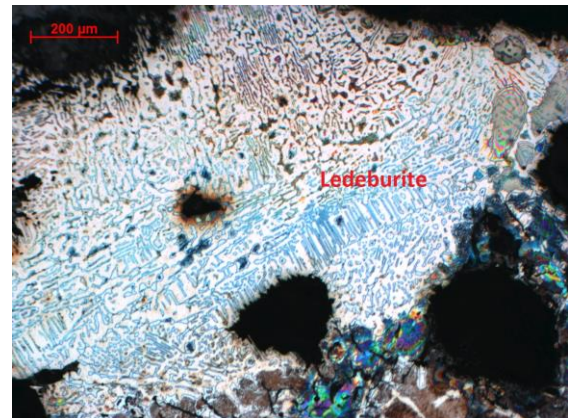
Amennyiben a cementit fázisok és a közre zárt perlit szemcsék aránya megegyezik az eutektikus fázisaránnyal, akkor az ilyen típusú területek megolvadnak 1147°C feletti hőmérsékleten. Ha az arány eltér, akkor az olvadék állapothoz akár sokkal nagyobb hőmérséklet is szükséges volt. Ez az oka, hogy ilyen típusú fázist is találtunk a vizsgált buca szeptemberben az adott mintákban bemutatott ledeburit mellett. A minta OES vizsgálata 2,62% karbon tartalmat detektált.

10. minta

A 10. mintára is a bemutatott általános cementit-perlites szövetszerkezet volt jellemző. Ebben a mintában találtunk a legnagyobb mennyiségben ledeburitot (**13. ábra**), amely itt viszont egységes, nagyobb területeket alkot, és nem a mintában elszórva található kisebb ledeburit-formációk. A ledeburit képződése ott figyelhető meg, ahol a cementit nagy területre terjed ki, amely szintén alátámasztotta a 9. mintánál említett kialakulási formát. A minta OES vizsgálata alkalmával a buca valamennyi mérése között a legnagyobb, 3,24%-os karbon tartalom volt mérhető.

Az 1971.106.22. vasbucából kivágott minta vizsgálati eredménye

Mivel az 1971.106.21. leltári számú buca (B1) karbon tartalmát, szövetszerkezetet és zárványsűrűséget tekintve teljesen atípusos eredményeket hozott, mindenképpen indokolt volt egy másik vasbucából (ltsz. 1971.106.22., B2) is mintát venni. A minta jellemző szövetszerkezetét a **14. ábra** mutatja. Az 1971.106.21. számú bucánál általánosnak bemutatott cementit-perlites szövetszerkezet alapján véve ebben a mintában is megtaláltuk. Ami különlegessé tette a mintát, az a nagy kiterjedésű ledeburit és a cementit-perlites területben található kis mennyiségű grafit.



14. ábra: 1971.106.22 leltári számú vasbucából kivágott minta optikai mikroszkópos felvétele

Fig. 14.: Optical microscopy image of sample cut from iron bloom No. 1971.106.22

A grafit kristályos elemi karbon vagy bomlástermék, alapvetően az öntöttvasaknál van jelentősége, tehát nem igazán illeszkedik a „klasszikus” buca eljárásba. A vas szakítószilárdságát rontja, csak akkor stabilizálódhat a rendszerben, ha priméren vagy eutektikus folyamatban ausztenittel együtt olvadék állapotról kristályosodik.

Ebben a mintában a cementit szemcsék jelenléte ugyanannak a folyamatnak az eredménye, mint a másik vasbucá (B1) mintái esetében. Azonban a nagy kiterjedésű ledeburit és a grafit jelenléte a bemutatott, alapvetően jellemző szövetszerkezet mellett arra utalt, hogy a redukció során helyileg megjelent az olvadékfázis, illetve egy semi-solid állapotban végbemenő reakció feltételezhető. A reakció kinetikájának pontos leírása további vizsgálatok célja lehet.



15. ábra: Az „A” jelű kovácsolt minta mikroszerkezetéről készült mozaik felvétel

Fig. 15.: Mosaic image of the microstructure of forged sample „A”

Az értékelésnél mindenképp figyelembe kellett venni, hogy a mintát a buca sarkából, felületének közeléből választottuk le, és ez a rész jobban ki volt téve a magas hőmérsékletnek és a faszén karbonjának.

A kovácsolási próbák eredményei

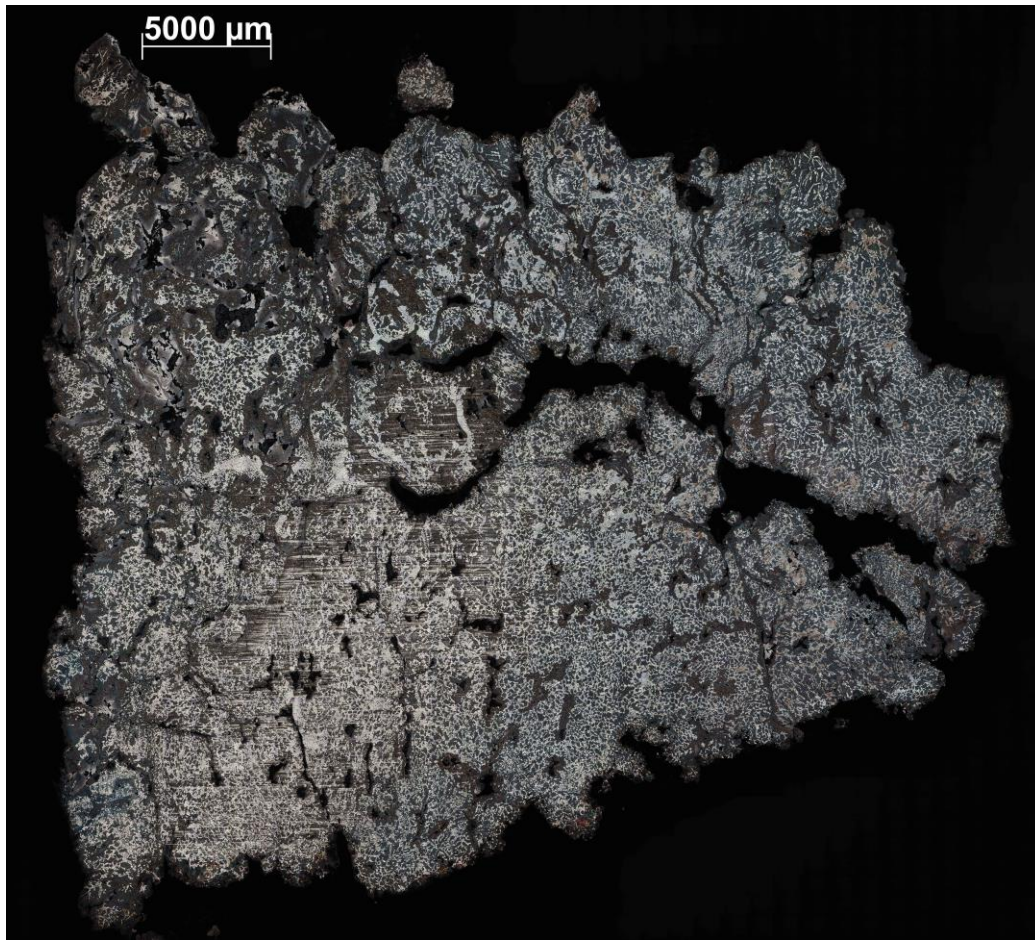
Az **2. ábrán** látható vasbuca szelet azon részéből, amelyik megmaradt a tíz említett minta kivágása után, három, kovácspróbára alkalmas részletet választottunk le (A, B és C minták). A minták elkészítésénél a minimális szélességet 20 mm-ben határoztuk meg. A minták hosszára a lehető legnagyobb méretet választottuk, hogy a minta manipulációja biztonságos legyen. A mintákat 900°C-ra hevítettük villamos fűtésű kemencében. Hevítés után 30 percet hagytunk a minták átmelegedésére. A kovácsoláshoz Beche gyártmányú léghalapácsot használtunk. A medve tömege 75 kg, a maximális ütési energia 1090 Nm volt. A kalapács maximális lökete 350 mm, másodpercenként 200 ütésre képes. Ezzel a berendezéssel nagyon jól lehetett szimulálni a kalapáccsal végzett szabadalakító kovácsolást, azonban a levegő nyomásának szabályozásával az alkalmazott erő állandó értéken tudtuk tartani. A léghalapáccsal a mintákat folyamatosan ütöttük a minta vastagságának harmadáig (~3 mm) vagy amíg az el nem tört. Az első néhány ütésben csak kis alakítást végeztünk, az esetleges törést vizsgáltuk. Ha a minta nem tört az első kismértékű alakításoknál, akkor teljes energiával alakítottuk tovább azt. Minden egyes kovácsolt mintából, az ütés irányára merőlegesen, kisebb darabot fűrészeltünk ki metallográfiai vizsgálatra. A vizsgálatokat ugyanolyan minta-előkészítéssel, módszerekkel és berendezésekkel végeztük el, mint a bucából vett szeletek esetén tettük.

Az „A” minta bírta a kis mértékű alakításokat, majd a nagy erejű ütések során közel 3 mm vastagságnál tört el. Nagy zárványokat találtunk a mikroszerkezetben, amelyek mentén az anyag fel is

repedt. Nemcsak a zárványok, hanem a mikroszerkezeti elemek is kirajolták a folyási vonalakat. Ez annak köszönhető, hogy az egyes területek nem ugyanazon mértékben alakíthatók. A több karbidot tartalmazó térfogatok erősebben keményednek. A szerkezetben dominált a karbidos-perlites térfogat. Zömében egyedülálló karbidok és kisebb csoportok alkották ezt a térfogatot. Ez a kép alsó és felső sávjában található. A szelvény középső sávjában zömében tisztán perlites mikroszerkezetet látunk, amiben néhol, főleg a zárványok közelében kis mennyiségű ferrit is látható. Emiatt volt ennek a területnek az alakváltozása nagyobb. A repedések részben a zárványok, részben a két különböző térfogat alakváltozási különbsége miatt alakultak ki, ami végül a darab töréséhez vezetett. (**15. ábra**).

A „B” minta megfelelően alakítható volt. Ebben a mintában a karbid-perlites térfogat dominált, de túlnyomórészt perlitet tartalmazott. A felvételen jól látható, hogy a kevesebb karbidot tartalmazó szövet jobban alakítható. A mikroszerkezetben itt is látható a felrepedezés, ami ugyancsak zárványok és nagy alakváltozási különbségek miatt alakultak ki. Ebben a mintában is megfigyelhető az említett ferritháló kialakulása. Maga a mikroszerkezet emiatt a kialakult ferritháló miatt jobban alakíthatóvá vált ugyan, azonban a felrepedezett mikroszerkezet kérdésessé teszi a kovácsolt anyag felhasználhatóságát.

A „C” minta az első néhány, kis erejű ütés során darabjaira tört. A kovácsolt mintákból mintát fűrészeltünk metallográfiai vizsgálatra. A teljes mintáról mozaikfelvételeket készítettünk, hogy mind a szövetelemek jellegzetessége, mind az eloszlásuk jól látható legyen. A „C” mintában a karbid fázis dominál (**16. ábra**). Csak kis mennyiségű egybefüggő perlites terület találtunk. A karbidos területben hiába alakult ki az említett kismértékű ferritháló, a zömében karbidos fém alakíthatatlan maradt. Ebből kifolyólag az első alakításoknál el is tört a minta.



16. ábra: A „C” jelű kovácsolt minta mikroszerkezetéről készült mozaikfelvétel

Fig. 16.: Mosaic image of the microstructure of forged sample „C”

A kovácsolási eredményeket tekintve megállapítottuk, hogy azok a minták is, amelyeket alakítani tudtunk, a kovácsolás során felrepedtek, annak ellenére, hogy nem törtek. A legkisebb karbidmennyiségű minta közepesen volt kovácsolható, amíg a másik két minta nem vagy nehezen. A buca mikroszerkezetének részletes vizsgálatát is figyelembe véve megállapítottuk, hogy a bucavas, mint alapanyag vagy egyáltalán nem, vagy nehezen alakítható, de semmiképp nem tekinthető jól felhasználható alapanyagának.

Konklúzió

Az 1971/106/21 leltári számú vasbucából levágott, mintegy 10 mm vastag szeletből tíz darab mintát vágunk ki, és azok mikroszerkezetét vizsgálatuk. Megállapítottuk, hogy a buca általános mikroszerkezete alapvetően cementitből és perlitből áll. A nagy vizsgált felület ellenére csak egy mintában találtunk zárványokat, azokat is szinte teljesen ferrites területekben, pórusok mellett. A bucaszelet szerkezete heterogén, két mintában találtunk ferrit-perlites kiterjedt területet (1. és 7. minta) relatíve alacsonyabb karbon tartalommal. A többi területen a karbon tartalom lényegesen nem tért el a buca-

szelet egésze szempontjából átlagostól, amely viszont a vaskori, római kori és kora középkori vasbucák ismert karbon tartalmaihoz képest nagyon nagyoknak mondható (2,5–3%).

A karbon tartalmat optikai emissziós spektrométerrel meghatározni nem volt könnyű feladat, mivel a csiszolatok felszíne gyakorlatilag be volt borítva pórusokkal, üregekkel, ami a szikra- vagy plazmagerjesztést ellehetetleníti, vagy legalábbis megnehezíti. Mindazonáltal a rendszeresen 2% feletti érték igen magas, mondhatni extrém magas karbon tartalmat jelzett. Az említett, általunk vizsgált, salakzárványokban dús, korai középkori 9–10 kg-os bucák karbon tartalma 0,4–0,6% körüli, a próbaolvasztásainkon kohósított 1–2 kg-os vasbucák általában 0,1–0,4% karbon tartalmúak és csak ritkán haladták meg lokálisan a 0,6%-os karbont. A késő vaskori bucák esetében általában a minimálistól 0,7–0,8%-ig terjedő, esetenként 1,2–1,5%-os, a kevés megtalált római kori vasbucák esetében pedig 0,6–0,7%-os karbon tartalmat mutattak ki (Pleiner 2000).

Többnyire vastag, síklapokkal határolt cementitet találtunk a perlit mellet, azonban ahol a karbon

tartalom kisebb, ott vékony cementit lemezek alakultak ki. A ferrit minden esetben, illetve számos mintában a cementit is mutatott Widmanstätten-jelleget. Ez az ausztenit relatíve gyors hűléséből fakad, és arra utal, hogy a buca magas hőmérsékletről hűlt.

Egyes mintákban ledeburit volt található (cementit és ausztenit eutektikuma), amely csak olvadékból kristályosodik. Az olvadás ténye az egyes mintákon jól kivethető volt. Ahhoz, hogy az eutektikus összetételű terület megolvadjon, a buca hőmérséklete el kellett, hogy érje az 1147°C-ot. Ezt a hőmérsékleti tartományt más jelek is alátámasztották. Az apró szemcsés cementit – ami a lokális megolvadásokért is felelős – kialakulásának teljes kinetikája egyelőre nem tisztázott. Feltételezett keletkezési kinetika szerint magas hőmérsékleten ausztenit szemcsék képződtek a redukció során, amelyek a környezetükből elkezdtek felvenni diffúzió útján a karbonot. Amikor az ausztenit telítődik (~2% karbon tartalomnál), akkor a határán megkezdődik a cementit képződése és növekedése. A cementit – mint magas olvadáspontú vegyület – növekedése kristálytani síkokhoz kötött, ezért látjuk a metszeteken a nagy cementit szögletes szemcséit és lapjait. Ez a kötött növekedés az oka annak, hogy egyes cementit lapok akár több ausztenit szemcsét is átérnek/átérnek. A képződő cementit mérete, mennyisége erősen függ a karbon mennyiségétől és diffúziós útjától. Emiatt láthatunk a nagy lapok mellett csoportosult apró cementit szemcséket is.

A szekunder cementit képződése a telített ausztenitből, a cementit nukleációja miatt kinetikailag gátolt, így ahol a redukciós folyamat során a fent leírt módon cementit képződött, ott a lehülés miatt főléssé vált karbon a meglévő cementit lapokat, szemcséket növesztette, ezzel módosítva kissé a morfológiát is (lekerekedett, tagolt szemcsék/lapok keletkeztek). Azokon a részeken, ahol azonban kevés cementit képződött ilyen módon, vagy távol estek a karbon diffúziójához, ott szekunder karbid keletkezett. Az ausztenit szemcse telítettségének függvényében keletkezhet vagy nem keletkezhet ferrit réteg a szekunder cementit körül.

Ezáltal jelenleg két karbidképződési folyamatot azonosítottunk a mikroszkópi vizsgálat során, amelyből az első módozat képződési kinetikája a szakirodalomban tudomásunk szerint még nem publikált. Az archeometriai-archeometallurgiai vizsgálatok alapján az alábbi technológiai következtetéseket vontuk le:

Az igen nagy tömegű, vizsgált vasbucák metallurgiai folyamat, kohósítás termékei, megtalált formájukban egy darabban keletkeztek és nem szenvedtek el utólagos alakítást, tömörítést. Teljes

keresztmetszetükben jelentős számú gáz pórus, üreg tapasztalható.

A vaskori, római kori, de a középkori vasbucákhoz képest is nagyon magas karbon tartalmuk van, viszont ötvözőt, szennyezőt (pl. foszfor) nem tartalmaztak, és salakzárványt is csak alig.

A szövetszerkezete alapján az alapanyagot huzamosabb ideig 1150–1200°C körüli hőmérsékleten kohósították, majd relatíve gyorsan, de nem edzésnek megfelelő gyorsasággal hűlt.

Az eljárás technológiáját illetően elméletileg ugyan elképzelhető primer kohósítással nagy karbon tartalmú vas előállítására buca kemencében (Wrona 2013), viszont ebben az esetben – figyelembe véve a korabeli buca eljárásra jellemző 15–20%-os hatékonyságú vaskihozataalt és a fenékpusztai bucák egyenként 60 kg körüli tömegét – igen nagy tömegű, több száz kg érc egyszeri kohósítására volt szükség, ráadásul huzamosan relatíve magas hőmérsékleten és hosszú időn keresztül, hogy ilyen extrém magas átlagos karbon tartalmú primer terméket eredményezzen, nem beszélve a salakszennyezőktől szinte teljesen mentes anyagszerkezetről.

Elképzelhető viszont, hogy korábban készült vasbucákat, azok darabjait, maradékait kohósították újra, így a kiinduló anyag gyakorlatilag már fémes, vagy nagyrészt fémes is lehetett. Ez a technológia indokolhatja a szokatlanul nagy karbon tartalmat, ráadásul magyarázat lehet az igen kisszámú salakzárványra is, és természetesen ez az eljárás így relatíve kisebb térfogatú adagvezetéssel, kevesebb salakkal járna, mint a pusztán ércalapú.

Mindenesetre valószínűleg egy mennyiség növelésére irányuló, innovatív törekvéstről lehet szó a technológiát illetően. Faszenet és – a bucák méretéből adódóan – feltehetően időt nem sajnálva minél több alapanyagot akartak nyerni a kemencéből, de ez a minőség rovására ment. Eredményként olyan magas karbon tartalmú vasbucát kaptak, amelynek ledeburitos szerkezete miatt a buca térfogatának jelentős része a kovácstűzhelyen izzítva vagy törlik, vagy 1147°C feletti hőmérsékleten pedig egyszerűen megolvad, mint a nyersvas.

A kovácspróbák alapján a bucáknak csak a ferrites részei alakíthatóak, a többi csak kis mértékben, vagy egyáltalán nem. Így a bucák térfogatának nagy része a jellemzően magas, néhol kiugróan nagy karbon tartalom miatt feltételezhetően nem igazán alkalmas kovácsolásra, képlékenyalakításra, főként nem használhatók finomabb szerkezetű, vékonyabb keresztmetszetű (pl. éles, hegyes) tárgyak készítésére. Valószínűleg ezért is dobták egy kupacban félre az öt bucát a kovácsműhelyben.

Szerzők tudományos közreműködése

Török Béla Kutatásvezetés, Kísérletvezetés, Eredeti kézirat. **Barkóczy Péter** Kutatásvezetés, Kísérletvezetés, Eredeti kézirat.

Köszönetnyilvánítás

A nagyméretű vasbuca szelet kivágásáért és feldarabolásáért a KIS Szerelő és Kereskedő Kft. munkatársainak, a SEM-EDS vizsgálatok elvégzéséért Kovács Árpádnak (Miskolci Egyetem, FKNI, ARGUM) tartozunk köszönettel. A karbon tartalmakat az ÓAM Ózdi Acélművek Kft. ARL-465 optikai emissziós spektrométerével mérték, szintén köszönet érte.

Irodalom

BUCHWALD, V.F. (2005): Iron and steel in ancient times. *Historisk-filosofiske Skrifter* **29** The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen 96–99, 127, 136.

GÖMÖRI, J. (1979): Jelentés a nyugat-magyarországi vasvidék régészeti kutatásáról II. Meldung über die Forschungen der Fundortedes west-ungarischen Eisenerzgebiete im Komitate Győr-Sopron II. Die Ausgrabung in Kányaszurdok und die Fragederge spaltenen Eisenluppen aus Sopron (Ödenburg). *Arrabona* **21** 59–86.

GÖMÖRI, J. (1981): A korai vasolvastzó kemencék és az ékelt vasbucák kérdése. In: GÖMÖRI, J. (ed.): *Iparrégészet – Égetőkemencék, Industrial Archaeology – Kilns and furnaces*. Veszprém, 109–121.

GÖMÖRI, J. (2018): Technológia-kontinuitási kérdések a somogyi vasvidék „izzó” vasbucái fényében. In: VARGA, M. & SZENTPÉTERI, J. (eds.): *Két világ határán*. Kaposvár, Rippl-Rónai Megyei Hatókörű Városi Múzeum, 77–87.

HEGEDŰS, Z. (1961): A diósgyőri Központi Kohászati Múzeum és a soproni Liszt Ferenc Múzeum vasbucáinak kohászattörténeti vonatkozásai. *Történelmi Szemle* **1961/4** 94–106.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. (2015): Inner fortifications and the Late Roman Defensive System in Pannonia (4th/5th c. AD) – some remarks. In: VAGALANSKI, L. & CHARANKOV, N. (eds.): *LIMES XXII*. Proceedings of the 22nd Congress of Roman Frontier Studies (Ruse 2012) Sofia, National Archaeological Institute NAIM-BAS, 119–125.

HEINRICH-TAMÁSKA, O. & SZABÓ, M. (2019): Late Antique Fortifications in Pannonia: A Landscape Archaeological Approach. In: FARKAS, G. I., NEMÉNYI, R. & SZABÓ, M. (eds.): *Visy 75 – Artificem Commendat Opus*, CLIR Kutatóközpont, Pécs, 208–231.

PLEINER, R. (2000): Iron In Archaeology – The European Bloomery Smelters. *Archeologický ústav AV ČR*, Praha pp. 262–263.

ROZSNOKI, Zs. (1979): Nyugat-magyarországi vasbucák fémtani vizsgálata. *Arrabona* **21** 87–107.

RUPNIK, L (2013): Eisenfunde aus ausgewählten Befunden der Ausgrabungen bis 2002 in Keszthely-Fenekpuszta. In: HEINRICH-TAMÁSKA, O. (ed.): Keszthely-Fenekpuszta: Katalog der Befunde und ausgewählter Funde sowie neue Forschungsergebnisse. Budapest / Leipzig / Keszthely / Rahden Westf. *Castellum Pannonicum Pelsonense* **3** 443–560 here cat. No. 2232/1-21.

SÁGI, K. (1979): A fenékpusztai V. századi vasbucák történeti háttere. *Arrabona* **21** 113–115.

TÖRÖK, B., BARKÓCZY, P., KOVÁCS, Á., KRISTÁLY, F., BÁNHIDI, O., KREITER, A., SKRIBA, P., PETŐ, Á., GYULAI, F. & SALÁTA, D. (2017): Avar kori vasművesség az interdiszciplináris kutatások tükrében – Zamárdi-Kútvolgy és Kaposvár-Fészerlak leleteinek archeometriai vizsgálatai. *Archeometriai Műhely* **XIV/3** 185–202.

TÖRÖK, B., BARKÓCZY, P., KOVÁCS, Á., KÖLTŐ, L., FEHÉR, A. & SZÓKE, M. B. (2018): Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata. *Bányászati és Kohászati Lapok*, Kohászat, Budapest **151/3**, 1–4.

TÖRÖK, B., GÖMÖRI, J., BARKÓCZY, P., HEINRICH-TAMÁSKA, O. & RUPNIK, L. (in press): Iron blooms from the Late Antique Castrum of Keszthely-Fenekpuszta: new results about old finds. In: HEINRICH-TAMÁSKA, O. et al., (eds.): *New Investigations in Keszthely-Fenekpuszta: Landscape Archaeology and Natural Sciences. Neue Forschungen in Keszthely-Fenekpuszta: Landschaftsarchäologie und Naturwissenschaften. Castellum Pannonicum Pelsonense* **9**.

VISY, Zs. (2018a): Some Considerations on the Late Roman Fortifications of Inner Pannonia. In: SOMMER, C. S. & MATEŠIĆ, S., (eds.): *Limes XXIII*. Proceedings of the 23rd International Congress of Roman Frontier Studies Ingolstadt 2015 Akten des 23. Internationalen Limeskongresses (Ingolstadt 2015). *Beiträge zum Welterbe Limes*. Mainz, Sonderband **4/I**, 437–443.

VISY, Zs. (2018b): A pannóniai késő római “belső erődök”. *Archeologiai Értesítő* **143** 233–246.

WRONA, A. (2013): The production of high carbon steel directly in bloomery process: theoretical bases and metallographic analyses of the experiments results. *EXARC Journal* **2013/2** 1–16. <https://exarc.net/ark:/88735/10112>