



Dr. Török Béla

ARCHEOMETALLURGIA

Miskolci Egyetem
2013

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujsechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Dr. Török Béla, PhD
egyetemi docens

ARCHEOMETALLURGIA

A digitális tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0071 számú, *Kompetencia alapú, korszerű, digitális komplex tananyagmodulok létrehozása és on-line hozzáférésük megvalósítása fémtechnológiákhoz kapcsolódó felsőfokú műszaki képzési területeken* című projekt keretében készült

Lektorálta:

Dr. Sziklavári János, DSc.
címzetes egyetemi tanár

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	3
Előszó	5
1. AZ ARCHEOMETALLURGIA, MINT ÚJ TUDOMÁNYÁG DEFINIÁLÁSA, TEVÉKENYSÉGI TERÜLETEI	7
2. AZ ARCHEOMETALLURGIA TUDOMÁNYTÖRTÉNETE HAZÁNKBAN, NEMZETKÖZI SZERVEZŐDÉSEI, SZAKIRODALMA	9
2.1 Magyarországi tudomány- és kutatástörténet	9
2.2. Nemzetközi szerveződések és az archeometallurgia szakirodalma	16
3. MŰSZAKI VIZSGÁLATOK ALAPVETŐ SZEREPE, JELLEMZŐI AZ ARCHEOMETALLURGIÁBAN	20
3.1. Régészeti lelőhelyek, leletek archeometallurgiai vizsgálati elve, előkészítése	21
3.1.1. A lelőhelyek előzetes vizsgálati módszerei	22
3.1.2. Ásatás	23
3.1.3. Mintagyűjtés, mintakiválasztás	32
3.2. Kémiai analitika az archeometallurgiában	33
3.3. Ásványi összetétel elemzések	36
3.4. Archeometallurgiai leletek anyagszerkezeti vizsgálatai	38
4. A NEM-VAS FÉMEK ELŐÁLLÍTÁSA, ALAKÍTÁSA, ÖNTÉSE A RÉGÉSZETI LELETEK FÓKUSZÁBAN	45
4.1. Bevezetés a réz és ötvözetei archeometallurgiájába	46
4.1.1. Réz- és bronztechnológia a kőrézkorban és az ókorban	47
4.1.2. Korabeli bronzöntési technológiák	58
4.1.3. Kutatási-vizsgálati lehetőségek, módszerek a réz és ötvözetei archeometallurgiájában	64
4.2. Bevezetés az ón, ólom, ezüst és arany archeometallurgiájába	68
4.2.1. Ón	68
4.2.2. Ólom, ezüst és arany	69
5. A VAS ARCHEOMETALLURGIÁJA	78
5.1. A vaskohászat korai és középkori technikatörténete	78
5.1.1. A vas használatának és kohászatának kezdete és elterjedése	79
5.1.2. Vaskohászat a római kori és a korai középkori Európában	83
5.1.3. A Kárpát-medence középkori vaskohászata	86
5.1.4. Az indirekt eljárás kialakulása és elterjedése	90
5.2. A bucakemencék típusai	94
5.2.1 Kora középkori bucakemencék a Kárpát-medencében	98

5.3. A korabeli vaskohászat jellemző régészeti objektumai leletei és azok műszaki vizsgálatai.....	104
5.3.1. Ércetek.....	105
5.3.2. Faszén és mészkő	107
5.3.3. Ércpörkölő gödrök.....	108
5.3.4. Műhelygödrök, kemencék és tartozékaik.....	109
5.3.5. Salakok	114
5.3.6. Vasbucák	123
5.3.7. Újraizzító tűzhelyek és kovácsműhelyek	125
5.3.8. Vastárgyak.....	127
5.4. A középkori bucakemencés eljárás technikája, jellemző folyamatai	129
6. IRODALOM	137
7. TESZTFELADATOK	Hiba! A könyvjelző nem létezik.

Előszó

Az archeometallurgia a korabeli fémtechnológiák történetét, az iparrégészetet és a műszaki tudományokat – legfőként a kémiai metallurgiát, metallográfiát és a kapcsolódó anyagvizsgálatokat – ötvöző, relatíve fiatal, világszerte dinamikusan fejlődő, hangsúlyozottan interdiszciplináris tudományág és kutatási terület. Szervezett egyetemi műszaki oktatásban az archeometallurgia hazánkban először 2007-ben jelent meg a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán egy bevezető jellegű tárgy formájában (*A vas archeometallurgiája és magyarországi ipartörténete*), ezen jegyzet szerzőjének előadásában. A nem sokkal ezután *Bevezetés az archeometallurgiába* címmel folytatódó, a tárgyalat fémeket illetően kibővített, tematikáját tekintve viszont még inkább alapozó jellegűvé alakított BSc-tárgy megfelelő bevezető, egyben orientáló szerepet tölt be az érdeklődő anyagmérnök hallgatók körében, a 2011/12-es tanévtől választható *Archeometallurgia* MSc. kiegészítő szakirányt illetően. A mesterszak kiegészítő szakiránya az Archeometallurgia I. és II. tantárgyak mellett külön tárgyak keretében foglalkozik a kapcsolódó régészeti vonatkozásokkal, leletvizsgálatokkal és rekonstrukciós kísérletekkel. A specializáció és a tudományos kutatási lehetőségek folytatásaként kidolgozás alatt van a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karának Kerpely Antal Anyagtudományok és –technológiák Doktori Iskolájában a *Rekonstrukció archeometallurgia* című tárgy.

Ez a jegyzet – elektronikus formában – anyagmérnök és kohómérnök hallgatók számára készült, azzal a szándékkal, hogy mind az alapképzés, mind a mesterképzés, de akár a doktori képzés fent említett tárgyai kapcsán jól használható legyen. Mindazonáltal a jegyzet régész- és történész-, de a felhasznált ércek és keletkezett salakok kapcsán akár geológus, ásványtanos hallgatók számára is hasznos olvasnivalóként szolgálhat kapcsolódó tanulmányaikhoz.

Az archeometallurgiai kutatásokhoz, tudományterületekhez tartozó legfontosabb hazai és külföldi szervezetek, szerveződések, illetve az alapvető, összefoglaló jellegű szakirodalom bemutatásán túl az alapképzésben részt vevő hallgatók vázlatos, ugyanakkor átfogó képet kapnak a különböző fémek előállításával, alakításával kapcsolatos korabeli technikákról, technológiákról, azok archeometallurgiai jellegű vizsgálati lehetőségeiről. Az anyagmérnök és kohómérnök mesterszakos hallgatók számára pedig a jegyzet speciális kiegészítő szakmai ismereteket nyújt, amely által a mérnökhallgatók interdiszciplináris jellegű tudást szereznek a fémtechnológiák korabeli történetéről, fellelhető emlékeiről, technológiájáról, kémiai metallurgiai vonatkozásairól. A jegyzet magába foglalja a vas- és fémelőállítás, -feldolgozás technológiáinak, tevékenységeinek, eszközeinek, anyagainak műszaki jellegű bemutatását, illetve az ehhez kapcsolódó régészeti vonatkozásokat, különös tekintettel az iparrégészeti leletekre, lelőhelyekre, az egyes fémek szempontjából régészetileg gazdag illetve fontos korszakokra, a Kárpát-medencére fókuszálva. Szintén sarkalatos feladata az előkerült leletek alapján általános, illetve egyedi technológiai vonatkozások megfogalmazása, illetve a régészeti emlékek műszaki vizsgálatainak egységes és speciális aspektusok szerinti megközelítése, tárgyalása, valamint az egyes fémek korabeli metallurgiájának, az eljárások, technológiák fizikai-kémiai paramétereinek rendszerezése, bemutatása. Ugyanakkor nem törekszik részletes, tagolt technológiatörténeti jellegű levezetésekre.

A kiegészítő szakirányt elvégző, leendő mérnökök hatékonyabban, célirányosabban részt tudnak venni a régészetet segítő műszaki, anyagvizsgálati munkákban, amelyre az igény

az utóbbi évtizedekben – az anyagvizsgálati lehetőségek, módszerek fejlődésével - már nem csak külföldön, de hazánkban is egyre intenzívebben jelentkeznek, illetve az egyre inkább elterjedő és rohamosan fejlődő kísérleti és rekonstrukciós régészeti kutatási projektjeiben is eredményesen be tudnak kapcsolódni. Ezáltal a mérnöki pályának egy új, ma még hazánkban kétségtelenül kissé exkluzív ható alternatívája tárul fel a friss diplomások előtt. Ezt a célt szolgálja az archeometallurgiához köthető műszaki vizsgálati módszerek – kémiai, anyagszerkezeti, ásványtani - bemutatása is.

A Miskolci Egyetemen szakítani kívánunk azzal a gyakorlattal, hogy a műszaki szakemberek által prezentált vizsgálati eredmények jórészt csak adatok halmazát szolgáltatja, illetve régészeti-technikai-történelmi szempontból nem eléggé hatékonyan kiaknázzható ismereteket közvetít a régészet, illetve a történelmi kutatás számára. A különböző tudományterületek szakemberei interdiszciplináris jellegű együttműködésének modell értékű példája a 2011-ben, a szerző vezetésével alakult Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportja (ARGUM – www.archeometallurgia.hu, www.argum.hu) amelyben metallurgus, anyagvizsgáló, régész és ásványtanos oktató-kutatók eredményesen működnek együtt és számos kutatási eredményüket tartalmazza többek között ez a jegyzet is.

Dr. Török Béla

1. AZ ARCHEOMETALLURGIA, MINT ÚJ TUDOMÁNYÁG DEFINIÁLÁSA, TEVÉKENYSÉGI TERÜLETEI

A régészetben sokáig meglehetősen mostoha sorsa volt a korai ipari technikákra utaló leleteknek. Gyakran előfordult, hogy fémelőállítási folyamatok melléktermékeit (salakok, ércdarabkák, kemencetöredékek) különösebb vizsgálatra alkalmatlannak, vagy értelmetlennek nyilvánították, gyakorlatilag ásatási szemét kategóriájában kezelték. Persze már a 19. század végétől voltak kivételek – amely leginkább a régész affinitásától függött – de a klasszikus iparrégészet először jellemzően az újkori ipari forradalom örökségeit kutatta, a múlt század első felétől. Mindazonáltal az újkori műhelymaradványok (különböző funkciójú kemencék, üveghuták, textilipari eszközök, stb.) tanulmányozása hagyományos régészeti eszközökkel történt, amely egyúttal a vizsgálódások határait is megszabták. A kezdeti iparrégészeti kutatások aztán időben visszafelé, a középkor, illetve még korábbi időszakok kapcsán is vizsgálódásra készítették a régészt a technikatörténettel összefüggő leletek vonatkozásában. Ezek tanulmányozása - általában minden nemű kapcsolható írásos emlék híján - egyre inkább a műszaki vizsgálatok adta lehetőségek igénybe vétele felé terelte a régészettudományt. Fokozatosan létrejött az archeometria tudományterülete, amely a vizsgált leletek jellemzőit, a vizsgálati célokat és módszereket tekintve egyre nagyobb mértékben bővült és rohamosan bővül ma is.

Az archeometrián belül kialakult egy speciális kutatási terület, amely a fémek előállításával, feldolgozásával, megmunkálásával kapcsolatos régészeti leleteket vizsgálja. A fémleletek mindig is kiemelt fontosságúak voltak az ásatásokon, de az eszközök kultúrtörténeti értéke, néha „kincs”-jellege mellett a múlt század közepétől kezdve a „Mi is ez?”, „Miből van?” kérdések mellett egyre gyakrabban, aztán rendszeresen megfogalmazódott a „Hogyan készült?”, „Hogyan, mire használták?” is. Ebből eredően a kutatások, vizsgálatok már nemcsak a leletek, lelőhelyek anyagi, szerkezeti vizsgálatára fókuszáltak, hanem előtérbe kerültek a különböző fémek előállításával, alakításával, öntésével, kezelésével kapcsolatos – évszázadokon át használt, de gyakran teljesen a múltba vesző - technológiák, technikák modern műszaki ismereteink és műszeres lehetőségeink segítségével történő minél részletesebb leírása, meghatározása, esetenként újra felfedezése.

Az eredendően régészeti-ipartörténeti jellegű érdeklődés bővülése, differenciálódása hozta létre az archeometrián belül ennek a bizonyos speciális kutatási területnek az archeometallurgiának a csíráit. Elmondható tehát, hogy az archeometallurgia az iparrégészet indíttatásából, illetve az ahhoz kapcsolódó archeometria talaján jött léte, azonban az archeometallurgia bizonyos tevékenységei idővel túlnőttek az archeometrián. Az egyre nagyobb volumenű vizsgált leletanyag, a vizsgálati módszerek, berendezések fejlődése egyre több műszaki területen dolgozó szakember munkáját tette bevonhatóvá, amíg az archeometallurgia komplex, önálló tudományterületté nem vált. Mindazonáltal, ha egy személyben létezik archeometallurgus, az nem csak régész, történész, nem csak mérnök, anyagvizsgáló, hanem valamilyen mértékben mindegyik területre kell, hogy legyen affinitása. Természetesen ilyen szakember még meglehetősen ritka és nem csak Magyarországon, éppen ezért kiemelt fontosságú – különösen ezen relatíve fiatal, de dinamikus fejlődő kutatási terület tudomány-szerveződési szakaszában – az egyes szakterületek képviselőinek egymás eredményeit értelmezni, hasznosítani tudó, egységes rendszerű együttműködése.

Már a fentiekből is kitűnik, hogy az archeometallurgia alapvető sajátossága az interdiszciplinaritás. Ez természetesen már kialakulásának jellegéből fakad; az egyes iparrégészeti ásatásokon előkerült, fémelőállítással és fémműveléssel kapcsolatos leletek korrekt definiálásához, értelmezéséhez több okból is szükségük volt-van a régészeknek műszaki anyagvizsgálatokra. Innen ered az archeometallurgia első tevékenységterülete, amely anyagfajták és vizsgálati módszerek alapján tovább tagozódik. Mindenek előtt, azonban célszerű tisztázni az archeometallurgia mára kialakult négy alapvető tevékenységi területét:

1. A fémelőállításhoz és fémfeldolgozáshoz direkt vagy indirek módon köthető régészeti leletek anyagvizsgálata, azok azonosítása, kémiai, ásványtani összetételének, makro- és mikroszerkezetének leírása, de ide tartozik a lelőhelyek szerkezetének vizsgálata is.

2. A korabeli szakmai tevékenységek elméletének, fizikai-kémiai, metallurgiai és technikai-technológiai jellemzőinek minél pontosabb megfogalmazása.

3. Korhúságra törekvő rekonstrukciós kísérletek, valamint laboratóriumi kísérletek, amelyekben a feltételezett korabeli fémelőállítási és fémalakítási technikát, technológiát illetve annak bizonyos jellemzőit lehet tanulmányozni, mérni, tesztelni.

4. Az archeometallurgiai vizsgálatok eredményeinek szinkronizálása különböző korszakok, népek metallurgiai-fémművességi kultúrájának történeti vonatkozásaihoz.

Jól látható az egyes tevékenységcsoportok logikai egymásra épülése, különösen a 2. és 3. pont esetében, amely egyúttal jelzi, hogy az archeometallurgia bizonyos szempontból már túlért a klasszikus archeometria keretein és a szintén fiatal kísérleti régészet területéhez közelít. Egy archeometallurgiai kutatócsapatban többek között régészeknek, ipartörténészeknek, metallurgusoknak, analitikusoknak, anyagvizsgálóknak, geológusoknak, ásványtani szakembereknek, de ezen kívül technikusoknak, sőt informatikusoknak is helye van.

A lelőhelyek tanulmányozására és a leletek anyagvizsgálataira – amelynek műszaki vonatkozásairól külön fejezet szól - épül rá az egyes fémek korabeli előállítási, feldolgozási folyamatainak elméleti megfogalmazása, illetve a használt technika, technológia leírása. Az archeometallurgia tevékenységkörei közül itt találkozunk a legtöbb feltételezéssel, bizonytalansággal. Gyakori az is, hogy különböző tudományterület szakemberei, a saját tudományuk elméleti számításaiból és gyakorlati tapasztalataiból kiindulva, ellentétes véleményen vannak. A legnagyobb bizonytalansági faktor természetesen abból ered, ami meghaladja a régészet határait, lehetőségeit: hol, milyen hőmérsékleten, mennyi ideig, milyen fizikai-kémiai-metallurgiai folyamatok zajlottak le és hogyan befolyásol(hat)ták azt technikailag, technológiailag a korabeli szakemberek, empirikus ismereteik alapján. Tipikus kérdéskörök e téren a korabeli nyersanyag- és segédanyag-felhasználási, termelékenység mutatók, vagy például az egyes kohósítási és alakítási technikák jellemzőinek meghatározása.

Amint a fentiekből is kitűnik, az archeometallurgia témakörébe sorolható nem csak a fémelőállítás, de a fémművesség (kovácsolás, öntés, ötvözés, stb.) tevékenységei is, amelyet a fémvizsgálatok, illetve egyéb speciális vizsgálatok (pl. kovácstűzhelyek, kovácssalakok, rézöntőminták tanulmányozása) egyértelműen predestinálnak.

Az archeometallurgia területéhez tartozó rekonstrukciós kísérletek gyökerei korábról erednek, mint gondolnánk. Természetesen az utóbbi évtizedekben egyre népszerűbb kísérleti

régészet e téren is megtette hatását, mindazonáltal a nagyipari kohászat berkeiben mindig is mutatkozott érdeklődés a régi technikák, technológiák gyakorlati felelevenítésére, nagyrészt szakmai hagyományörzés által vezérelve (pl. az újmassai őskohó helyreállítása és abban bemutató olvasztások). Kimondottan tudományos kísérleti alapú, lehető legrészletesebben korhű, archeometriai vizsgálatok eredményeit felhasználó, rekonstrukciós kísérletekről, illetve egyes jellemzőket, paramétereket vizsgáló, archeometallurgiai laboratóriumi kísérletekről igazából csak az utóbbi néhány évtizedben beszélhetünk (bár nem teljesen korhű kísérletre bukkanhatunk a múlt század közepétől, akár Magyarországon is).

Az eddig említett tevékenységeköröknek mintegy konklúziója, ugyanakkor „kiteljesítése” lehet, ha az egyes fémek technológiáival kapcsolatos archeometallurgiai vizsgálati és elméleti megállapítások segítségével történettudományi megállapításokat is lehet tenni. Ez manapság szakmailag még néha kényes kérdés, viszont dimenziója roppant változatos. Ide tartozik az egyes történeti népek, birodalmak fémkultúrája különbözőségének, fejlődésének történelemformáló hatása - mint átfogó kérdéskör – ugyanúgy, mint például az, hogy miben különbözhetett az avarok és a honfoglaló magyarok bucakemencéje, mennyi és milyen minőségű vasat tudtak a kalandozó magyarok előállítani egy kohósítás alkalmával, illetve hány fős sereghez mennyi fegyvervasat tudtak előállítani összesen évente.

2. AZ ARCHEOMETALLURGIA TUDOMÁNYTÖRTÉNETE HAZÁNKBAN, NEMZETKÖZI SZERVEZŐDÉSEI, SZAKIRODALMA

2.1 Magyarországi tudomány- és kutatástörténet

Az archeometallurgia tudomány- illetve kutatástörténetének kezdeti szakaszaként azt a relative hosszú intervallumot szokás taglalni, ami az utóbbi mintegy fél évszázad célirányos, szervezett és a modern vizsgálati technikát tekintve is megfelelően felvértezett, kifejezetten interdiszciplináris együttműködésen alapuló időszakát megelőzte. Már a 19. század első felében is készültek olyan régészeti jelentések szerte Európában, amelyek fémleletek, kemencemaradványok kapcsán készítéstechnikai kérdéseket fogalmaztak meg, illetve próbáltak ez irányú vizsgálatokat, kutatásokat végezni. Kezdetben a leggyakoribb szándék az anyagminőség és összetevők meghatározása volt – a kormeghatározás nem tartozik a szigorúan vett archeometallurgiai tevékenységek közé – és a 19 század végére, illetve a 20. század elejére a nagyüzemi gyárilipar rohamos fejlődése vonzásszerűen meg is teremtette azokat a metallográfiai és analitikai vizsgálati módszereket és technikát, amelyek az archeometallurgiai kutatások elődjénél elvileg alkalmazhatók voltak. A munkák koordinálását, az eredmények kiértékelését, felhasználását alapvetően a régészek végezték el.

A 20. század első évtizedéig Magyarország egyáltalán nem maradt el e téren Európától, amelyet minden bizonnyal olyan körülmények is inspiráltak mint a Selmecebányai Bányászati-Kohászati Tanintézet 1735-ös megalapítása, vagy az, hogy 1777-ben a Királyi Magyar Egyetemen már létezett fizikai és mechanikai múzeum is. A Magyar Nemzeti Múzeumban 1808-ban többek között technológiatörténeti osztály is volt a hazai ipar történetének bemutatására [2.1]. A korai kezdeményezések ellenére a 19. század második felére egyre inkább fokozódó, a Kárpát-medence őstörténete, illetve középkori története felé orientálódó régészeti ásatások, szakmai fórumok még szinte teljesen mellőzik a fémelőállítás témakörét vagy csak néhány, általában alig valamit mondó információ erejéig foglalkoznak

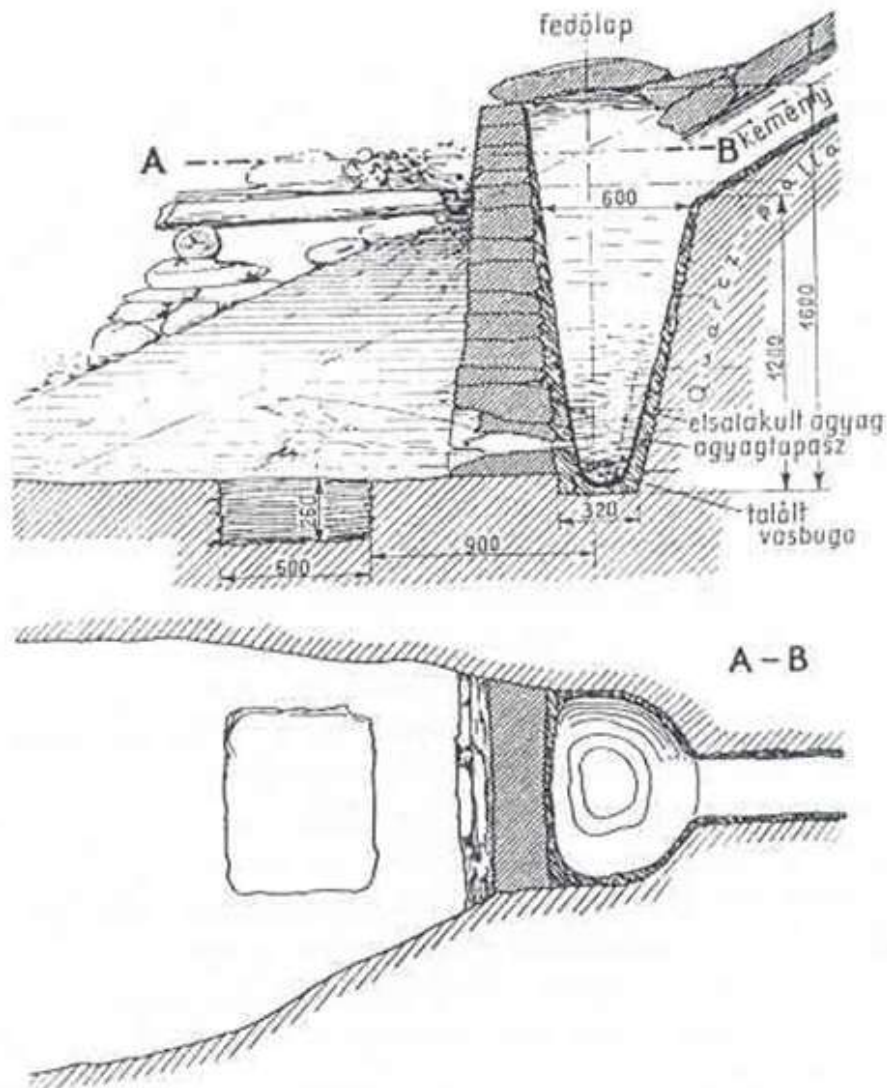
vele. A fémalakítással kapcsolatosan sem volt lényegesen jobb a helyzet, bár természetesen a színes- és nemesféméből, illetve vasból készült leletek összehasonlíthatatlanul nagyobb figyelmet kaptak, mint például a salak- és ércdarabok. A rendszerint ásatási melléktermékként kezelt salakleletek esetében sokáig általában még azt sem tisztázták, hogy mely fém előállításának metallurgiai folyamatainál keletkeztek, gyakran összekeverték a vassalakat és a bronzsalakot, de előfordult például, hogy nem tudták megkülönböztetni a salakokat a félkész termékektől, a vassalakat a salakos vasbucától, illetve a bronzsalakot a feldolgozatlan bronzrögöktől [2.2].

Mindazonáltal kohászattörténeti vonatkozásban alapvetően a rézalapú fémek (bronzok) olvasztásával, öntésével és a vas érceiből történő előállításával foglalkoztak, az utóbbival – főként a nagyobb volumenű ipari háttér indukálta érdeklődés hatására - korábban és hamarabb kibontakozó szervezethez. A legkorábbról fennmaradt hazai kohászatrégészeti megjegyzés 1854-ből, Kralovánszki Lászlótól származik, aki a munkácsi vasgyárral kapcsolatos ipartörténeti beszámolójában említi, hogy „majd minden mellékvölgyben található gazdag vastartalmú salak” [2.3]. A hírt tartalmazó kötet szerkesztője, Kubinyi Ferenc, régész-paleontológus, meghatározó személyiség volt a réz- és bronztárgyak kutatásának, vizsgálatának első hazai lépéseiben. Egy 1861-es írásában következetesen megkülönbözteti a réztárgyakat a bronztól, ennek kapcsán először említi az önt, mint ötvözőt, illetve elsőként számol be régészeti bronzleletek analiziséről, amely 1850-ben történt [2.4].

A 19. század második felében elszórtan, eseti jelleggel, egymástól függetlenül bukkannak fel kohászatrégészeti, illetve korai kohászattörténeti jellegű megfigyelések, híradások, különböző, gyakran téves fogalmi megnevezésekkel. A Gömör megyei Jolsva melletti Vashegyen talál például 1869-ben Liszkay Gyula salakhalmokat, amelyeket „primitív technika nyomainak” aposztrofál, majd két évre rá Majláth Béla a Liptó megyei Csemészen „bronzsalakokról”, a következő évben pedig Nyári Jenő Sőregen talált „érc-salakokról” ír [2.2]. Majláth 1871-es híradása egy olvasztótégely-darabként meghatározott lucskai kerámiatöredékről egyben valószínűleg az első hazai híradás, ami az ősi kárpát-medencei bronzkohászat technikájával foglalkozik [2.5]. A magyarországi bronzkori fémelőállítás kapcsolatosan sok kétely és bizonytalanság merült fel, annak ellenére, hogy báró Nyáry Jenő többször is említett ásatásokon előkerült, rézkohó-, öntőtégely- és öntőminta-maradványokat, illetve bronz félkész termékeket [2.6, 2.7]. A 19. század utolsó évtizedeiben azonban Hampel József bronzkori fémművességgel, ötvözéssel, öntéstechnikákkal kapcsolatos kutatásai, illetve Loczka József, a Nemzeti Múzeum vegyészének bronzleletek immár százalékos kémiai összetételét meghatározó elemzése jelentős mérföldkönek bizonyultak. Hampel inkább a bronzöntésre fókuszált, részletezte az egyes öntési eljárásokat, az öntőformák készítését, de kitért az alapvető hőkezelési és megmunkálási eljárásokra is [2.8, 2.9].

A több, vassalokról beszámoló híradás, megfigyelés után 1892-ben Kubinyi Miklós már három vasbucadarabot is talál az Árva megyei Krasznahorkán, egy eredetileg bronzlelőhelyen, amelyet kezdetleges vasolvasztás termékeinek tartott [2.10]. Bucakemencék maradványairól – azok nehéz korabeli beazonosíthatósága miatt – még említés szintjén is alig található információ a 19. századból, főként, ha szakmailag megkérdőjelezhetlent keresünk. Bár Lipp Vilmos 1875-ben a Vas megyei Gyepüfűzesen tíz, sorban elhelyezkedő, mintegy 1 méter magas, kúp alakú vaskohóról és a környéken található vassalak-darabokról számol be, korai vasolvasztónak nevezett kemencéről először 1896-ban készült rajz, amely az előző évben Gyaláron – ahol a beszámoló szerint „vaskövet”, vasbucát és salakot is találtak - feltárt kemencét ábrázolja. (2.1. ábra) [2.2] A kemencéről leírás nem maradt meg, csak az

említett rajz, amely már fenntartásokkal kezelendő rekonstrukciót ábrázol. Az sem teljesen tisztázott, hogy egyáltalán megtörtént-e a maradványok kiemelése és a budapesti millenniumi kiállításra történő elszállítása, vagy ott már csak egy gipszmásolat került bemutatásra, amiről aztán a rajz is készült. A lelet körül sok volt a támpont nélküli bizonytalanság, például a kemencét a 9. századra datálták, holott a helyi vasércbányászatot egyértelműen római korinak tartották [2.11, 2.12].



(2.1. ábra) A gyalári kemence rajza 1896-ból [2.2]

A 20. század első felében a korábbihoz képest ritkábban jelennek meg kifejezetten kohászatrégészeti hírek, beszámolók, ugyanakkor a technológiát és a datálást illető bizonytalanságok továbbra is jelentősek. Mindazonáltal néhány figyelemre méltó kutatás ebben az időszakban is történt. A korai vaskohászatot illetően 1908-ban, 1911-ben és 1936-ban Veszprémben találtak bucakemence maradványokat. Ezekből a két korábbi csak dokumentálatlan rövid hír formájában jelent meg, azonban az 1936-ban feltárt két kemencéből az egyiket (2.2. ábra) kiemelték és a veszprémi múzeumba szállították. Bár az ásatásról sem rajz, sem szakmai jelentés nem maradt meg, csak fényképek, a múzeumba szállított kemence méreteit, jellemzőit már aránylag jól dokumentálták [2.2].



(2.2. ábra) Az 1936-ban feltárt és kiemelt veszprémi bucakemence [2.2]

Nyugat-Magyarországon további lelőhelyek is említésre méltók ebből az időszakból. A Sopron melletti Harka-Kányaszurdokon vassalakot és egy téglából épített kemencét találtak a húszas évek elején, amelyet először római, majd később kelta korinak vélték. Részletes feljegyzések híján a leletek alapvető jellege, funkciója körül sok volt a bizonytalanság. Szintén a Nyugat-Dunántúlon, Kőszeg és Velem környékén kutatott évtizedekig Miske Kálmán. Publikációiban bronztárgyak metallográfiai és kémiai anyagvizsgálati eredményekeit is felhasználta [2.13] és 1929-ben részletes összefoglalást készített a környék bronz- és vasművességéről [2.14]. A 20. század első évtizedeiben Miskének a bronzkori leletanyag, illetve a bronzkori fémművesség körében elvégzett kutatások rendszerezésében elvégzett munkái meghatározó jellegűek voltak [2.15, 2.16].

Régészeti, publikációs és szervezeti szempontból az első igazi áttörést az 1950-es évek hozták a magyarországi kohászatrégészetben, amely voltaképpen akkor még szinkronban volt az európai trenddel. A politikai légkörhöz igazodva – „a vas és acél országa” – mindez a korai középkori vaskohászat emlékeinek kutatásában, illetve az ehhez kapcsolódó vizsgálatok terén bontakozott ki. Szervezeti, intézményi szinten ennek egyértelmű jelei voltak; 1949-ben Miskolc-Diósgyőrben megalapították a Központi Kohászati Múzeumot (KKM), amelynek épülete 1970-től Miskolc-Felsőháromban van. Az első időszak kiállítását 1958-ban rendezték „A diósgyőri vasgyár 90 éve” címmel, az állandó tárlatot biztosító múzeumot pedig 1960-ban avatták fel a Lenin Kohászati Művek vendégházában. A múzeummal szoros együttműködésben, 1956-ban Kiszely Gyula szervezésével, 22 alapító taggal Kohászati Történelmi Bizottság (KTB) alakult. Már korábban is létezett az ún. Múzeumi Bizottság és ennek tagjaként Kiszely úgy értékelte a helyzetet, hogy az országban több helyen, többféle szakember foglalkozik a vaskohászat történetével - leggyakrabban egy-egy gyár, vagy kistérség szintjén - ezek lelkes munkáját érdemes lenne összefogni és szervezetenként kitzűzött célok szolgálatába állítani. A bizottság alapvető célkitűzése volt, hogy a hazai kohászat

történeti kutatásának 19. század második felében beinduló, de az első világháborúval megrekedő folyamatát újraélessze és szervezett keretek között koordinálja. A bizottság tagjai forrás- és dokumentumgyűjtő, -elemző tevékenységeit a KKM keretei között, illetve azzal szoros együttműködésben végezték.

A KTB már az 1950-es évek végén felvette munkatervébe – az ipari forradalom hazai kohászati üzei emlékeinek kutatása mellett - a honfoglaló magyarok vaskohászati ismereteire vonatkozó emlékek gyűjtését és rendszerezését [2.17]. A bizottság megfelelő szervezeti háttérrel biztosított annak az igen jelentős kohászattörténeti kutatásokat hozó korszaknak, ami valójában Nováki Gyula 1952-es sopron-magashídi salakdomb-feltárásával és az ugyanez évben rekonstruált diósgyőr-újmassai kohó helyén végzett, már kifejezetten iparrégészeti jellegű ásatásával kezdődött. Nováki állandó munkatársa a műszaki szakértői feladatok terén Vastagh Gábor, vegyész lett – mindketten a KTB alapító tagjai – amely együttműködés már előre vetítette a modern, interdiszciplináris jellegű archeometallurgia tevékenységi elvét. A KTB szervezése alatt 1959 és 1964 között Nováki és Vastagh több Árpád-kori vaskohászati műhely lelőhelyét tárta fel (1959 – Felsőkelecsény, 1960-61 – Imola, 1962 – Trizs, 1964 – Jósvafő) és ezek – illetve a Korek József 1961-es leletmentése által az Ózd melletti Upponyban megtalált kemencemaradvány - alapján definiálták az Árpád-kor jellegzetes bucakemence-típusát. Nováki Gyula eközben Nyugat-Dunántúlon is vezetett hasonló jellegű ásatásokat (1961 – Kőszegfalva, 1962, 1964 – Vasvár) ahol egy másik, az Árpád-kori vaskohászat vélhetően csak lokálisan használt kemencetípusának műhelyeit tárta fel. Nováki és Vastagh kettőséhez csatlakozott Heckenast Gusztáv történész, aki a lelőhelyek, feltárt leletek – kemencemaradványok, fűvókák, salak és ércdarabok, kerámiatöredékek - illetve az azokkal kapcsolatos vizsgálatok alapján a technikátörténeti háttér megfogalmazásában szerzett elévülhetetlen érdemeket. A csapatot Zoltay Endre, kohómérnök tette teljessé, aki Magyarországon először végzett rekonstrukciós jellegű, mérésekkel, dokumentálással ellátott vasérckohósítást az általa épített bucakemencében. A négy kutató munkájából megszületett összefoglaló mű sokáig egyedülálló volt a vas hazai archeometallurgiájában.

A réz, illetve rézalapú ötvözetek archeometallurgiájának kutatástörténetében nem mondható el a vaséhoz hasonló kibontakozás a második világháború utáni évtizedekben. Analitikai szempontból a korábbiól használt nedves kémiai eljárások mellett új távlatokat nyitott ugyan a spektrumanalízis – hazánkban először régészeti leleten Szegedy Emil alkalmazta 1954-ben – a vizsgálatok az 50-es, 60-as években főként a bronzkori fémtárgyak anyagvizsgálatában merültek ki, kapcsolódva ezzel hasonló célú nemzetközi programokhoz is. Mindenképpen kiemelendő Mozsolics Amália, régész munkássága. Miske Kálmán szakmai örökségének folytatójaként a kárpát-medencei bronzkor időrendiségét tárgyaló munkája mellett nagy hangsúlyt fektetett a bronzleletek metallográfiai vizsgálatainak felhasználására. Hazánkban - Szegedy Emil és Hegedűs Zoltán vizsgálatainak köszönhetően – ő volt az első, aki fémvizsgálati adatokra szisztematikusan támaszkodhatott, amely nagy segítséget nyújtott a bronzkori fémkultúra technikai-technológiai alapvetéseiről szóló későbbi munkáiban.

Az 1960-70-es évek kohászattörténeti kutatásai során felmerült problémák megválaszolása szempontjából újabb mérföldkő volt, hogy 1980-ban megalakult a Magyar Tudományos Akadémia Veszprémi Akadémiai Bizottságának Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága (MTA VEAB IAM), amelynek alapítója Gömöri János, aki az 1970-es évek közepétől a magyar kohászatrégészeti kutatások vezéralakja. A bizottság már alakulása évében megszervezte az első, rá két évre pedig a második hazai iparrégészeti konferenciát Veszprémben. Utóbbi rendezvényen középkori vaskohászattal kapcsolatos, műszaki

vizsgálatokat – Wallner Ákos geofizikai méréseit, Kisházi Péter ásványtani vizsgálatait - bemutató előadások is elhangoztak.

Az 1980-as évektől az egyes kutatóintézetek, egyetemek vizsgálat- és mérés technikai infrastruktúrájának fejlődése, bővülése, illetve a régi technológiák, régészeti leletek műszaki-természettudományos vizsgálata iránti kutatói érdeklődés fokozódása egyre több, de egymástól rendszerint különálló példát eredményezett fém műtárgyak anyagvizsgálatában. Az eseti vizsgálatokat tekintve, jellemző módon – egyébként az európai trendhez hasonlóan – kissé elszeparálódott, mintegy külön témakörben fogalmazódott meg a nemvas fémekből, főként rézből, bronzból, esetenként nemesfémekből készült leletek vizsgálata, illetve a különböző vastárgyak analízise. A vegyész-mérnökből régésszé lett Költő László 1981-es régészeti szakdolgozatának témaköre a különböző régészeti tárgyak anyagvizsgálatán alapuló régészeti következtetések lehetőségének vizsgálata volt, illetve 1983-ban doktori értekezését “Avar kori bronztárgyak röntgenemissziós analízise” címmel védte meg. A bronztárgyak műszaki vizsgálata a 90-es években többek között Ilon Gábor és Szabó Géza munkáiban kapott nagyobb hangsúlyt [2.18, 2.19].

A vasból készült régészeti leletek anyagvizsgálata az erőteljes korrózió által nehezebb, bonyolultabb, mint az időnek jóval ellenállóbb bronztárgyaké. Mindazonáltal a 80-as, 90-es években a vastárgyak metallográfiai vizsgálatának szórványos példái relatíve gyakoribbá váltak. Emellett azonban a Nováki-Vastagh-Zoltay hármast fent említett, 60-as évekbeli kezdeményezése utáni néhány évtizedes csend után – ha csak néhány kutató erejéig is – a 90-es évektől újra kibontakozóban voltak a vas korabeli előállításának metallurgiai, technológiai jellemzőire fókuszáló interdiszciplináris kutatások. Az első archeometallurgiai témakörű, műszaki diplomatervet ezen jegyzet írója készítette 1993-ban, a Miskolci Egyetem Kohómérnöki Karán, amelyben a korai középkori, kárpát-medencei bucakemencék metallurgiájának, technológiai jellegzetességeinek tárgyalása mellett rekonstruált kemencében és laboratóriumban is elvégzett kísérleti olvasztások eredményeiről is beszámolt.

A vaskohászat hazai archeometallurgiájához kapcsolódó fontos esemény volt, hogy a Dunaferr Rt., a Magyar Vas- és Acélipari Egyesülés (MVA) és az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) által létrehozott Dunaferr-Somogyország Archeometallurgiai Alapítvány 1996-ban - hazánkban egyedülálló módon – ún. őskohómúzeumot létesített a somogyfajsz határában feltárt, több tucat kohóból álló, 10. századi műhelygödör-komplexum konzervált részlete fölé. (2.3. ábra) Az esemény a kapcsolódó tudományos életnek is jót tett, amit az 1997-ben, Sopronban és Somogyfajszon, Gömöri János főszervezésével lebonyolított „Hagyományok és újítások a korai középkori vaskohászatban” című nemzetközi konferencia is bizonyított.

Jelentős tudománypolitikai siker volt, hogy 1998-ban a 31. Nemzetközi Archeometriai Szimpóziumot Budapesten rendezték meg. A fémek szekciójában bemutatott több tucat előadás és poszter között magyar szerzők munkái is megjelentek, főként fémtárgyak archeometriai vizsgálatairól, de a kora középkori bucakemencék bemutatott technológiája révén a „klasszikus” archeometallurgia is képviseltette magát [2.20]. A 20. századot, kissé jelképes módon, a Gömöri által szerkesztett, műszaki vizsgálatokat és technológiatörténetet is bemutató iparrégészeti lelőhelykatasztere zárta le – a vaskohászatra korlátozva, illetve az avar- és Árpád-korra fókuszálva – amelynek mindmáig nem jelent meg még a folytatása.



(2.3. ábra) A somogyfajszai őskohó-múzeum

Az új évezredben egyelőre továbbra is relatíve alacsony azoknak a kutatóknak a száma, akik kifejezetten archeometallurgiai jellegű kutatásokat végeznek. Míg a 90-es években a jellemző példák az interdiszciplináris együttműködésre egy-egy régész (pl. Gömöri János, Szabó Géza) által készített doktori/kandidátusi disszertációk voltak, amelyek jelentős volumenben használták fel a műszaki vizsgálatok eredményeit, addig a közelmúlt éveiben és manapság is több, lelőhely(ek)re koncentrált, többszerzős monográfia készült, illetve készül kiadásra várva. Bár Magyarországon az archeometallurgiában direkt vagy indirekt módon aktívan tevékenykedő, egyre bővülő szakterület-spektrumot képviselő szakemberek zöme ismeri egymást, az alapvetően perszonális kapcsolatok alapján szerveződő, egymástól rendszerint különálló, független vizsgálati, kutatási projektek eredményei még mindig nincsenek egységes rendszerben kezelve. Az utóbbi egy-két évtizedben öröndetesen megnőtt a rekonstrukciós kísérletekkel próbálkozó, illetve az iránta érdeklődők száma. Az archeometallurgia kutatási eredményeinek prezentálása hazánkban a rendszerességet illetően inkább régészeti vonatkozású, ilyen például a Miskolci Egyetemen 2009 óta évente megrendezett archeometriai és kognitív régészeti konferenciák, illetve az MTA VEAB IAM rendezvényei. A hazai műszaki jellegű ankétokon, konferenciákon még mindig kissé exkluzív, sajátos felhanggal, eseti jelleggel jelennek meg archeometallurgiai témájú előadások. Ebből a szempontból az európai trend viszont sajnos egyre inkább távolodik a hazai viszonyoktól. Az archeometallurgia önálló kutatási szakterületként való hazai megjelenése, megfelelő szerveződéseinek kialakulása érdekében újabb úttörő lépések szükségesek, mint például direkt ez irányú interdiszciplináris kutatócsoport létrehozása és működtetése, illetve az archeometallurgiának felsőoktatás különböző szintjére való bevezetése, ahogyan az a Miskolci Egyetemen, a jegyzet előszavában leírt módon is történt.

2.2. Nemzetközi szerveződések és az archeometallurgia szakirodalma

Míg hazai vonatkozásban tulajdonképpen csak az említett akadémiai munkacsoport (MTA VEAB IM) képviseli, illetve integrálja be országos szinten az archeometallurgia területét, nemzetközi szinten már több, főként régészeti vonatkozású szervezet foglalkozik vele, mintegy csatolt szakterületként. Az archeometallurgiát képviselő nemzetközi szervezetek, szerveződések sorában – a hazai jellemzőkkel párhuzamosan – több a vaskohászathoz, a vas archeometallurgiájához köthető, mint az egyéb fémek archeometallurgiájával foglalkozó.

Az európai iparrégészet főként az iparilag fejlett nyugati országokban - azon belül is kiemelkedően Angliában – kezdett először kibontakozni, alapvetően a 19. század második felében, végén tapasztalható, egyre nagyobb ütemben fejlődő iparosodás ösztönzésére. Erős érdeklődés mutatkozott a klasszikus ipari forradalom korszakának maradványai, műemlékei iránt, illetve emellett kezdett a figyelem az egyes ipari tevékenységek, szakmák technológiai elődjei, ősi formái felé is fordulni. Mindez a régészetben is ösztönzőleg hatott.

A második világháború után számos nyugat-európai speciális szervezet – mint például az angol Historical Metallurgy Group in London, a német Geschichtsausschuss des Vereines Deutscher Eisenhüttenleute in Düsseldorf, illetve a francia Centre de Recherches de l'Histoire de la sidérurgie at the Musée du Fer at Nancy-Jarville – generált, illetve támogatott olyan kutatási projekteket, amely a korai vaskohászat történeti, technológiai, gazdasági és szociális aspektusaira fókuszált. Ezek a kutatások egymástól általában függetlenül folytak, de a régészeti és a hozzá kapcsolódó műszaki vizsgálati eljárások fejlődése nemzetközi szinten is egyre több együttműködést generált. A vas archeometallurgiájának vonatkozásában a leginkább meghatározó nemzetközi szerveződés a Comité pour la Siderurgie Ancienne /CPSA/ (Ancient Ironmaking Committee), amely a számos tudományterületet – többek között régészetet, antropológiát, geológiát, történettudományt, kémiát, botanikát, matematikát, fizikát stb. – összefogó kiterjedt nemzetközi szervezet, az 1931-ben alapított Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques /UISPP/ (International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences) egyik munkabizottsága.

A UISPP 1966-ban, Prágában tartott 7. konferenciája jó apropót szolgáltatott a CPSA létrehozására, amelynek első elnöke W. U. Guyan professzor, titkára pedig – egészen 2005-ös visszavonulásáig – Radomír Pleiner, prágai régész lett, aki az archeometallurgia tudományos életének egyik legmeghatározóbb alakja. Gyakorlatilag elmondható, hogy az archeometallurgia – legalábbis a vaskohászattal foglalkozó területe – nemzetközi szerveződése a 89 kutató részvételével létrejött, aktív munkáját 1967-ben kezdő bizottsággal kezdődött, pontosabban azzal, hogy Pleiner a Cseh (akkor még Csehszlovák) Tudományos Akadémia Régészeti Intézete szakfolyóiratának, az Archeologické rozhledy-nek hasábjain rendszeresen megjelentette a korabeli vaskohászat régészeti, ipartörténeti, archeometallurgiai vonatkozású kutatásairól, az azokról szóló konferenciákról, szimpóziumokról, szakkönyvekről, fontosabb írásokról szóló híreket, információkat, adatokat. A bizottság elnöke manapság a wales-i Peter Crew, titkára pedig az angol Janet Lang, mindketten kiemelkedő kutatók, tudósok az európai archeometallurgiában.

Az egyéb fémek vonatkozásában nem beszélhetünk a fentihez hasonló nemzetközi szerveződésről, a kutatók, az egyes projektek rendszerint nemzetközi szakmai konferenciákon, szakfolyóiratokon, kiadványokon keresztül értesülhetnek egymás munkáiról.

Mindazonáltal a terület számos kutatója tagja az angliai központú és orientáltóságú Historical Metallurgy Society (HMS) nevű, 1962-ben létrehozott szervezetnek, amely szintén nemzetközi fórumot biztosít a kohászat történetével, korabeli technológiáival, az azokhoz kapcsolódó kutatásokkal, így az archeometallurgiával is foglalkozó szakembereknek. A HMS kiterjedt tagsággal rendelkezik, rendezvényeket, konferenciákat szervez, illetve alkalomszerű és állandó kiadványokat bocsát ki a régi idők kohászatával kapcsolatosan. Ezek között kifejezetten archeometallurgiai jellegű összefoglaló és ez irányú projekteket részletesebben bemutató kiadványok is vannak. A szervezet különböző bizottságok által működik, mint például az Archaeology Committee, illetve a History and Recent Metals Committee.

Szintén Angliában, a University College London (UCL) régészeti intézetének berkein belül hozták létre 1973-ban az Institute for Archaeo-Metallurgical Studies (IAMS) elnevezésű nemzetközi – de alapvetően angolszász - szakmai szervezetet. Az IAMS saját szervezésű speciális képzési kurzusai mellett olyan projekteket indít be és támogat, amely a kohászat és bányászat történetét kutatja technikai és kulturális aspektusból egyaránt. Az alapvetően az UCL régészeti intézetéhez köthető projekteknél rendszerint nemzetközi partnerségük is van, illetve aktív kapcsolatot alakítottak ki nemcsak a régészet és történettudomány, hanem a kohászati, bányászati, geológiai és kémiai területek szakembereivel is.

Kimondottan az archeometallurgiai kutatások eredményeit vonultatja fel a négyévente megrendezett Archaeometallurgy in Europe című nemzetközi konferencia. A kutatási terület nemzetközi szervezeti szintjének relatíve fiatalására és exkluzivitására utal az is, hogy az első rendezvényt 2003-ban tartották Milánóban és csak négyévente rendezik meg. A második konferenciát a szintén olaszországi, Aquileia-ban – szintén az Associazione Italiana di Metallurgia (AIM) főszervezésében - míg a harmadikat 2011-ben, a németországi Bochumban, a Deutsches Bergbau-Museum szervezésében tartották meg. A konferenciákon plenáris, illetve szekcióelőadásokban az archeometallurgia valamennyi részterületéről hangoznak el előadások – egy-egy szekció erejéig nem európai témák is helyet kapnak - amelyek aztán külön kiadványban is megjelennek.

Természetesen az archeometria legkiemelkedőbb nemzetközi rendezvényén – International Symposium of Archaeometry (ISA) – a Technology and Provenance III (Metals and Metallurgical Ceramics) szekcióban szintén van lehetőség archeometallurgiai kutatásokról beszámolni, illetve értesülni. Ez a konferenciasorozat jóval nagyobb múltat tekint vissza, az első rendezvény 1961-ben, Londonban volt (Meeting on “Prospection in Archaeology by Geophysical Methods”) és több elnevezésbeli változtatáson keresztül 1984-ig évente, azóta két évente rendezik meg (1998-ban Budapest volt a helyszín, lásd az előző alfejezetet).

Az említett konferenciasorozatokon kívül szűkebb körű eseti nemzetközi ankétokon – ilyen volt például az 1994 és 2003 között, L’ubomír Mihok, kassai professzor főszervezésében, szlovákiai helyszíneken négyszer megrendezett Archaeometallurgy in Central Europe elnevezésű konferencia - illetve alapvetően nem az archeometallurgia, illetve archeometria területeit célzó tudományos rendezvényeken is szerepeltek, szerepelnek archeometallurgiai előadások, ha a kutatási projektek egyes jellemzői, célkitűzései által azok beilleszthetőek a programba. Utóbbiak legtöbbször régészeti jellegű szimpóziumok (pl. a European Association of Archaeologists nagyszabású összejövetelein), de előfordulhat kifejezetten műszaki, illetve modern mérés-technikai témájú konferenciákon is. Az International Conference on Surface Modification Technologies tematikája tartalmaz kimondottan régészeti leletek, illetve műtárgyak felületének vizsgálatával foglalkozó témakört

is, de úgyszintén hangzott már el például előadás a jegyzet szerzője részéről középkori bucakemencék salakjainak kristályosodásáról az International Conference on Solidification and Gravity egyik rendezvényén.

Az archeometallurgia, mint relatíve fiatal és dinamikus fejlődő kutatási ág fent vázolt jellemzőiből következően a direkt módon kapcsolódó szakirodalom jelentős, mondhatni meghatározó hányadát külföldi folyóiratok, konferencia-kiadványok publikációi alkotják. Nemzetközi szinten a dimenziókat tekintve is összehasonlíthatatlanul bővebb e téren a választék. Kimondottan az archeometallurgiának nincs állandó folyóirata sem nemzetközi, sem hazai szinten. Jellegét és volumenét tekintve az ismertebb archeometriai folyóiratokban (pl. *Archaeometry*, *Open Journal of Archaeometry*) jelennek meg kifejezetten archeometallurgiai, illetve ilyen jellegű publikációk. Magyarországon ezt a vonalat a Magyar Nemzeti Múzeum által kiadott, T. Biró Katalin által szerkesztett, *Archeometriai Műhely* című elektronikus folyóirat képviseli 2004-től, illetve 1982 és 1998 között alapvetően hírek, rövid beszámolók erejéig képviselte az *Iparrégészeti és Archeometriai Tájékoztató (IRAMTÓ)*. Némi kutatás után viszont az interneten számos forrásból – célszerűen keresőrendszereken keresztül - lehet archeometallurgiai témájú kutatásokról, vizsgálatokról, kísérletsorozatokról szóló publikációkra bukkanni.

Magyar nyelvű archeometallurgiai jellegű összefoglaló művek sorában nem túl széles a választék és az is csaknem teljes egészében a vas archeometallurgiájához kapcsolódik. Heckenast Gusztáv, Nováki Gyula, Vastagh Gábor és Zoltay Endre korábban említett műve, az Akadémiai Kiadó gondozásában, 1968-ban megjelent, „A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban” című könyv komplex összefoglalást nyújt a hazai vaskohászatnak a honfoglalástól a 13. század közepéig terjedő időszakáról [2.2]. Az első és sokáig egyetlen ilyen jellegű munka a régészeti, ipartörténeti, műszaki, anyagvizsgálati és rekonstrukciós kísérleti vonatkozásokat is tárgyalja. Jellemző módon a folytatás csak 1991-ben jelent meg, „A magyarországi vaskohászat története a feudalizmus korában” címmel. Ezt a művet már csak a történész Heckenast jegyezte és alapvetően ipar- és technikatörténeti szemlélettel követi a vaskohászat történetét a 13-18. század között [2.21]. A sorban a következő összefoglaló munka Gömöri János 2000-ben, Sopronban, „Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Magyarországon” címmel kiadott lelőhelykatasztere. A régész-történész szerző kandidátusi értekezésére épülő mű a vaskohászattal kapcsolatos iparrégészeti lelőhelyek akkori állapotának részletezése mellett rövid nemzetközi kitekintést és kutatási módszertant, illetve kissé bővebb technikatörténeti összefoglalót is tartalmaz a címben szereplő periódus vaskohászatáról, illetve annak közvetlen előzményeiről. A könyvben számos lelőhelyhez és lelethez kapcsolódó műszaki vizsgálat – köztük jó néhány ezen sorok szerzőjétől - illetve rekonstrukciós és laboratóriumi próbakohósítások dokumentálása, beszámolója is megtalálható [2.22]. Bár a lelőhelykataszter a „I. Vasművesség” alcímet viseli réz-bronz vonatkozásában nem jelent meg hasonló kiadvány. Mindazonáltal az MTA VEAB IAM által működtetett iparrégészeti kataszter honlapján valamennyi – nem csak fémes jellegű – lelőhely regisztrálható, illetve a kapcsolódó eseményről, rendezvényekről is lehet tájékozódni.

A réz alapú ötvözetek archeometallurgiáját illetően Költő László korábban említett doktori értekezésén kívül Szabó Géza 2013-ban kiadott disszertációja (A dunántúli urnamezős kultúra fémművészete az archeometallurgiai vizsgálatok tükrében) említhető példaként magyar nyelvű, egy-egy témakört érintő, összefoglaló műre [2.23]. Egyéb fémek vonatkozásában könyv méretű archeometallurgiai kiadvány nem jelent meg hazánkban,

mindössze egy-két rövid publikációra bukkanhatunk, általában különböző szakmai konferencia kapcsán.

Nemzetközi szinten – bár még mindig igen speciális témakörnek számít az archeometallurgia – sokkal bővebb lehetőségek nyílnak, ha nagyobb volumenű műveket keresünk. A szakma átfogó alapművének tekinthető Ronald F. Tylecote „A History of Metallurgy” című könyve, amelyet először 1976-ban adta ki a „The Metals Society”, majd a második, némelyik fejezetében változtatott, a „The Institute of Materials” gondozásában megjelent kiadás 1992-ben [2.24]. Az archeometallurgia egyik „atyjaként” számon tartott professzor – 1939-től foglalkozott a szakterülettel – remek, átfogó művében az ember története során használt valamennyi számottevő fém előállításának technológiáját sorra veszi, illetve annak fejlődését végig kíséri a kezdetektől a különböző fémkorokon, történelmi időszakokon át a 20. század közepéig, a megfelelő földrajzi tagolásban. Az utolsó fejezet kitér a szakterülethez kapcsolódó tudományos kutatói háttérre, illetve műszaki-természettudományos vizsgálatokra is. Gyakorlatilag alig létezik manapság olyan nagyobb volumenű archeometallurgiai témájú munka, amely ne merítene belőle, ne hivatkozna erre a műre, de kisebb publikációk hivatkozáslistáin is rendszeresen előfordul.

Archeometallurgiáról általánosságban, illetve összefoglaló jelleggel valamennyi történelmi fém vonatkozásában néhány régészeti szakkönyvben, oktató könyvben is lehet olvasni, rendszerint igen szűk keretek között. Colin Renfrew és Paul Bahn méltán elismert és felsőfokú oktatásban is alkalmazott „Régészet – elmélet, módszer, gyakorlat” című könyvében például csak 10 oldal szól az archeometallurgiáról, amely próbál lehetőleg minden témakört érinteni a fémek és technikák, technológiák közül [2.25]. Ennél valamivel részletesebbek, tagoltabbak azok a jellemzően brit összefoglaló, ismeretterjesztő kiadványok, amelyekben az archeometallurgiában használatos vizsgálati elvekről, módszerekről is található tömör, bemutató jellegű leírás. Jó példa erre a HMS „Metals and Metalworking – A research framework for archaeometallurgy” című kiadványa [2.26].

A kifejezetten archeometallurgiai szakkönyvek nemzetközi szinten is általában az egyes fémfajták szerint csoportosíthatók és itt is alapvetően dominál a vas, illetve a réz alapú fémek, ötvözetek archeometallurgiája, különösen az előző. A vas archeometallurgiájának témakörében alapvető műként feltétlenül megemlítendő Radomír Pleiner „Iron in Archaeology” főcímű, angol nyelvű két könyve; a 2000-ben kiadott „The European Bloomery Smelters” [2.27], illetve a 2006-os „Early European Blacksmiths” [2.28], mindkettő a cseh akadémia régészeti intézetének gondozásában. A két mű átfogó képet ad a vas direkt úton történő előállításának – a bucakemencés technológiának – európai történelmi fejlődéséről a kezdetektől az első faszenes nagyolvasztók megjelenéséig, illetve a vele párhuzamosan alkalmazott kovácsolási, fémalakítási technikáról, technológiáról.

Szintén nagy volumenű, átfogó művek a vas témakörében Vagn Fabritius Buchwald 2005-ben és 2008-ban megjelent „Iron and steel in ancient times” [2.29] és „Iron, steel and cast iron before Bessemer” [2.30] című munkái, a dán királyi akadémia kiadásában. A vas- és acélkohászati, illetve öntészeti technológia fejlődését a kezdetektől a 19. század végéig követő művekben igen jelentős teret kap a műszaki vizsgálatok eredményeinek bemutatása.

A réz és bronz, illetve a nemvas fémek archeometallurgiáját illetően inkább bizonyos korszakok, földrajzi egységek, népek vonatkozásában beszélhetünk átfogó publikációkról. Az igen bőséges szakirodalom megjelenési formájára e fémek archeometallurgiája esetében még inkább a konferenciakiadványok, tanulmánykötetek, szakfolyóirati cikkek a jellemzőek.

Nagyobb volumenű művek inkább doktori disszertációk formájában jelennek meg, amelyek rendszerint a vonatkozó technika, technológia fejlődéséről, illetve a kapcsolódó általános elméleti metallurgiai vonatkozásokról is tartalmaznak fejezeteket. Ilyen, földrajzilag hazánkat is érintő példa Christopher A. Papalas „Bronze Age Metallurgy of the Eastern Carpathian Basin: A Holistic Exploration” című, 2008-as disszertációja [2.31].

A témakör roppant kevés összefoglaló monográfiáira eklatáns példa Paul T. Craddock „Early metal mining and production” című, 1995-ös könyve az Edinburgh University Press, illetve a Smithsonian University Press kiadásában, amely többek között ásatások, műszaki vizsgálatok, laboratóriumi kísérletek felvonultatása által mutatja be az extraktív metallurgia korai technológiatörténetét [2.32]. A réz és bronz archeometallurgiájában a legtöbb munka a klasszikus réz- és bronzkorhoz kötődik és jelentős hányadban Európán kívüli földrajzi egységekhez (Közel-Kelet, Távol-Kelet, Dél-Amerika).

Az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb ütemben sokasodó archeometallurgiai esettanulmányok mellett relatíve igen kevés szakirodalmi forrás szól kifejezetten a kutatási területen használatos műszaki vizsgálati eljárások speciális vonatkozásairól, azok legtöbbje is angolszász területen készült és inkább általános régészeti alkalmazhatóságról szólnak. Jó példa erre M. Pollard és C. Heron 1996-os „Archaeological Chemistry” [2.33], illetve S.L. Olsen 1988-as „Scanning Electron Microscopy in Archaeology” [2.34] című műve. Utóbbi a British Archaeological Reports (BAR) nemzetközi sorozatában jelent meg, amelyben egyébként számos nagyobb lélegzetű archeometallurgiai tanulmány – gyakran átdolgozott disszertáció formájában – látott már napvilágot.

Feltétlenül megjegyzendő, hogy az elmúlt évtizedekben jelentős mértékben felerősödött az Európán kívüli kutatók aktivitása az archeometallurgiában. Az amerikai részvétel már a korábbi időszakban is mérvadó volt, az egyre fejlettebb helyi vizsgálati infrastruktúra, illetve a nyugati kutatói központok, egyetemek kutatási inspirációjának közös hatására ma már számos igen elismert távol-keleti (főként indiai, kínai), dél-amerikai és arab származású kutató ténykedik archeometallurgiai jellegű projektekben, jellemzően helyi ásatások kapcsán ősi kohászati-fémművességi technikák kutatásában, gyakran európai vagy amerikai kollégáikkal karöltve.

3. MŰSZAKI VIZSGÁLATOK ALAPVETŐ SZEREPE, JELLEMZŐI AZ ARCHEOMETALLURGIÁBAN

Az archeometallurgiai kutatási projektek és a régészeti tevékenység kapcsolatának vizsgálatát természetesen az utóbbi munkaszerkezetének tisztázásával kell kezdeni, annál is inkább, mivel a modern kutatás-felfogás értelmében az archeometallurgiához kapcsolódó műszaki vizsgálatok gyakorlatilag a komplex régészeti projektek résztvevőjeiként értelmezhetők. Az egyes ásatások régészeti szakmai jellegének (pl. szondázás, leletmentés, részletes feltárás, stb.) részletezése nem tartozik az archeometallurgia tárgykörébe. Mindazonáltal kifejezetten iparrégészeti jellegű ásatást indukálhat felszíni szórványleletek megtalálása – erre jellemző példa, amikor salakdarabokat, pörkölt ércdarabokat találnak – illetve közvetlen vagy közvetett források. Ugyanakkor a leletanyagtól függően egy mindenre

kiterjedő, részletes feltárás is válhat kifejezetten iparrégészeti projektté. A fejezetben komplex archeometallurgiai vizsgálatokat tartalmazó (ipar)régészeti projekt általános jellemzői kerülnek megfogalmazásra a „jó gyakorlat” (good practice) mintája szerint.

A régészeti ásatások leegyszerűsített, alapvető munkaterve az alábbi tevékenységi egységekre osztható:

1. Ásatási terv készítése.
2. Terepmunkák, földmunkák (műszeres felmérés és feltárás).
3. A leletanyag adatainak rögzítése.
4. A vizsgálatra szánt anyag kiválasztása és a vizsgálati célok meghatározása.
5. Műszaki vizsgálatok elvégzése, dokumentálása és a konklúziók megfogalmazása.
6. Az ásatás komplex disszeminációja.

Valamennyi résztvevő alapja az alapos és pontos dokumentáció. Az archeometallurgiai szakemberek legaktívabb szerepvállalása a 4-5. tevékenységnél jelentkezik, de célszerű valamennyi résztvevőben bevonni.

3.1. Régészeti lelőhelyek, leletek archeometallurgiai vizsgálati elve, előkészítése

Amennyiben felszíni szórványleletek (legtöbbször salakdarabok), geológiai körülmények (pl. korabeli érclelőhely), ráutaló írásos emlékek, szóhagyományok, helynevek, stb. alapján egy feltárandó lelőhely esetén feltételezhető fémelőállítás, fémfeldolgozás, akkor már az ásatási terv készítésekor célszerű korábbi lelőhelyek – főként, ha azok esetleg több szempontból is hasonló jellegűek - illetve a hozzá kapcsolódó archeometallurgiai vizsgálatok tanulságait figyelembe venni. Az ásatási tervben célszerű megjelölni az a stratégiát, amely várhatóan a legnagyobb eséllyel vezet a kohászathoz, fémművességhez köthető objektumok minél hatékonyabb feltárásához. Alapvető segítséget nyújthat, ha a területen, vagy közelében volt már fémtechnológiák alkalmazására bizonyítékot szolgáltató feltárás, illetve annak archeometallurgiai vizsgálata, de e mellett az is, ha ugyanazon korszakhoz, népességhez, földrajzi környezethez, tevékenységhez kapcsolódó vizsgálatoknak már léteznek használható megállapításai (pl. műhelyek, kemencék, salakhalmok elhelyezkedései, méretei, formái, rendszere).

Ha a feltárandó lelőhely a fent említett, előzetes nyomok, jellemzők alapján egyértelműen alapvetően iparrégészeti - azon belül is fémművességhez köthető – jellegű, az ásatásvezető(k)nek célszerű az ásatási projekt tervezésébe, megvalósításába bevonni az archeometallurgiai szakembereket, különös tekintettel a feltárási és mintavételezési stratégia kidolgozására. Amennyiben az ásatás prioritásai között nem szerepel iparrégészeti vonatkozás, de bizonyos volumenű ráutaló nyom akad (némi salakos szemét, kemence- vagy érccdarab), akkor is érdemes legalább az előkerült leletek jellegének, elhelyezkedésének, anyagának vizsgálata erejéig archeometallurgusokat, műszaki szakembereket bevonni, akiknek munkája felértékelődhet, amennyiben később nagyobb volumenű kohászatra, fémművességre utaló leletek kerülnek elő, illetve előfordulhat, hogy éppen ezek a vizsgálatok intonálják a további feltárást.

3.1.1. A lelőhelyek előzetes vizsgálati módszerei

Terepbejárás: általános régészeti módszer, természetesen nem csak az iparrégészetben használatos [3.1]. Az archeometallurgia területén ugyanakkor kiemelt fontosságú a terepbejárás, mivel a korai kohászati műhelyek, helyszínek után általában nem maradt könnyen azonosítható, egyértelműen jellegzetes és változatos leletanyag. Alapvetően felszíni salakdarabok, esetleg salakhányók, elvéve pörkölt ércdarabok árulkodhatnak korabeli metallurgiáról, amelyek felismerése, azonosítása szakmai rutint igényel. Színük, jellegzetes formájuk alapján a talajtól, illetve természetes közettől való elkülönülése alapján akár kevés keresgélés után is könnyen fellelhetők salakdarabok – főként, ha nagyobb volumenben találhatóak – de jellegük, eredetük pontosabb azonosítása már gyakran problémás a terepbejárás alatt.

Légifotózás: szintén általánosan használatos módszer, bár Magyarországon inkább a feltárt szelvényekről készítenek felvételeket a levegőből, mint a feltárás előtti területekről. Mindazonáltal hasznosítható az ásatást illetően, amennyiben nagyobb területen történt kohászati és/vagy felszíni ércbányászati tevékenység a múltban. Jellemzően az angolszász régészetben használják ipari tevékenységek nyomainak beazonosítására [3.2].

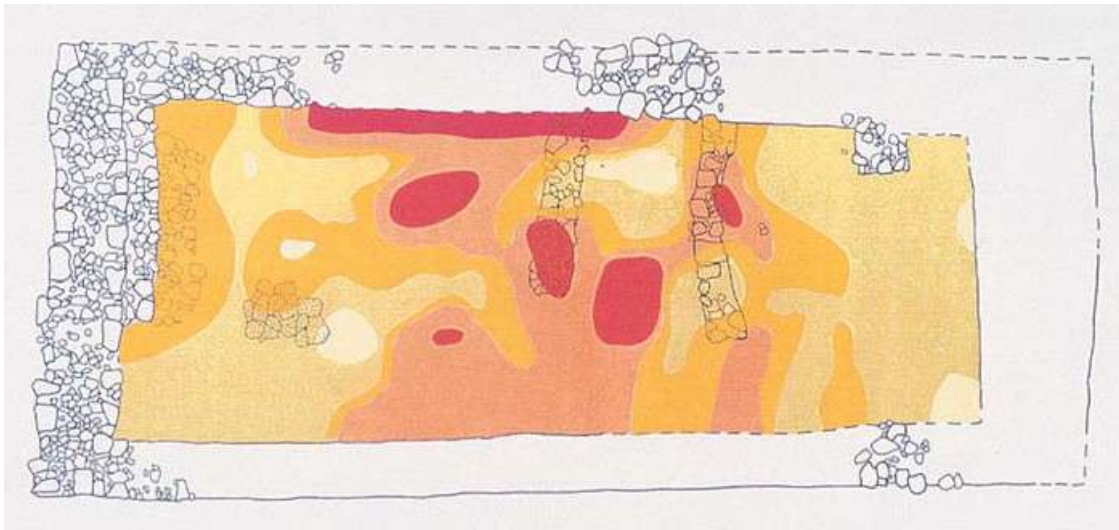
Geofizikai mérések: a geoelektromos, de főként a geomágneses módszerek egyértelműen felhasználhatók korai fémelőállítás, fémművesség felszín alatti nyomainak detektálására. A leggyakrabban használt két geomágneses vizsgálati módszer a magnetométeres vagy gradiométeres talajmágnesesség-vizsgálat, illetve a mágneses érzékenység (szuszeptibilitás) vizsgálata.

A magnetométeres talajmágnesesség-vizsgálatnál önálló műszerrel (pl. fluxgate gradiometer), a mágneses intenzitás változásait rögzítik. Ha összekapcsolják automatikus pozíciórögzítéssel és számítógépes feldolgozással, gyors és pontos felméréseket lehet készíteni nagy területekről. A Föld mágneses erővonalainak eltérését okozhatja például nagyobb vastartalmú salakhalom, de egykor használt kemencék, kohók is. Amíg ugyanis az égetetlen agyag vasoxid zárványainak mágneses iránya rendszertelen, addig, ha az agyagot minimum 700 °C-ra hevítik, a mágneses mezők egy irányba, a föld mágneses terének megfelelően rendeződnek át. Az égetett agyag gyenge állandó mágnessé válik és anomáliát kelt a körülötte levő mágneses mezőben. Az érzékenyebb műszerekkel meg lehet különböztetni a kisebb salak-, esetleg fémes darabokat a relatíve nagyobb átmérőjű kemencéktől.

A mágneses szuszeptibilitás mérésénél gyakorlatilag azt vizsgálják, hogy az adott anyagot a rá ható mágneses tér milyen mértékben mágnesezi át. Nagyobb területeken csak ritkán alkalmazzák, inkább részletes vizsgálatnál, célirányosan használják. Fontos szerepet játszik például kovácműhelyek, kovácstűzhelyek körüli fémdarabkák, forgácsok elhelyezkedésének megállapításánál.

A geofizikai mérések fontos információkat nyújthatnak az egyes korabeli kemencék *in situ* (eredeti helyzetben, természetes helyén) megtalálásához. Az *in situ* kohók, bucakemencék sajátos, dipoláris jellegzetességet mutatnak a magnetométeres vizsgálatkor. A bucakemencék salakjának mágnesessége rendszerint egyértelműen elkülönül az azt fedő talajrétegtől. Salakdarabokkal erősen megszórt terület mágneses vizsgálata gyakran eredményez erős „háttérzajt” kiugró csúcsokkal. Egy-egy nagyobb salaktömb akár több méteres környezetében is el tudja torzítani a mágneses vonalakat. A kovácműhelyek esetében a fémes törmeléken

kívül a kovácstűzhely is eredményezhet jellegzetes mágneses vonalakat. A tűzhely, vagy esetleg az üllő helyét gyakran alacsony jelértékű terület jelzi, amely magasabb jelértékű részekkel van körülvéve [3.3] (3.1. ábra). A réz, ón és egyéb nem-vas fémek korabeli kohászatával, fémművességével kapcsolatosan a geofizikai vizsgálatok a tűzhelyek, olvasztókemencék mellett nagyobb olvasztótégelyek, öntőformák, illetve azok nagyobb területre összehordott törmelékeit, valamint salakhalmokat képesek kimutatni [3.4]. A kimondottan archeometallurgiai tapasztalat azonban itt is lényeges, mivel házi kemencék (pl. kenyérsütők) geofizikai vizsgálatánál gyakran hasonló jeleket kapnak.



(3.1. ábra) Középkori kovácsműhely (Burton Dassett - Anglia) térképe mágneses szuszceptibilitás mérési eredmények megjelenítésével. A sötétebb szín erősebb mágnesezettséget jelöl, például a lepattant fémes vasszemcsék nagyobb koncentrációját. [3.3]

Archeomágneses kormeghatározás: jól használható és kidolgozott mérési módszer, amely alapvetően olyan, agyagból készült, kiégett kemencék, tűzhelyek kormeghatározására alkalmas, amelyeket *in situ* kihűlt helyzetben találtak [3.5]. Az eljárás arra épül, hogy az agyag ferromágneses ásványai (pl. magnetit) utolsó kihűlésükkor megőrzik a földi mágneses mező terének kiégetéskori irányát és intenzitását, vagyis az ilyen ásványok mágneses erővonalai a Föld mágneses erővonalainak irányába rendeződnek. A keltezés alkalmazásához szükség van a mért tulajdonság időfüggésének ismeretére az alkalmazás helyén, vagyis a földi mágneses tér időbeli változásaira és földfelszíni eloszlására vonatkozó adatsorokra. A terepmunkán kívül tehát hosszadalmas laboratóriumi kalibrációs munkára is szükség van az adott területi adatokat illetően. A visszamenő, közvetett mágneses mérési eredmények változásának szabályszerűsége alapján bizonyos korszakok könnyebben, mások nehezebben datálhatók. Ezen kívül befolyásolhatja a mérési eredményeket, ha például nagyobb mennyiségű, nagy vastartalmú salak hűlt ki utoljára a kemencében, vagy közvetlen környékén.

3.1.2. Ásatás

Míg az előző alfejezetben tárgyalt, a régészeti ásatások felsorolt tevékenységi egységei közül a terepmunkákhoz (2.) kapcsolódó vizsgálatok esetében inkább a földtani, geológiai szakértelem prioritása az alapvető - bár a terepbejáráson az archeometallurgus szakmai tapasztalata azonosítás szinten is nagy segítséget jelenthet - addig az ebben az alfejezetben tárgyaltak főszereplője alapvetően a régész. Mindazonáltal, amennyiben arra mód van,

feltétlenül előnyös, ha archeometallurgiai szakember is részt vesz a releváns iparrégészeti ásatáson, illetve evidens az irányító, koordináló közreműködése a dokumentált leletanyagból a vizsgálandó darabok kiválasztásánál, illetve a vizsgálati cél, stratégia és módszer megfogalmazásánál, megtervezésénél (lásd fent a 4. tevékenységi egység).

Az ásatási technológia, stratégia természetesen a régészet hatáskörébe tartozik. A korabeli fémművességet illetően az alábbi csoportosításban, a következő - az adott szakmához közvetlenül kapcsolódó - objektum- és leletfajták a jellemzőek (dőlt betűvel a csak a késő középkortól, újkortól releváns objektumok és leletek):

1. Vaskohászat:

- érc (pörkölt és nyers formában) (3.2. ábra), ércelőkészítő-ércpörköltő helyek maradványai
- faszén, faszénégető boksa maradványa, mészkődarabok, *koksz*, *kokszkemence-maradvány*
- olvasztógödör-, olvasztópáholy-, bucakemence-maradványok (3.3. ábra), fúvókák (3.4. ábra), mellfal-darabok, komplex műhelygödörök maradványai (3.5. ábra), *aknás kemencék*, *nagyolvasztók és tartozékainak maradványai*
- salakdarabok (3.6. ábra), salakdomb, vasbuca (3.7. ábra) (salakos vagy tömörített állapotban)
- szerszámok (pl. bucakihúzó, salakkaparó) maradványai (3.8. ábra)



(3.2. ábra) Pörkölt és pörköletlen gyepvasérc-darabok 8-10. századi hazai lelőhelyekről [3.6]



(3.3. ábra) Bucakemence maradványa Sopron-Potzmann dűlő 10. sz-i lelőhelyéről (saját fotó)



(3.4. ábra) Fűvókák 9-11. századi kohótelepek magyarországi lelőhelyeiről [3.6]



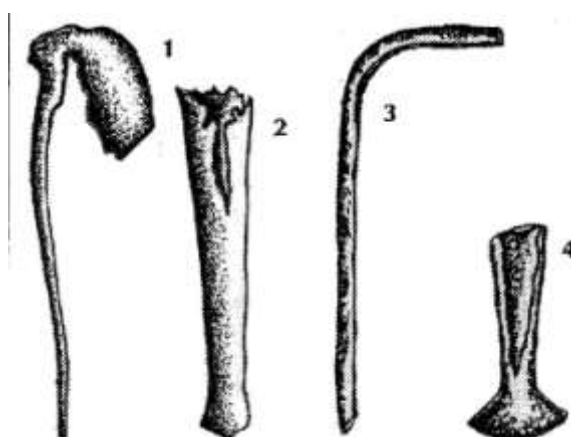
(3.5. ábra) Műhelyödör kohómaradványokkal – Zamárdi 7-9. sz. (Gallina Zsolt fotója)



(3.6. ábra) Salakdarabok Cegléd Árpád-kori lelőhelyéről [3.7]



(3.7. ábra) Vasbucák a somogyfajszai ásatásról [3.6]



(3.8. ábra) Bucakihúzó-salakkaparók (1, 3) és salakleverők (2,4) rajza 9. századi (Olomučany, Csehország – 1, 2) és Árpád-kori (Trizs, Észak-Magyarország – 3, 4) ásatásról [2.22]

2. Vaskovácsolás

- kovácstűzhelyek, kovácsműhelyek (3.9. ábra), *hámorok maradványai*
- faszén, *ásványi szén, kokszt,*
- kovácssalakok (3.10. ábra), vasbucadarabok, lepattant salakos vasdarabkák
- szerszámok, eszközök (pl. kalapács, üllő, fogó) maradványai (3.11. ábra)
- vastuskók, félkész termékek, elkészült vastárgyak (3.12. ábra)



(3.9. ábra) Árpád-kori kovácsműhely gödre a ceglédi ásatásról [3.8]



(3.10. ábra) Salakos vasbucadarab és kovácssalak-darabkák Ordacsehi-Csereföld kelta kori lelőhelyéről (saját fotó)



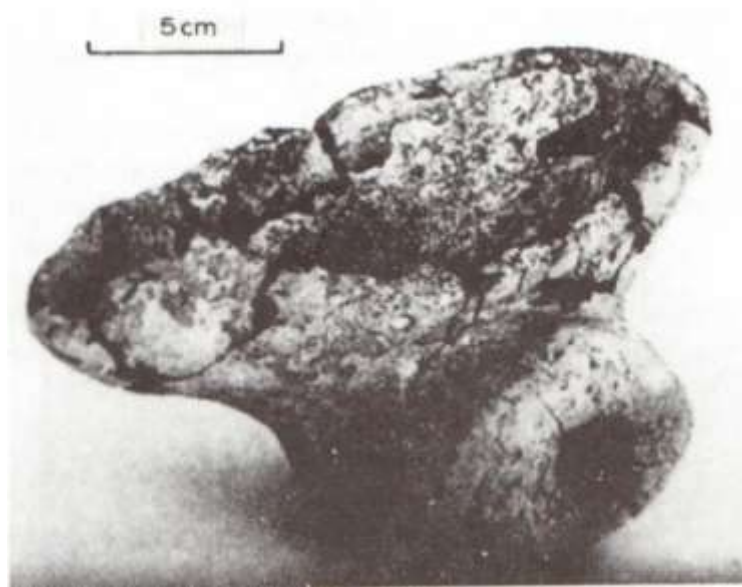
(3.11. ábra) Kovácsszerszámok és vastárgyak a 9. századi nemeskéri ásatásról (1. lyukasztó, 2. szorítólemezes üllő, 3. vasrúd-töredék, 4. vaskarika, 5. csipesz) [3.6]



(3.12. ábra) Vaseszközök Ordacsehi kelta településéről, illetve kovácsműhelyéből (I. fibula-töredék, II. övlánc-tag, III. ár, IV. akasztó, V. ekepapucs, VI. pánt, VII. ár) (saját fotó)

3. Nem-vas fémek feldolgozása

- tűzhelyek, tűzhelybélések és -falazatok
- olvasztótégelyek, öntőformák, fúvókák maradványai (3.13. ábra)
- faszén, *ásványi szén*,
- maradványanyagok, lepattant salakos fémdarabkák, elrontott öntvények, hulladékfémdarabok (3.14. ábra)
- szerszámok, eszközök maradványai
- kész öntvények és fémtárgyak (3.15. ábra)



(3.13. ábra) Olvasztótégely (az alsó-oldalsó lyukba pálcát illeszthettek a tégyely rögzítésére vagy megemelésére) – Lerna, Görögország Kr.e. 2750 [2.24]



(3.14. ábra) Rézötvözet hulladékfémdarabok egy 3. századi római-brit pénzverdéből [2.26]



(3.15. ábra) Sárgaréz, illetve bronz karperecek Homokmégy-Székes 10-11. századi köznépi temetőjéből (saját fotó)

4. Nem-vas fémek kohósítása: a fenti tevékenységcsoportokhoz képest sokkal ritkábban és csak az egyes fémérc-előfordulások által meghatározott területeken kerülnek elő főként réz, esetleg ón és ólom ősi vagy középkori kohászatára utaló nyomok, azok is általában salak- és ércdarabok formájában. A Kárpát-medencében eddig nem találták direkt nyomát fémércek primer kohósításának, Európában is relatíve ritka és nincs a korabeli vaskohászatra olyannyira jellemző bucakemencék mintájára sajátos kemencetípus sem. Inkább egyes tájakra és korszakokra jellemző fémmetallurgia emlékei a jellemzőek, - az alapanyag előfordulása függvényében – például a közel-keleti térség réz- és bronzkori rézolvasztó kemencéinek, avagy a Britanniában végzett kupellálás (nemesfémek kiválasztása réz-, ón-, ólomércekből metallurgiai úton) félkész termékeinek (ólmóglét), kemencebéléseinek maradványai.

Az egyes leletek, maradványok definiálásán, mennyiségén és minőségén túl alapvető fontosságú az elhelyezkedésük mind egymáshoz, mind a környező objektumokhoz képest. Ezek lényeges információt nyújtanak az alkalmazott technológia sajátosságait, volumenét illetően (pl. a salakleletek mennyiségéből, elhelyezkedéséből lehet következtetni, milyen turnusokban, munkaszervezésben dolgoztak egy-egy műhelygödör kemencéinél, vagy akár arra is, hogy mely irányba bővítették a műhelyeket).

A fent felsorolt jellemző lelettípusok tekintetében egy-egy ásatáson igen különböző mennyiségben és minőségben kerülhetnek elő archeometallurgiai vonatkozású emlékek, a hely (település, műhelygödörök, korabeli udvarház, stb) és a képviselt szakma (fémelőállítás, fémalakítás, illetve melyik fém vonatkozásában) jellegétől függően. A dokumentálás, mintagyűjtés és a műszaki vizsgálatok tervezési stratégiája, illetve az arra való előkészületek elve általában egységes séma szerint zajlik.

A fémművességhez kapcsolódó feltárt emlékek lehetnek:

- a) Objektumok: tűzhelyek, gödrök (pl. műhelygödör, ércpörkölő, salakcsapoló gödör, hulladék- illetve meddőtároló gödör), kemencék, kohók maradványai, valamint kiszolgáló létesítmények (pl. lakóépületek, tárolók, stb.) maradványai.
- b) Leletek: érc, salak, tüzelő és adalékanyagok (faszén, kőszén, mészkő, stb.), kemencefalazat-darabok, fűvókák, félkész termékek (pl. vasbuca, réz öntecs, stb.), fémhulladékok, kész fémtárgyak, a tevékenységeknél használt szerszámok, kerámiák.

Régészeti szempontból - különösen az őskori, ókori, korai középkori technikát tekintve – a jobban azonosítható és változatosabb leletanyagot produkáló technológiák a fémek előállításával (smelting), kapcsolatosak. Az objektumok zöme is jellemzően ide tartozik. A kovácsolás, fémmegmunkálás bizonyítékai leginkább melléktermékek, salakdarabok, eszközök formájában jelennek meg, a korabeli kovácstűzhelyek és -műhelyek nyomai nehezebben azonosíthatók. Ebből a szempontból külön kategóriát alkotnak az öntés (bronz és nemesfémek) jellemző leletanyagai, amelyeket főként tégelyek, öntőformák maradványai, illetve öntészeti hulladékok, elrontott öntvények.

Az archeometallurgia műszaki vizsgálataihoz kétféle lelőhelyről lehet kohászathoz, fémművességhez kötődő leletmintákat gyűjteni:

- 1) Primer lelőhelyek: olyan lelőhelyek, amelyek objektumai (műhelygödör, épület, tűzhely, stb.) közvetlenül fémelőállításához (metallurgiához) és/vagy fémalakításhoz, öntéshez köthetők, azaz ahol ilyen tevékenységeket végeztek. Ezek a lelőhelyeken a fentebb felsorolt – szakmai alaptevékenységek szerint csoportosított – leletek bármelyike előkerülhet. A feltárást fokozott gondossággal kell végezni amiatt is, hogy az egyes objektumok, leletek egymáshoz képest meghatározott helyzete, tájolása, mennyiségi és minőségi eloszlása pontosan rögzítve legyen. Különös jelentőséggel bírnak az in situ leletek.
- 2) Szekunder lelőhelyek: olyan lelőhelyek, amelyeken a lelőhellyel egykorú, vagy korábbi fémművesség termékei, félkész termékei, melléktermékei, illetve azokból beazonosíthatóan vagy feltételezhetően származó törmelék, hulladékanyag található. Ezeknél a lelőhelyeknél célszerű megkülönböztetni azt, amikor a fémművesség szakmai tevékenységének nyomai, melléktermékei bukkannak fel - mint például egyes objektumok, gödrök, árkok feltöltéseiben salak, kemencefalmaradvány, öntési vagy kovácsolási hulladék – illetve olyan eseteket, amikor elkészült fémtárgyak, esetleg félkész termékek – tömörített buca, fémtuskó, fémrúd (ingot), öntecs, stb. – kerülnek elő.

Előző esetekben gyakran igen nehéz eldönteni, hogy a leletek egyáltalán vannak-e egymással időbeli, térbeli, illetve technológiai rokonságban. Amennyiben van erre vonatkozó, megbízható direkt vagy indirekt információ, a leletek anyagvizsgálata (kémiai, mikroszerkezeti, ásványtani) lehet a mérvadó vizsgálati prioritás. Fémtárgyak sokkal gyakrabban kerülnek elő, jellemzően egykori településekről, temetőkből, csatahelyszínekről. Ezek metallográfiai vizsgálata adhat elsődleges információkat a készítés technológiájára, illetve bizonyos esetekben (pl. zárányvizsgálat által) a metallurgiai fázisokra is. Jóval ritkább esetben lehet

félkész termékeket vizsgálni, viszont a technológiai folyamatok analizálása és rekonstruálása szempontjából kivételes információkat szolgáltathatnak.

A leletek műszaki vizsgálatát célirányos régészeti előintézkedéseknek kell megelőzni. Az egyes objektumok elhelyezkedésének, formájának, méreteinek térképszerű rögzítése, illetve a leletek leltárszerű dokumentálása evidens régészeti szakmai feladat. Mindazonáltal már az ásatás tevékenységei alatt is érvényesíteni kell a későbbi műszeres vizsgálatok céljai, stratégiája szerinti peremfeltételeket.

3.1.3. Mintagyűjtés, mintakiválasztás

Az archeometallurgiai műszaki vizsgálatok hatékonyságát, a vizsgálatok célkitűzéseinek elérhetőségét alapvetően befolyásolja a mintagyűjtés jellege és stratégiája. Többféle jellegű mintagyűjtés, mintakiválasztás létezik:

1. Mintagyűjtés terepbejárás alkalmával: olyan kisebb-nagyobb területeken, ahol vélhetően korábban fémművességhez kapcsolódó tevékenységeket űztek, gyakran megtalálhatóak azok felszíni emlékei, általában salak- és/vagy ércdarabok formájában. A vizsgálati minták kiválasztásánál mérvadó:
 - a. A felszíni leletekkel érintett terep teljes területét érintse a bejárás és a leletek lokalizálásánál – amelynek mindig meg kell történnie - fel kell tüntetni az adott terepviszonyokat (szántófield, mocsaras rész, vízmosás, stb.). Egy-egy nagyobb mennyiségű, illetve sajátosan jellemző előfordulást GPS-koordinátákkal is érdemes rögzíteni.
 - b. A felbukkanó leletek teljes minőségi spektrumából kell mintát gyűjteni, mennyiségileg lehetőleg az egyes lelettípusok előfordulásával egyenes arányban. A felszíni szórványos salakleleteknél különösen fontos, hogy szerkezet, fajsúly, szín, illetve darabnagyság vonatkozásában is teljes legyen a begyűjtött minták palettája.
2. Mintagyűjtés ásatási lelőhelyeken:
 - a. Primer lelőhelyek esetében várhatunk a korabeli technológia sajátosságainak kiderítése szempontjából a legtöbbet a leletek archeometallurgiai, archeometriai vizsgálatából. Ennek megfelelően az előzőekben említett minta-kiválasztási aspektusok fokozottan érvényesek. Ezen kívül a leleteket tartalmazó objektumot is a lehetőség szerinti legjobb alapossággal le kell írni (méret, jelleg, elhelyezkedés), illetve a leletek objektumon belüli helyzetét, mennyiségi nagyságrendjét is rögzíteni kell. Nagyon lényeges, hogy a technológiai folyamat minden fellelhető eleméből származzon minta (kemencereszletek, tüzelőanyag, nyersanyag, salakfajták minden jellegben és volumenben, eszközök, esetleg félkész- és késztermékek).
 - b. Szekunder lelőhelyek esetében az 1.b. pontban leírtakon kívül szintén célszerű lejegyezni az aktuális objektumok jellegét, alapvető jellemzőit, de természetesen technológiai összefüggéseket ez esetben nem kell keresni.
 - c. A fentiekben felül külön szempontok vonatkoznak még a fémtárgyak, fémeszközök mintakiválasztására. Figyelembe kell venni a látható

anyagbeli különbségeket (ötvözet típus), a formai eltéréseket (jellemzően vékony vagy vastag keresztmetszetű tárgyak), és az egy tárgyon belüli inhomogenitás lehetőségét (pl. kések, kardok, egyéb hegyes, éles fegyverek esetében az élek, illetve a felület várhatóan más mikroszerkezetű, mint a belső részek). Törekedni kell arra, hogy a fémtárgyak műszaki vizsgálatára restaurálás előtt kerüljön sor. Ez vastárgyak esetén főként azt a kérdést veti fel, hogy maradt-e egyáltalán metallográfiailag vizsgálható fémes anyag a rozsdá alatt. A kérdést célszerű röntgenvizsgálattal eldönteni. Az értékesebb bronz, illetve nemesfém tárgyak esetében a roncsolásos vizsgálatok megkívánta sérülés helyét, nagyságát, restaurálhatóságát, ugyanakkor a vizsgálat szempontjából való hasznosságát illetően kell konszenzusra jutnia a régésznek, restaurátornak és műszaki szakembernek; ekkor van igazán döntő szakmai szerepe az archeometallurgusnak. A félkész termékeket (vasbuca, vastuskó, bronzöntecs, stb.) mintakiválasztás és mintakezelés, tárolás szempontjából célszerű ugyanúgy kezelni, mint a fém késztermékeket, eszközöket.

Az archeometallurgiai jellegű leletek közül különösen a salakok vonatkozásában érvényes az, hogy amellett, hogy a fellelhető darabok anyagminősége, szerkezete, jellege egyazon szűk környezetben (objektumon belül) is rendszerint igencsak heterogén. Emellett éppen a salakok – illetve az előpörkölt ércdarabok - esetében kell leginkább ügyelni arra, hogy a vizsgálatok (főként a kémiai analitika) eredményeit ne befolyásolják a földből származó szennyeződések, illetve nem a technológiához köthető tapadványok.

A korabeli fémművesség emlékeiként előkerült leleteken végrehajtott, az anyagminőség és anyagszerkezet kutatására szolgáló műszaki vizsgálatok az archeometallurgiának azon - egyébként igen széles – területe, amely gyakorlatilag a legszorosabban tartozik az archeometria tárgykörébe. A fent említett leletfajtákból kiválasztott minták anyagvizsgálatai archeometallurgiai szempontból alapvetően három csoportba sorolhatók:

1. A kémiai összetétel megállapítására szolgáló vizsgálatok – főként érc, salakok, kemencedarabok, félkész termékek, hulladékanyagok, fémötvözők mennyiségi összetételének megállapítására.
2. Ásványi összetétel megállapítására szolgáló vizsgálatok – alapvetően érc, salakok, esetleg kemencefalazat-darabok, agyagfűvőkák, agyag öntőformák, stb. esetében.
3. Anyagszerkezeti vizsgálatok – főként a fémtárgyak esetében alkalmazott röntgenvizsgálatok, mikroszkópia tartozik ide, de például elektronmikroszkópos vizsgálatot érc- és salakmintán is érdemes elvégezni bizonyos esetekben. Ide sorolhatók még a fémtárgyak mintáin elvégzett keménységvizsgálatok, illetve esetleges roncsolásmentes anyagszerkezeti vizsgálatok.

3.2. Kémiai analitika az archeometallurgiában

Azt, hogy a régészeti leletek összetételére irányuló számos kémiai analitikai vizsgálati módszerek közül melyet vagy melyeket célszerű kiválasztani, alkalmazni, több körülmény határozhatja meg:

- Mennyire lehet roncsolni a vizsgálandó anyagot, tárgyat? Mennyi mintát lehet belőle feláldozni?
- Milyen jellegű összetétel várható? Mennyire lényegesek a kisebb arányban előforduló alkotók, esetleg a nyomelemek meghatározásának pontossága?
- Van-e az összetevőkre vonatkozó speciális igény (pl. a két- és a háromvegyértékű vasalkotókat külön is szeretnénk meghatározni)?
- Milyen mérési infrastruktúra és mennyi költség áll egyáltalán rendelkezésre?

A kémiai analitikai vizsgálatok előtti mintavétel körülményeit fokozottan meghatározza, hogy több száz, esetenként több ezer éve a földben lévő anyagokról, tárgyakról van szó. Az analitika alapvető mintavételezési szabályai mellett különös gondot kell fordítani arra, hogy:

- Az elemzendő mintát ne szennyezze be az eredeti összetételébe nem tartozó anyag.
- Bizonyos jellegű darabok (pl. salakok) gyakran nagyon heterogén összetételűek. A vizsgálandó minta (minták) minél jobban reprezentálja a leletet, amiből származik.
- Metallurgiai lelőhely esetén a munkafolyamatok és elhelyezkedés szerint azonos leletfajtából merőben gyakran többféle is előkerül (jellemzően salakok, ércek esetében). A mintavétel minőségi és mennyiségi jellemzői megfelelően kell, hogy reprezentálja a lelőhelyet.
- Értékesebb daraboknál (alapvetően a fémtárgyak esetében) optimális kompromisszumra kell törekedni a tárgy épségét, illetve a vizsgálat eredményességét és használhatóságát illetően.

Az archeometallurgiában rendszerint a következő kémiai analitikai módszerek használatosak:

Röntgenfluoreszcens spektrometria (XRF): a régészeti leletek – így az archeometallurgiai jellegű leletek – kémiai analitikájában az egyik legáltalánosabban használt eljárás, amit ráadásul a régészek is előszeretettel preferálnak, mivel más atomspektroszkópiai módszerekkel ellentétben nem kell átalakítani az anyagot, a vizsgálat roncsolásmentes. Az XRF módszereknél nagyteljesítményű röntgensövet használnak gerjesztéshez. Gyakorlatilag tisztított, polírozott felületű, szilárd minták elemtartalmát határozzák meg 0.01-10 nm hullámhosszú gerjesztő röntgensugár segítségével, amelynek hatására a vizsgált tárgy belső energiaszintjei gerjesztődnek. A karakterisztikus röntgensugárzás mérése alapján megkülönböztetünk energia-diszperzív változatot (ED-XRF), amelyet relatíve olcsóbb berendezésű, hordozható változatban használatos műszer is képviselhet, illetve hullámhossz-diszperzív változatot (WD-XRF). A hullámhossz-diszperzív készülékek az elemek által emittált sugárzások azonosítására rendkívüli felbontást biztosító analízáló kristályokat, az energia-diszperzív készülékeknél pedig sokcsatornás analízátorokat alkalmaznak. Az ED-XRF berendezéseinek jelfelbontása jóval gyengébb, kevésbé érzékenyek, mint a WD-XRF műszerei, ugyanakkor gyorsabb berendezések. Az egyszerű, egyelemes spektrométerek alapja általában egy radioizotópos sugárforrás, a multielemes spektrométereknél pedig általában

röntgensöves gerjesztést alkalmaznak. A modern röntgenspektrometerekkel ma már a gyakorlatban is minden olyan elem vizsgálható, amelynek rendszáma nagyobb, mint az oxigéné. Általában egy készülék precizitása 0,1% nagyságrendű, az analitikai mérés pontossága pedig 0,2-1 rel.% közötti, ami pontos kalibrációval és adatkezeléssel érhető el. Ebben rejlik egyúttal az eljárás gyenge pontja is, ugyanis előfordulhat, hogy a kalibráció bizonytalan, különösen ismeretlen összetételű anyagoknál, ötvözeteknél igencsak nehéz, ugyanakkor nagyon sok múlik a sztenderdeken.

Induktív csatolású plazma (ICP): két válfajából – atomemissziós, más néven optikai emissziós spektrometria (AES v. OES) és tömegspektrometria (MS) – az archeometallurgiai vizsgálatokban jellemzően az előző használatos. Az XRF-nél drágább, némileg bonyolultabb procedúrájú eljárás, viszont univerzális kalibrációja miatt a kisebb rendszámú elemeknél és nyomelemeknél is kifejezetten megbízható. Az eljárásban induktív csatolású plazma segítségével állítják elő a gerjesztett atomokat és ionokat, melyek aztán az adott kémiai elemre jellemző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Az emittált sugárzás intenzitása összefügg a mintában előforduló elem koncentrációjával. A mintegy 10 mg-os mintából készített vizes vagy szerves oldószeres mintaoldatot perisztaltikus pumpával vezetik először a porlasztóba, majd porlasztott állapotban közvetlenül a plazmába, ahol az elektronokkal és más töltött részecskékkel történő ütközések során ionokra esik szét. A molekulák alkotó atomjaikra bomlanak, elektront adnak le és vesznek fel, miközben az elemre jellemző karakterisztikus hullámhosszúságú sugárzást bocsátják ki. A plazmalángból emittált fényt lencsével fókuszálják a diffrakciós rácsra, ahol az összetevőire bomlik. A kibocsátott fény intenzitását az egyes elemekre specifikus hullámhossznál elhelyezett fotoelektron-sokszorozó csövekkel mérik. Az archeometallurgiában igen gyakran előforduló, ismeretlen és heterogén összetételű anyagok (jellemzően a salakminták), illetve az ismeretlen fémötvözetek esetében, ahol a nyomelemek meghatározása alapvetően lényeges szempont lehet az eredetet, származást, technikát illetően az ICP a leghatékonyabb eljárás a kémiai analitikában.

Atomabszorpciós spektrometria (AAS): gyakorlatilag az ICP előfutára, amelyet ma is sok laboratóriumban alkalmaznak. Az eljárás elve még a 19. századra nyúlik vissza, modern műszerezettségét a 20. század közepétől fejlesztették ki. Mintegy 70 féle elem mennyiségi meghatározására alkalmas. A Lambert-Beer törvény elvét felhasználó eljárás berendezésének atomizáló egységében az atomok elektronjai meghatározott mennyiségű energia (pl. adott hullámhosszúságú fény) elnyelésével rövid időre magasabb energiájú pályákra gerjesztődhetnek. Az ehhez szükséges energia (a fény hullámhossza) egy adott elem meghatározott elektronátmenetére nézve specifikus, egy bizonyos hullámhossz csak egy elemre jellemző. A módszer ennek következtében szelektív az egyes elemekre nézve. Az eljárás technikai hátránya, hogy időigényes, mivel minden elemet elkülönítve, külön kell analizálni. A berendezés relatíve olcsó, viszont nagyobb számú elem vizsgálatokor a mérés már költségesebb lehet.

Energia-diszperzív röntgenspektrometria (EDS v. EDX): A pásztázó elektronmikroszkóp (lásd később 3.4. fejezet) képalkotásán kívül lehetőség van a mikroszkópra előkészített vizsgált anyag felületi elemösszetételének meghatározására, a hozzá csatlakozó energiadiszperzív röntgen-analizátorral. Az elektronsugaras mikroanalízis annak a röntgensugárzásnak a mérésén alapul, amelyet az analizálandó mintában a mikroszkóp elektronnyalábja keltett. A gerjesztett karakterisztikus röntgensugárzás energiája vagy hullámhossza arra az elemre jellemző, amely kibocsátotta, intenzitása pedig a kibocsátó elem koncentrációjával arányos. A mintából érkező röntgensugarakat egy detektor méri. Az eljárással készülhet a vizsgált tárgy elektronmikroszkópos képen lokalizált pont

elemspektruma, avagy a vizsgált terület átlagspektruma. Bár az eljárás szoftvere tömegszázalékban és atomszázalékban is 100%-os összegzéssel sorolja fel a vizsgált elemeket, a műszerrel csak a nátriumnál – illetve a modernebb változatok esetében a karbonnál - nagyobb rendszámú, illetve legalább 0.5 tömeg%-os mennyiségű elemek detektálhatóak. Mindazonáltal az eljárás könnyen kezelhető, gyors, relatíve pontos és nagyon előnyös heterogén szövetszerkezetű minták (pl. salakminták, rozsdás, réteges fémek) vizsgálatakor.

Prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA, PGNAA): roncsolásmentes nukleáris analitikai módszer, izotóppösszetétel-meghatározásra is alkalmas. A szilárd, folyékony vagy gáz halmazállapotú vizsgálandó mintát, neutronnyaládba helyezik és a sugárzásos neutronbefogásból keletkező γ -fotonokat detektálják. Általában nincs szükség mintaelőkészítésre és a reaktor neutronaktivációs analízissel (NAA) ellentétben a besugárzás és a mérés ugyanakkor történik. Elméletileg minden elem mérhető a módszerrel, nem szükséges előzetes információ a várható összetételről. A gyakorlatban a kimutatási határok nagyságrendekkel különböznek az egyes elemekre. Az érzékenyen mérhető elemeket (pl. B, Cd, Hg, Sm, Gd) már 0.01 ppm mennyiségben, míg a rosszul mérhetőket (Be, C, O) csak főkomponensként tudják mérni. A neutronok és a γ -fotonok vastag anyagrétegeken is áthatolnak, így a bevilágított térfogat átlagos összetételét kapjuk. A mérési eredmények szinte azonnal rendelkezésre állnak, a minta a mérés után néhány órával már biztonságosan újra felhasználható. Ez a roncsolásmentes és relatíve gyors, viszont költséges eljárást Magyarországon csak ebben a században kezdték régészeti leletek vizsgálatára alkalmazni. Az MTA Izotópkutató Intézetének Nukleáris Kutatások Osztálya üzemeltet PGAA berendezést.

Az archeometallurgiai vizsgálatok során előfordulhat olyan speciális eset, amikor a fent bemutatottakon kívül – vagy azok mellett - más módszert, berendezést is használnak kémiai összetétel meghatározására. Ilyen például, ha bucakemencéből származó vassalakban a két-, illetve három vegyértékű vas mennyiségét is meg akarjuk határozni, az esetleges reoxidáció, a salakba szorult metallizált szemcsék rozsdásodásának kutatása miatt. Ez esetben a minta összes vastartalmának meghatározásán (pl. ICP-vel) kívül régi, de még mindig jól szolgáló titrimetriás módszerrel határozható meg a két vegyértékű vas mennyisége, majd egyszerű számítás útján a három vegyértékű. Másik példa az elektromos vezetőképesség alapján történő karbon- és kénelemzés (LECO). Megemlítenéd még az elektronsugaras mikroanalízis (EPMA), illetve a részecske indukált röntgenfluoreszcencia analízis (PIXE), mint archeometallurgiában használható kémiai analitikai eljárások, amelyek egyúttal mikroszerkezeti információkat is nyújtanak (lásd az összegző 3.2. táblázatot), de ezek nehezen elérhetőek, költségesek, a fent említett módszerekhez képest sokkal ritkábban használják archeometriai célokra.

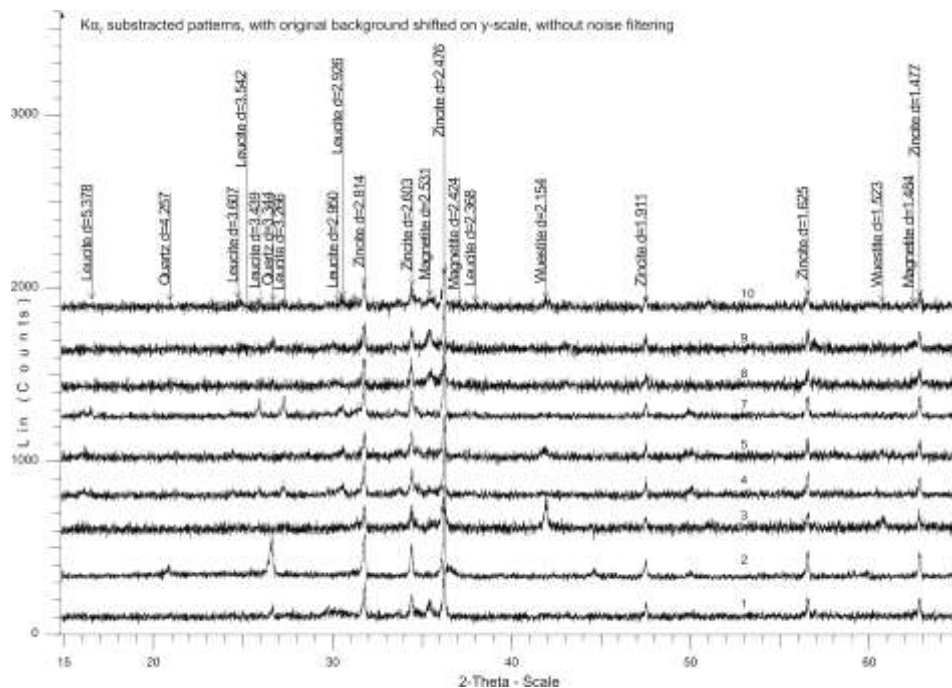
3.3. Ásványi összetétel elemzések

A leletek bizonyos fajtáinál fontos kutatási cél lehet a vizsgált anyag ásványi összetételének ismerete. Ez főként a korabeli metallurgiai folyamatok tisztázása, elméleti és gyakorlati rekonstruálása szempontjából számottevő jelentőségű. Az ásványi összetételi vizsgálatok tipikus mintái az érc- és salakleletek, illetve esetenként kemencerészlet, kiégett falazat, agyagfűvóka, öntőminta, stb. darabjai. Amennyiben az elemzések által ismerjük a vizsgált anyag kristályos összetevőit, ásványi alkotóit, a technológiai folyamat számos paraméterei behatárolhatók, például salakösszetevők vizsgálatakor az egyes összetevők képződési hőmérséklete árulkodó információ a metallurgiai folyamatok lezajlását, hőmérsékleti viszonyait tekintve. Ugyanakkor a kristályos alkotók ismerete kiegészíti, komplexé teszi a kémiai analízist, illetve a mikroszerkezeti anyagvizsgálatot, egyben segíthet megválaszolni az azoknál felmerülő anyagszerkezeti kérdéseket.

Az említett leletfajták anyagszerkezetének kristályos komponenseit az archeometallurgiában rendszerint röntgen-diffrakciós (XRD), illetve röntgen-pordiffrakciós eljárással vizsgálják (XRPD). Ezeknél az eljárásoknál a gerjesztő és detektált sugárzást is egyaránt röntgensugarak alkotják. A vizsgálat alapelve – Max von Laue klasszikus kísérlete alapján - hogy természetben előforduló kristályoknak olyan a kristályrácsa, melynek rácsállandója a röntgensugarak hullámhosszával azonos nagyságrendbe esik. Az atomok síkok szerinti elrendeződése okozza a diffrakciót.

Röntgen-diffrakcióval egykristályt vagy pormintát vizsgálnak. Egykristály-diffrakciós technikát ismeretlen szerkezetű kristály elemi cellájának meghatározására használják. A röntgen-diffraktometria tulajdonképpen általánosan elterjedt elnevezése a pordiffraktometriának, amelyet finomra őrölt, ismert szerkezetű kristályos vegyületek röntgen-diffrakciós képük alapján történő azonosítására használnak. A röntgen-diffrakciós kép felhasználható a kristályos fázisok azonosítására, a fázisok mennyiségi viszonyainak meghatározására, az elemi cella paramétereinek, a benne lévő atomok elrendeződésének, illetve a krisztallitok méretének és a rendezettségi paraméterek meghatározására.

Elvileg nagyon kis mennyiségű minta is elegendő a vizsgálatához, de nagyobb mennyiség elemzése biztosabb eredményt hoz. Az egyes kristályos összetevők kémiai képleteit adatbázisból vett, onnan azonosított ásványoknál megadott összetételnek feleltetik meg. Salakleletek elemzésénél gyakran előfordul, hogy a mintákban az ásványi összetevők bizonyos aránya rosszul kristályosodott, kis krisztallit-méretekkel. Az amorf anyag jelentős hányada mellett ugyanakkor az egyes kristályos alkotók szerkezetétől függően előfordulhat, hogy a néhány nm-es vagy néhány tíz nm-es krisztallit-méretű frakciók az XRD-vel nem észlelhetők, azaz röntgenamorf anyagnak tekintendők. Ettől függetlenül az anyagban előfordulhatnak olyan amorf anyagok is, amelyek nem alkotnak még nm-es krisztallitokat sem. A 3.16. ábrán Ordacsehi-Csereföld lelőhely kelta településéről származó vassalak-minták XRD-vizsgálatainak diagramjai, illetve a 3.1. táblázatban a vizsgált minták tömegszázalékban meghatározott ásványi összetétele látható.



(3.16. ábra) Vassalak minták XRD-vizsgálatának eredményei [3.9]

komponens (wt%) salak No.	1	2	3	4	5	7	8	9	10
Augit ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$)				14.4		13.8			
Diopszid ($\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$)	61.7								
Mg-tartalmú fayalit ($(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$)			21.1				5.0	7.4	23.1
Leucit (KAlSi_2O_6)	2.2		5.6	17.9	10.3	28.2			7.7
Magnetit (Fe_3O_4)	8.9			4.3	7.8		30.0	28.9	10.7
Monticellit (CaMgSiO_4)				22.6	27.8	14.9			14.8
Kvarc (SiO_2)	4.5	20.7					1.7	6.5	
Spinel (MgAl_2O_4)		12.2							
Wüstit (FeO)			17.7		9.1				5.7
amorf	22.7	67.0	55.6	40.8	45.0	43.1	63.3	57.2	37.9

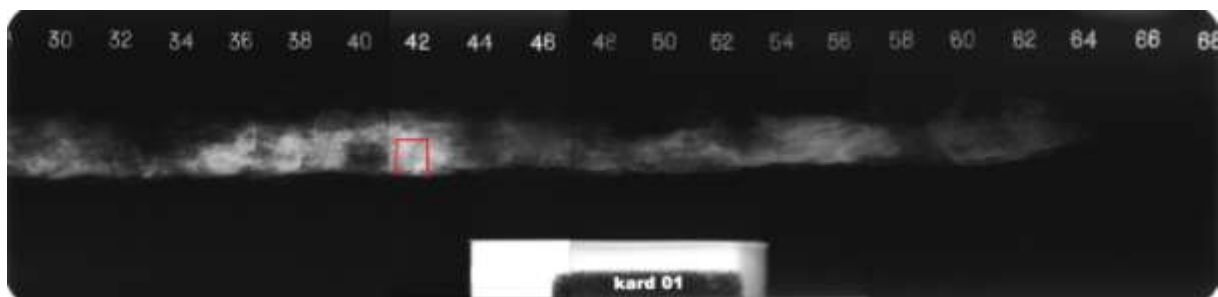
(3.1 táblázat) Vassalak minták meghatározott ásványi összetétele XRD-vizsgálat (3.16. ábra) által [3.9]

3.4. Archeometallurgiai leletek anyagszerkezeti vizsgálatai

Amíg a kémiai és ásványi összetétel kiderítését megcélzó vizsgálatok alapvetően a „Miből van?”, „Hogyan keletkezett?” kérdésre fókuszálnak, addig, addig az archeometria területéhez tartozó anyagszerkezeti vizsgálatok alapvetően a „Milyen a mikroszerkezete?”, „Hogyan készült?”, „Hogyan és mire használták?” kérdésekre keresi a választ.

Az archeometallurgiai kutatásoknak, az ahhoz kapcsolódó műszaki vizsgálatoknak sarkalatos része az anyagszerkezeti vizsgálatok, amelyekkel a leletek makro- és mikroszerkezetét kutatják. A vizsgálatok tárgya leggyakrabban fémtárgyak, fémmaradványok kristályos szerkezete, de számos fontos információt eredményezhet salakok, salakzárványok, vagy ércek anyagszerkezeti vizsgálata is, például elektronmikroszkóppal. Fémleletek komplex anyagszerkezeti vizsgálata (ún. teljes metallográfia) általában az átvilágításos röntgenvizsgálat → optikai mikroszkópos és elektronmikroszkópos vizsgálat → keménységmérés vizsgálati stratégia szerint zajlik.

Röntgensugaras vizsgálatok (X-ray): az orvoslásban használt röntgenvizsgálathoz hasonló eljárás alkalmazásával rendszerint a komplex anyagvizsgálati projektekhez szükséges és hasznos előzetes információkat szereznek. A röntgenvizsgálat által alapvető makroszerkezeti, morfológiai, szerkezetsűrűségi jellemzőket lehet kideríteni. A szerves anyagok (pl. csont, fa, bőr), kvarc- és földtartalmú rétegek általában áttetszőek a röntgensugarak alkotta képen, ezzel szemben a fémeken, fémötvözeteken – rétegvastagságuktól, sűrűségüktől, atomszámuktól függően – nem, vagy csak jóval kisebb mértékben hatolnak át a röntgensugarak. Jellemző alkalmazási példák az erősen korrodált – ezáltal kisebb sűrűségű, porózusabb szerkezetű - vagy más, nemfémes anyaggal beborított, takart vastárgyak röntgenezése, amikor is ez által kaphat az anyagvizsgáló előzetes képet arról, hogy a tárgy mely részében és milyen mértékben feltételezhető fémes szövetszerkezet. Ugyancsak alkalmas inhomogén ötvözetek, eltérő anyagokból kialakított réteges szerkezetek előzetes vizsgálatára. A röntgenkép alapján lehet aztán döntést hozni, hogy érdemes-e egyáltalán, illetve mely részeket célszerű belevágni, mintát venni a tárgyból. A 3.17. ábrán egy Pusztataskonyban talált kora középkori gepida kard (langsax) röntgenfelvétele látható, amelyen a fémes szövetet jelző, világos területen a mikroszkópos vizsgálatok céljából kialakítandó minta vágási vonalai pirossal vannak jelölve.



(3.17. ábra) Kora középkori gepida vaskard röntgenképe a kivágott minta jelölésével (pirossal) [3.10]

A leletek jellemző mikroszerkezetét mikroszkópok segítségével vizsgálják, fémtárgyak esetén szokás ezt metallográfiának nevezni. A metallográfiai vizsgálatra megfelelő mintákat kell elkészíteni. A minták kivágásánál figyelemmel kell lenni, hogy azok lehetőleg hűen tükrözzék a tárgy teljes anyagának szerkezetét – a korabeli fémtárgyak rendszerint inhomogén szerkezetűek – mind a felületi, mind a belső rétegeket illetően, ugyanakkor a lehető legkevesebb mértékű roncsolást szenvedje el a lelet. A minta helyének kiválasztását számos lehetséges tényező befolyásolhatja: vastárgyak esetében a korrózió mértéke, az alakítás feltételezhető hatása, esetleges rétegek, salakzárványok elhelyezkedése, az élek, felületek eltérő szerkezete, fémötvözetek ötvényei esetében egyes ötvöző dúsulása eredményezhet gyakran inhomogén szerkezetet. A kivágott minták vágási felületeit – a metszeteket – vizsgálat előtt mügyantába ágyazzák, csiszolják, polírozzák és maratják

(vastárgyak esetében általában 2%-os nitallal). Érc- és salakminták vizsgálata előtt a maratás természetesen elmaradhat.

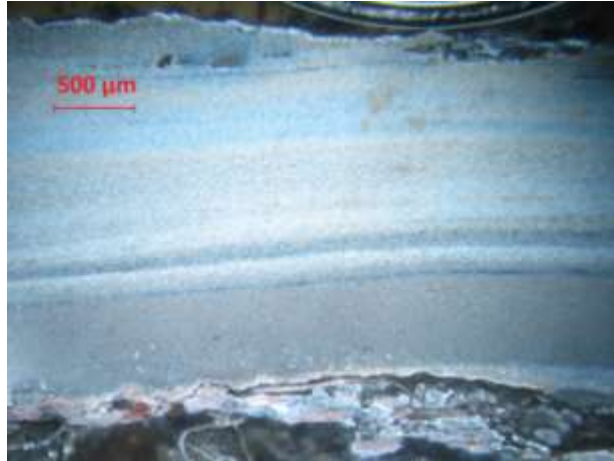
Optikai mikroszkópia (OM): a számítógép-vezérelt tárgyasztalos optikai mikroszkópoknál az előkészített minta (csiszolat) bevilágítása fényel történik, a minta képe nagyítását pedig optikai lencsékkel állítják elő. Az általában 10-1000-szeres nagyítású képek részletgazdagságának, felbontásának ilyen módon a fény hullámhossza szab határt. Mindazonáltal szemléletes képet lehet nyerni az egyes fémleletek szövetszerkezetéről, feltárva annak alapvető jellemzőit, amelynek egyik alapvető rendeltetése, hogy kutatási irányt mutasson az elektronmikroszkópos vizsgálat számára. Amennyiben csak a vizsgálandó minta szövetszerkezetének általános jellemzőit kutatják, illetve alapvető mikroszerkezeti jelleg egyértelműsítésére van szükség, számos esetben optikai mikroszkóp által mindez elvégezhető, a drágább elektronmikroszkópos vizsgálat nélkül.

Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM): Mivel az elektronsugárzás hullámhossza nagyságrendekkel kisebb a fénysugár hullámhosszánál, sokkal nagyobb nagyítást lehet elérni elektronmikroszkóppal, mint optikai mikroszkóppal. A pásztázó elektronmikroszkóp képei visszaszórt (backscatter) elektronokkal készülnek, ez alapján a nagyobb rendszámú elemek területei világosabbak, a kisebb rendszámúaké sötétebbek. Ez fontos információt szolgáltathat abban a tekintetben, hogy az általában magas rendszámú fémeket világosabb terület jelzi, míg a sötétebb terület rendszerint oxidos zárványra, szennyeződésre utal. Pásztázó elektronmikroszkóp használata az archeometallurgiában is univerzális lehetőségeket teremt. A rendszámérzékeny képeken kívül ún. szekunder elektronok segítségével kisebb nagyításban morfológiai vizsgálatot is lehet végezni, illetve lehetőség van rendszerint beépített energia-diszperzív mikroszkóp használata (lásd 3.3 fejezet), amellyel a SEM-képen megjelölhető, lokális vagy a képre érvényes territoriális jelleggel kémiai összetételt is meg lehet határozni.

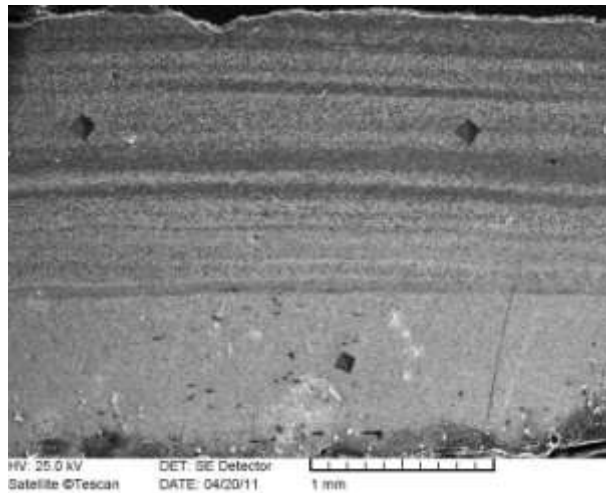
Keményésgvizsgálatok: heterogén szerkezetű fémek vizsgálati minták – réteges, esetleg éleknél, felületen nagyobb karbon-tartalmú vastárgyak, eltérő felületi összetételű ötvözetek - esetében a metallográfiai vizsgálatot célszerű kiegészíteni keményésgvizsgálattal. Az archeometallurgiában általában – a rendszerint a modern ipar acéljaitól, ötvözetektől puhább fémek miatt relatíve kis terhelőerő (1-3 kg) használata mellett - Vickers-féle keményésgértékeket szoktak mérni (HV). Az eljárás előnye, hogy a benyomott gyémántgúla által apró nyomok alakulnak csak ki, mindazonáltal érzékeny mérhetőséget biztosítanak.

A 3.18 és 3.19 ábrákon kora középkori gepida kardból (röntgenfelvétele a 3.17 ábrán) származó, hosszirányú metszetről készített optikai, illetve elektronmikroszkópos kép látható. Míg az optikai mikroszkóppal készített képen a nagyobb karbon-tartalmú perlit területeket sötétebb szín jelöli, az elektronmikroszkóppal készült képen éppen fordítva, a perlitben dúsabb területek világosabbak, míg a ferrites sávok sötétek. Utóbbi felvételen láthatók a keményésgmérésnél használt gyémántgúla lenyomatai is.

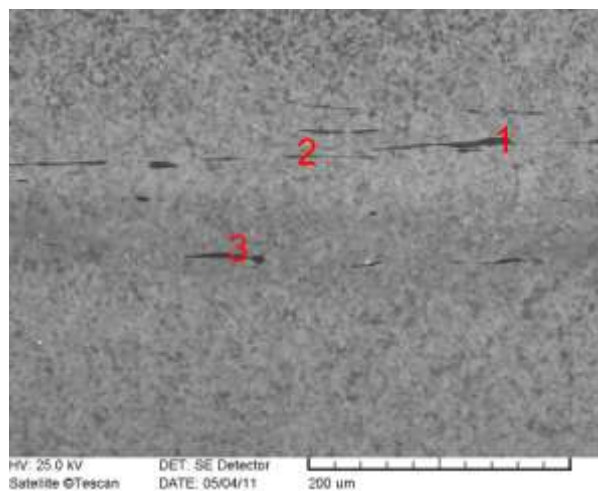
Ugyanezen kard keresztirányú metszetének perlit-ferrites szövetéről készült, erősebb nagyítású SEM-kép figyelhető meg a 3.20. ábrán, ahol a számokkal jelölt pontokban az salakzárványokról elemspektrumok is készültek, amelyek a 3.21-3.23. ábrákon láthatók. Még erősebb nagyításban (3.24. ábra) az is látható, hogy a salakzárványok a könnyebben alakítható ferrites rész mellett az alpmátrixszal együtt könnyebben elnyúlnak, összepréselődnek a merevebb perlit között.



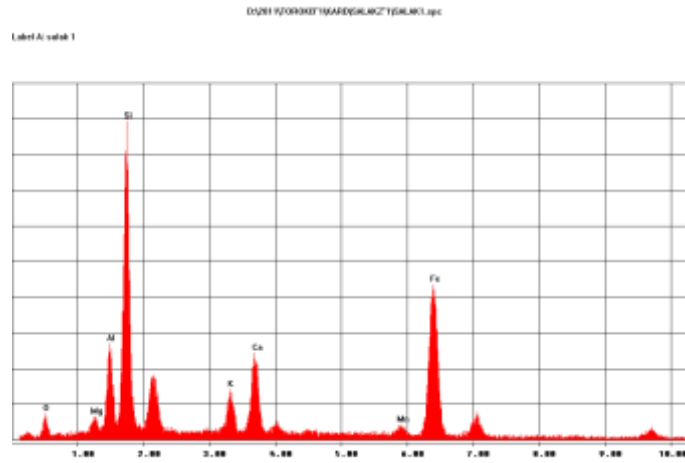
(3.18. ábra) Kora középkori vaskard hosszirányú metszetének optikai mikroszkópos felvétele [3.10]



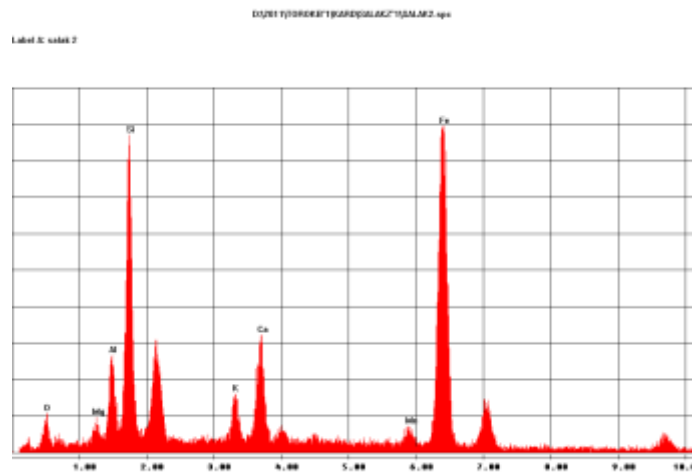
(3.19. ábra) Kora középkori vaskard hosszirányú metszetének pásztázó elektronmikroszkópos felvétele a keménységmérések nyomaival [3.10]



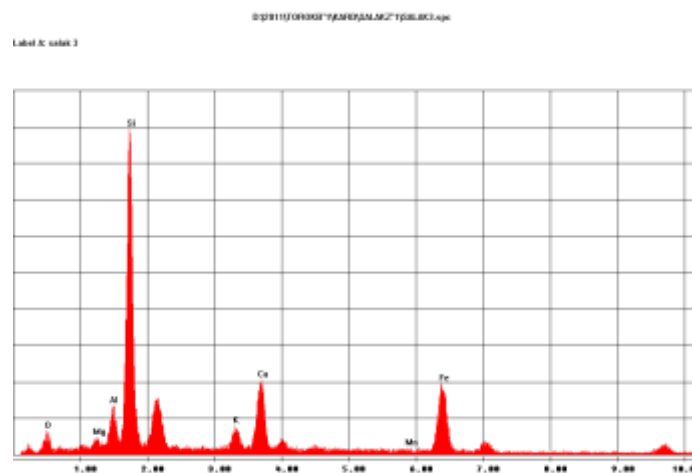
(3.20. ábra) Kora középkori vaskard keresztirányú metszetének SEM-képe salakzárványokkal [3.10]



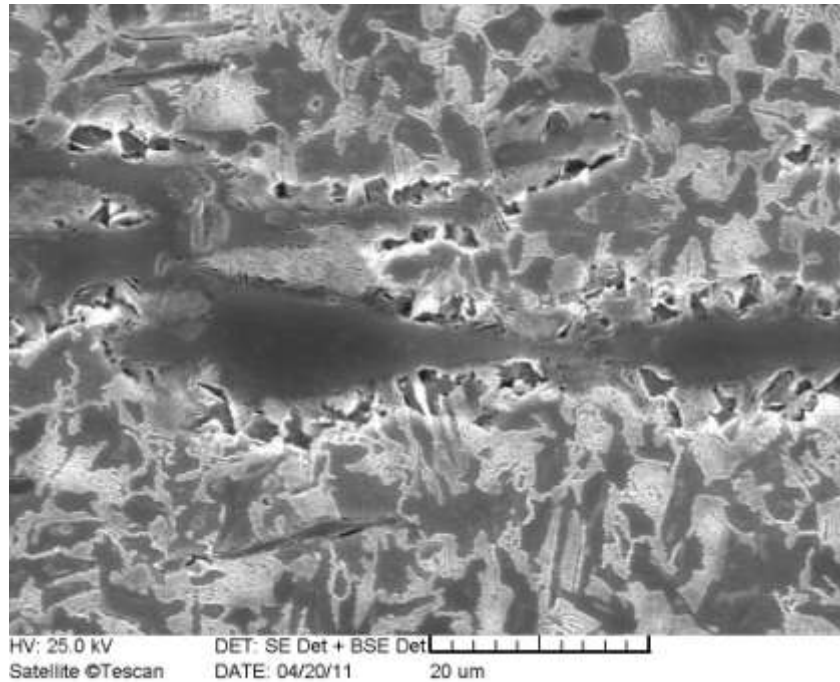
(3.21. ábra) A 3.20. ábra 1 jelű salakzárványának elemspektruma



(3.22. ábra) A 3.20. ábra 2 jelű salakzárványának elemspektruma

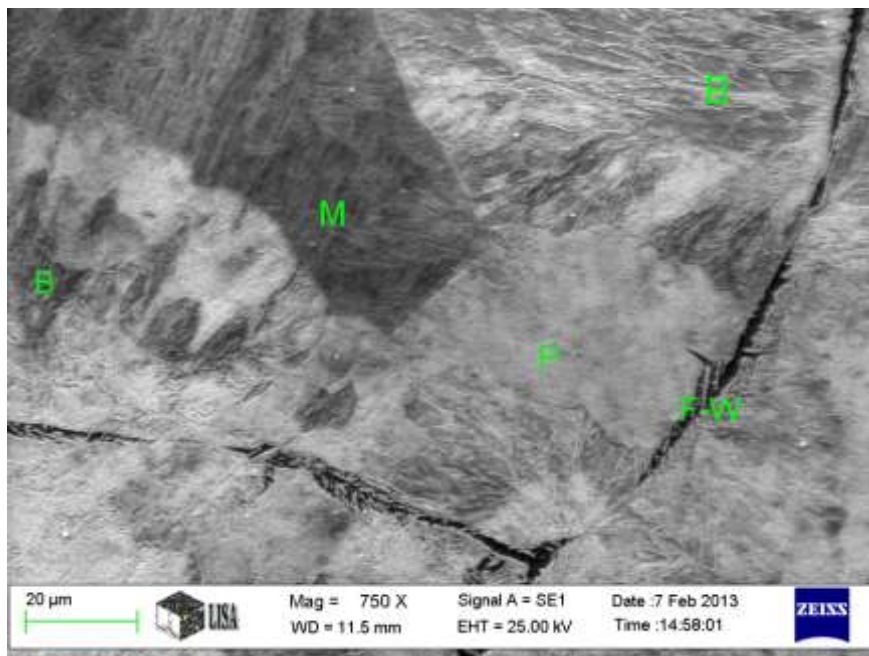


(3.21. ábra) A 3.20. ábra 3 jelű salakzárványának elemspektruma



(3.24. ábra) Salakzárvány és a körülötte lévő szövetszerkezet SEM-képe [3.10]

A régészeti vasleletek heterogén szövetszerkezetére, illetve annak pásztázó elektronmikroszkóppal való szemléletes beazonosítására jó példa a 3.25. ábrán lévő SEM-kép, amely Ordacsehi-Csereföld lelőhelyéről származó kelta kori ekepapucsból származó minta csiszolatáról készült.



(3.25. ábra) Kelta ekepapucs heterogén szövetszerkezetének SEM-képe (B – bainit, P - perlit, F-W - Widmanstätten-ferrit, M – martenzit) [3.9]

A 3.2. táblázatban az archeometallurgiai leleteknél használatos – a 3.2-3.4 alfejezetekben részletezett – anyagvizsgálati eljárások legfontosabb jellemzőinek összesítése látható.

Vizsgálati módszer	Nemzetközi rövidítés	Információ	Mintavétel	Vizsgálati költség / elérhetőség
Röntgenfluoreszcens spektrometria (energia- ill. hullámhossz-diszperzív)	XRF (ED- WD-)	kémiai összetétel (nagy és kis mennyiségű alkotók, hullámhossz-diszperzív változatban esetleg nyomelemek is)	az egész tárgy felülete roncsolásmentesen, vagy fűrt minta	közepes (ED-) / gyakori magas (WD-) / ritka
Induktív csatolású atomemissziós spektrometria	ICP-AES	kémiai összetétel (nagy és kis mennyiségű alkotók, nyomelemek)	savban feloldott, 20-30 mg-os minta	közepes / ritka
Atomabszorpciós spektrometria	AAS	kémiai összetétel (nagy és kis mennyiségű alkotók)	savban feloldott, 20-30 mg-os minta	egy-egy elemre alacsony, többre közepes / közepes
Energiadiszperzív röntgenspektrometria	EDX (EDS)	kémiai összetétel (nagy és kis mennyiségű /min 0.5 w%/ a C-nál nagyobb rendszámú alkotók, pontszerű és átlagos elemspektrumok)	SEM-vizsgálatra előkészített minta	önmagában alacsony / átlagos
Prompt-gamma aktivációs analízis	PGAA PGNA	kémiai összetétel (nagy és kis mennyiségű alkotók - bizonyos elemek csak főkomponensként)	roncsolásmentes, nincs szükség mintaelőkészítésre	magas / ritka
Elektronsugaras mikroanalízis / Részecske indukált röntgenfluoreszcencia analízis	EPMA PIXE	pontszerű vagy átlagos kémiai összetétel nagy és kis mennyiségű alkotókra, nyomelemekre, mikroszerkezet	néhány mm-es kivágott minta, vagy kisebb tárgyak	magas / nagyon ritka
Röntgen-diffraktometria, röntgen-pordiffraktometria	XRD XRPD	ásványi összetétel, csak szilárd, kristályos fázis esetén	kevés porrá tört minta, vagy szétlapított minta (ha fémes)	közepes / gyakori
Röntgen (radiográfia)	X-ray	makroszerkezet	az egész tárgy, roncsolás nélkül	közepes / gyakori
Optikai mikroszkópia	OM	mikrostruktúra, alapvető szerkezeti összetétel, hőkezelés, alakítás nyomai	néhány mm-es kivágott darab csiszolt és maratott metszete	alacsony / gyakori
Pásztózó elektronmikroszkópia	SEM	mikroszerkezeti összetétel, felszíni morfológia, alakítás, hőkezelés nyomai	néhány mm-es kivágott darab csiszolt és maratott metszete	közepes / átlagos
Keménységvizsgálat	HV	a minta anyagának felszíni keménysége	OM- vagy SEM-vizsgálatra előkészített minta	alacsony / gyakori

(3.2 táblázat) Archeometallurgiában használatos anyagvizsgálati módszerek összesítése

4. A NEM-VAS FÉMEK ELŐÁLLÍTÁSA, ALAKÍTÁSA, ÖNTÉSE A RÉGÉSZETI LELETEK FÓKUSZÁBAN

Az emberiség történetét az idők folyamán többször is korszakolták meghatározó életmódbeli, kulturális, illetve történelmi eseményekhez köthető mérföldkövek, változások alapján. A régészet eredményei alapján meghatározott korszakbeosztást régészeti korszakok alkotják, ahol az őskor és ókor fő korszakait alapvetően az eszközkészítéshez használt anyagok, illetve az alkalmazott technológiák alapján nevezték el. Nem véletlen, hogy amikor 1816-ban Christian Thomsen, a koppenhágai Nemzeti Múzeum antik gyűjteményének vezetője megalkotta a régészeti leletanyagok rendszerezésére szolgáló háromosztású modelljét, a korai korszakoknál a kőkor mellett bronzkor és vaskor elnevezést használt [4.1]. Ez a felosztás – a kőkor további tagolása mellett - az 1870-es években bővült, amikor Pulszky Ferenc a Kárpát-medencében talált nagyszámú, jellegzetes réztárgy alapján indítványozta a rézkor fogalmának bevezetését is [4.2].

A történelmi őskor és ókor közötti választóvonalat – amely természetesen időben és térben nem állandó – leginkább a városok elterjedéséhez, az első államok létrejöttéhez, avagy az írás megjelenéséhez kötik, de már a régészeti korszakok elnevezéséből is kitűnik, hogy az egyes fémek előállításának, használatának kialakulása, elterjedése döntően befolyásolta az egyes népek, földrajzi egységek kultúráját, társadalmát, életmódját. A régészeti korokon belül a térben és időben a lehető legszűkebb, már határozott jellemzőkkel leírható korszakot régészeti kultúrának nevezik. Mindazonáltal, manapság alapvetően az alábbi régészeti korszakolás használatos:

- **őskor**
 - *kőkorszak* (Kr.e. 2.5 m – Kr.e. 4500)
 - őskőkorszak/paleolitikum (a kőeszközök megjelenésétől az utolsó jégkorszak végéig; Kr.e. 2.5 m – 10 000)
 - középső kőkorszak/mezolitikum (a jégkorszak végétől a gazdálkodás kezdetéig; (Kr.e. 10 000 – 7000)
 - újkőkorszak/neolitikum (a gazdálkodás kezdetétől a fémek használatának elterjedéséig; Kr.e. 7000 - 4500)
 - *kőrézskor* (Közél-Kelet, DK-Európa: Kr.e. 4500 – 3300)
- **ókor**
 - *kőrézskor* (van ahol kimaradt)
 - *bronzkor* (korai: Kr.e.3500-2000, középső: Kr.e.2000-1600, késői: Kr.e. 1600-1200; Közép-Európa: Kr.e. 2500 – 800.; Észak-Európa: Kr.e. 1500 - 500)
 - *vaskor* (Közél-Kelet, Görögo.: Kr.e. 12. sz.-tól, Közép-Európa: Kr.e. 8. sz. - Kr.u. 1. sz.; É.-Európa: Kr.e. 6. sz.-tól)
 - Hallstatt korszak (Kr.e. 8. sz. – Kr.e. 5. sz. - több nép)
 - La Tène korszak (Kr.e. 5. sz. – Kr.e. 1. sz. - kelták)
 - *Római Birodalom kora* (Kr.e. 1. sz. – Kr. u. 5. sz.)
- **középkor (Kr.u. 5 – 15. sz.)**
 - korai középkor (5 – 10. sz.)
 - érett középkor (11 – 13. sz.)
 - késő középkor (14 -15. sz.)
- **újkor**
 - korai újkor (16 -18. sz.)
 - modern kor (19. századtól)

A fémek ismeretét és használatát már az antikvitásban is korszakoló, meghatározó jelentőségűnek fogták fel. ennek ékes példája Hésziodosz, Kr. e. 8. században élt görög költő műve, amelyben a fémek tömeges – főleg fegyverként való – használata előtti időket békés, boldog arany-, illetve ezüstkorként nevezte, majd réz-, bronz- és vaskorról írt [4.3]. Valószínűleg a békés aranykor mítosza is ilyesmiből ered.

4.1. Bevezetés a réz és ötvözetei archeometallurgiájába

A réz az első olyan fém az emberiség technikatörténetében, amelyből nagy számban készített tárgyakat, eszközöket. Ez nem azt jelenti, hogy feltétlenül a réz volt a legelső metalizált formában ismert fém. A tiszta réz 1084 °C-os olvadáspontja ugyan alacsonyabb a vasénál, de némileg magasabb a nemesfémekénél és több száz fokkal magasabb olyan egyéb, ősidőktől ismert fémekénél, mint az ón, cink, ólom, antimon. Azonban a réz természetben való elérhetősége, relatíve egyszerű előállíthatósága, illetve sokoldalú felhasználhatósága mind olyan kedvező körülményt teremtettek, ami alapján a történelem első meghatározó fémje lett.

A réz előállítását, megmunkálását, feldolgozását technikatörténeti szempontból a következő technológiai alapfolyamatok szerint lehet csoportosítani:

1. A fémes réz előállítása

- oxidos és karbonátos érceiből
- szulfidos érceiből

2. A réz megmunkálása

- termésrész hideg megmunkálása
- termésrész lágyítása és megmunkálása
- kohósított (ércekből kinyert) réz megmunkálása

3. Rézöntés

- öntés egyrész és két- (vagy több) rész formákba
- viaszveszejtéses öntés

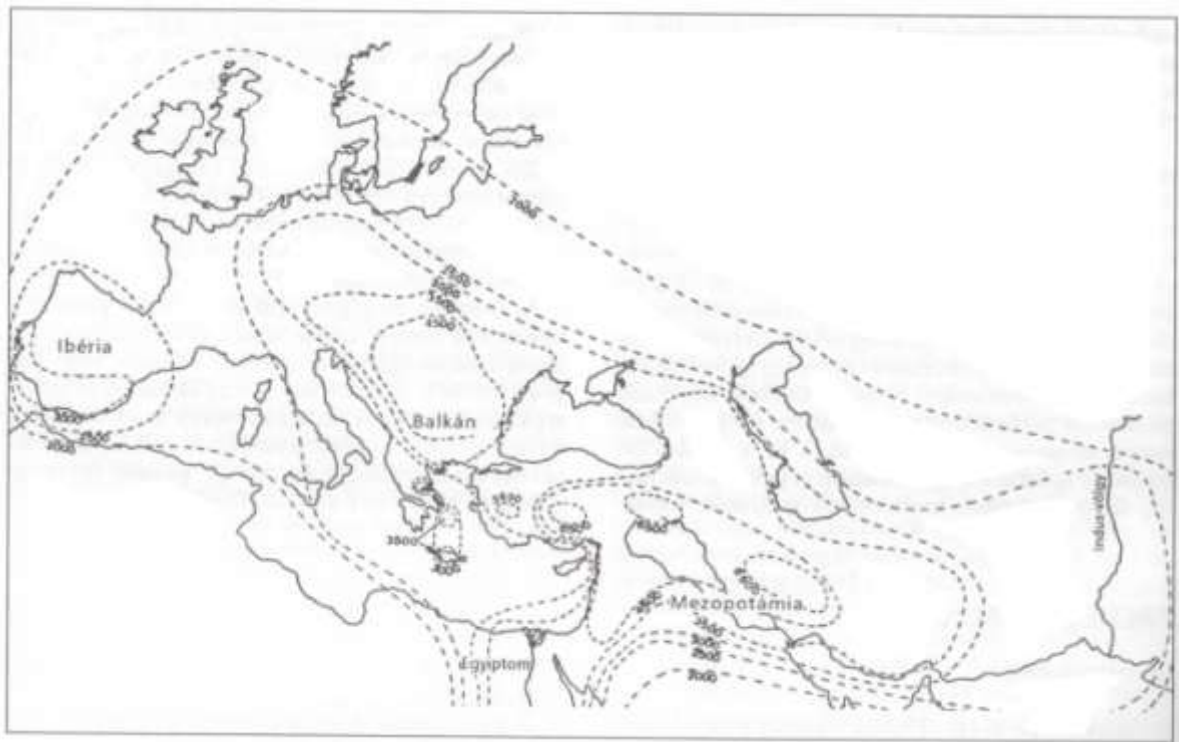
4. A réz ötvözése

Régészeti szempontból a réz és ötvözeteinek meghatározó, leginkább vizsgált, kutatott korszakai kétség kívül a réz-, illetve bronzkor. Ezekben a korszakokban volt a rézötvözetek felhasználásának legszélesebb a spektruma, illetve a réz- és bronztechnológiák ekkor egyértelmű értékjelzői voltak az adott kultúrák, társadalmak közti technikai fejlettségi, gazdasági vagy akár militáris különbségeknek.

4.1.1. Réz- és bronztechnológia a kőrézkorban és az ókorban

A 20. században a régészeti ásatások elszaporodásával, de főként a régészeti anyag tudományos feldolgozása körülményeinek, előírásainak egységesebbé válásával, szigorodásával átalakult a kezdetben aránylag rövid átmeneként tekintett kőkorból rézkorra való váltás fogalma. Elszórtan, eseti jelleggel még kifejezetten kőkori környezetben is találtak korábban réztárgyakat – néhány kisebb ékszert – de a Kr. e. 4. és 3. évezred fordulóján, viszonylag rövid idő alatt tömegesen előforduló fémleletek hatására definiálták az első fémkorszakot. Mindez a városi civilizáció első mezopotámiai (sumer) államaihoz (Ur, Uruk, Lagas, Umma) köthető és nem is annyira a rézhez, mint inkább az arany – illetve az akkortájt megjelenő ezüst – ékszerekhez, szobrokhoz, kultikus fegyverekhez és egyéb dísztárgyakhoz. A korábban kőkorinak definiált időszakból előkerülő rézleletek számának növekedése azonban megteremtette a több évezredes átmenetet jelző kőrézkor (chalkolitikum, eneolitikum) fogalmát. Ezzel együtt bebizonyosodott, hogy kő- és csonteszközöket ugyanakkor még a kifejezett bronzkor első évezredeiben is sok helyen használtak, sőt ma már nyilvánvaló, hogy a rézkor teljes időtartama alatt a szerszámkészítés fő alapanyaga továbbra is a kő maradt, a fémtárgyak státuszszimbólumok, vagy ékszerek, díszek voltak, valódi használati eszközöket alig készíthettek rézből, gyakorlatilag csak az uralkodói, illetve igen gazdag háztartások számára.

A rézművesség a klasszikus elképzelés alapján mezopotámiai, illetve anatóliai eredetű, azonban a legújabb régészeti kutatások kronológiai mérései alapján Európában, a Balkánon is azonosítható egy ősi kialakulási terület, ahogy az a 4.1 ábra térképén bejelölt izokronok által is látható. Ezek a vonalak jelzik az egyes területeken talált legrégebbi, rézművességre utaló lelet korát.



(4.1. ábra) A rézművesség elterjedése régészeti izokronok alapján [2.25]

A fémes rezet először az ember termérszéz formájában találta meg és használta. Ezt a lágy fémét az érceiből, vegyületeiből előállított (kohósított) réztől korábban sokkal tisztábbnak gondolták, de a későbbi kutatások, vizsgálatok alapján ezt egyáltalán nem lehet biztosan kijelenteni. A termérszéz ugyanis valójában igen heterogén szerkezetű anyag. Relatívén nagy szemcseméretű, tiszta szövetrészek mellett gyakran megfigyelhetők intersztíciós jellegű, Ca-, Al-, Mg- és Si-tartalmú szennyező zárványok. Emellett mikroszerkezeti vizsgálatok ezüstöt, arzént, vasat, nikkelt, ólmot és ritkán antimont is kimutattak bizonyíthatóan termérszézben készült tárgyakban, az ezüst esetében 0.6%-ig, az arzén esetében akár 15%-ig [2.24]. Anatóliában (Çatal Hüyük, Cayönü) és Irán nyugati részén (Ali-Kos) már a Kr. e. 8-7. évezredből is kerültek elő apró, termérszézben készült tárgyak (rézgyöngy, rézhuzal) szórványleletei [2.25]. A réz ásványait – persze nem beazonosítva – már az ősi egyiptomi és folyamközi kultúrákban is használták, a kék és zöld szín festésére kerámiáknál és kozmetikumokban [2.24].

A termérszéz felhasználásával csaknem egy időben felfedezték, hogy ha a fémét hidegen próbálják kovácsolni, alakítani, akkor az hamarosan rideggé, törékennyé válhat. Azonban 600 °C feletti hőmérsékleten mindez kiküszöbölhető, így hamarosan elterjedt a réz lágyítás utáni alakítása. A termérszéz újrakristályosodási – így lágyítási – hőmérsékletét jelentősen növelheti annak ezüsttartalma. Több rekonstrukciós kísérlet is bizonyítja, hogy a termérszéz alapos megmunkálásához alapvetően szükséges a fém előzetes lágyítása [4.4]. Relatívén sok korai réztárgyak készülhetett termérszézben, a kisebb darabok egyszerűen hidegen kalapálva, a nagyobb, vastagabb tárgyak (pl. rézbalta) a termérszéz öntésével.

Az említett közel-keleti példák mellett a termérszézben készült tárgyak jellemző kultúrája az USA északi és Kanada déli részét érintő „ó-réz kultúra” volt, Kr. e. 3000 és 1500 között. A Felső-tó vidékéről igen nagy számban kerültek elő jól megmunkált termérszéz-tárgyak (például dárdahégyek) ebből az időszakból [4.5]. Az 59 és 108 közötti Vickers-keményiségű anyagból készült tárgyak általános készítési módszere az volt, hogy kalapálták és lágyították – gyakran 800 °C körüli hőmérsékleten - a fémét addig, amíg annak alakja a kívánt formához nagyon hasonlított, majd a procedúrát lokális vagy teljes hidegalakítással fejezték be. Előfordult olyan eset is, amikor a teljes méretében lágyított tárgyhoz végül már nem nyúltak [2.24].

Archeometallurgiai szempontból akár korszakoló jelentőségű is lehetne az az esemény, amikor először állítottak elő szándékosan ércből rezet, illetve belőle valamilyen tárgyat. Ez azonban időben és térben korántsem határozható meg egyszerűen. Minden bizonnyal a réz extraktív metallurgiájának első lépései véletlenül alakultak ki. A kőkori fazekasság, kerámiaégetés tűzhelyei, kemencéi a termérszéz megolvasztásához is alkalmasak voltak, de eredendően oxidáló atmoszférájuk arra eredendően nem volt alkalmas, hogy a tűztérbe bármilyen módon belekerülő karbonátos vagy oxidos rézércből fémes réz redukálódjon. Ehhez valamiféle „rendkívüli eseményre” volt szükség, amely redukáló atmoszférát teremtett. Ez lehetett véletlen – akár baleset, vagy hibás üzem – vagy szándékos résztevékenység nem várt velejárója. A fazekassággal együtt járt a mázakkal való kísérletezés, amely egyrészt dupla részes, oxigénhiányos hevítést lehetővé tevő, zárt terű tűzhelyeket, másrészt színező, folyósító anyagként rézércet használatát jelentette. Az első primitív, 15-20 cm-re a földbe mélyesztett rézolvasztó tűzhelyek nem sokat árulnak el a technológia megszületéséről. Az izraeli Timna-völgy területén – amely modern rézbányáiról is ismert – találták a legkorábbi maradványait kőrézkori rézolvasztó kemencének (4.2. ábra), a radiokarbonos kormeghatározás Kr. e. 4460-4240 közé teszi a kemencék működését [4.6].



*(4.2 ábra) Kőrézkori rézolvasztó kemence maradványa az izraeli Timna-ból (Kr.e. 5. évezred)
[4.7]*

A réz érceiből történő pirometallurgiai előállításának nyomai Kr.e. 3500 előtt meglehetősen ritkán kerültek elő. Gyakran nem lehet egyértelműen meghatározni korai kőrézkori réztárgy esetében, hogy az alapanyaga termésvéz, vagy kohászati termék. Utóbbira az arzén és/vagy a nikkell határozott jelenléte utal, az arzén esetében 1-3%-tól akár 10%-ot meghaladó mértékben, a nikkelnél pedig 0.1-2% közötti érték a jellemző. Mindenesetre az indirekt módon árulkodó, hogy a kőkorszak után nem működnek tovább a fazekastűzhelyek ugyanolyan konstrukcióként rézolvasztásra, hamarosan rájöhettek tehát, hogy nem az a szerkezet az ideális. Ugyanakkor a termésvéz olvasztása, illetve a réz ércből való kinyerése közötti technológiai átmenet kiinduló lépése lehetett az is, hogy a termésvéz – egyébként oxidáló atmoszférájú – megolvasztásakor a rézdarab felszínén megtapadt réz-oxidos, réz-karbonátos üledék az olvasztótégelyben lokálisan redukáló környezetbe került és az olvasztás több fémes rézet eredményezett, mint azt a termésvéz mérete alapján előzetesen várták.

Amint arról már szó esett, a Tigris és az Eufrátesz alsó régióiban, torkolatvidékén Kr.e. 3500-3000 táján kialakult és rohamosan fejlődő sumer városállamok rézszükséglete ösztönözte a rézércek gyűjtését a magasabban fekvő régiókból, illetve ösztönzője volt az ércekből való rézkinyerés technológiája elterjedésének. Az elterjedés a leletek tanúsága szerint relatíve gyors volt Európa irányába. Mindazonáltal már a Kr.e. 5. évezred végétől a 4. évezred közepéig terjedő időszakból is több mint 500 réztárgy került elő, főként a Balkánról (Szerbia, Bulgária), illetve a Kárpát-medencéből (pl. tiszapolgári és bodrogkeresztúri fejszék), a rézércbányászat és rézmetallurgia legrégebbi európai nyomai pedig szintén az 5. évezredből származik, a szerbiai Rudna Glava lelőhelyéről [4.7, 4.8].

Bár korai rézércolvasztás metallurgiai alapjai ugyanazok voltak, a technológia helyileg valamelyest különbözött, az adott népcsoportok, törzsek technikai színvonala szerint. Bár a

kőrézkor rézkohászati technológiájának részleteit nem ismerjük, a maradványok alapján alapvetően háromféle rézérc-olvasztási eljárás különböztethető meg:

1. Olvasztótégelyes módszer: Általában jó minőségű, vasat általában alig, vagy egyáltalán nem tartalmazó oxidos rézércet faszénnel olvasztottak, illetve redukáltak. A tégely hevítése a korai időkben – a külső, tégelyfal által közvetített hevítés helyett – úgy történt, hogy rendszerint felülre helyezték a faszenet, amely égésekor a hő lefelé áramlott az adag felé. Ez a módszer rendszerint csekély mennyiségű visszamaradt anyaggal járt.
2. Kifolyó salak nélküli kemencés eljárás: Ennél az eljárásnál kevesebb tiszta rézérc mellett kvarc és vasoxid-tartalmú salakképző anyagot használtak, esetleg olyan ércet, amely relatíve sok Si- és Fe-oxid tartalmú meddőt hordozott. Mindazonáltal ennek az eljárásnak a régészeti maradványait nem könnyű megkülönböztetni az olvasztótégelyes módszerétől. A salak összetétele jelenthet ebben támpontot. Egy felülről, mélyen a betétbe nyúló fűvóka csinálhatott gyakorlatilag kemencét a tégelyből. A legkorábbi ilyen típusú kemencék tulajdonképpen földbe mélyített, kibélelt lyukak voltak. A klasszikus példája ennek a típusú kemencének a 4.2. ábrán látható.
3. Kifolyó salakkal működő kemencék: Az előzőhöz képest ez a kissé később kialakult eljárás alapvetően abban különbözött, hogy a relatíve nagy mennyiségben keletkező fekete, üvegszerű fayalitos ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) salak kifolyik a kemencéből.

Mindamellet, hogy a kőréz korban a mindennapos használati eszközök döntő többségben nem fémből készültek, az előkerült réztárgyak között gyakori volt a relatíve magas arzéntartalmú (általában azért 5-7% alatti, extrém esetben 15-25%-os értékben) darab, néha olyan esetben is, amikor az vélhetően olvasztott termésrészéből készült. Arzén elméletileg úgy kerülhetett a rézbe, hogy a réz olvasztás redukáló körülményei között magas arzéntartalmú anyagot (ásványokat) adagoltak, de úgy is, hogy maga a kohósított rézérc az, ami nagy arzéntartalmú. Magas arzéntartalmú rézötvözet keletkezik, ha viszonylag mély tégelyben a rézoxidos érc mellett arzén-tartalmú szulfidásványt (pl. auripigment - As_2S_3) is olvasztanak redukáló környezetben. Az önmagában egyébként relatíve illékony fém arzénnek (forráspontja $613\text{ }^\circ\text{C}$) csak igen kis hányada veszik el a rendszerből, számottevő arzénvesztés csak melegkovácsolás alatt következhet be.

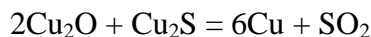
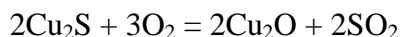
Az arzéntartalomnak mindazonáltal fontos jelentősége van a réz archeometallurgiájában. A 3-10% közötti arzén-tartalmú réz hidegkovácsolása lényegesen keményebb, jobb mechanikai tulajdonságú fémet eredményezett, mint a tiszta réz. Ez a különbség azonban öntött állapotban korántsem figyelhető meg egyértelműen, így mindez alapvető oka lehetett annak, hogy a termésrész megmunkálásának technológiájából az érceiből kohósított réznek inkább a hideg és melegmegmunkálása (kovácsolás) fejlődött közvetlenül és nem az öntési technológia. A főként melegen – de esetenként bizonyíthatóan mindvégig hidegen – alakított réztárgyak leleteinek mikroszkópos anyagvizsgálata során megfigyelhető, fémbe záródott salak- és oxidásványoknak az alakítás irányában jellegzetesen megnyúlt alakja egyértelműen utal a kovácsolásra.

Ugyanakkor ez a természetes úton történő ötvözet-kialakulás számos térségben valóban azt jelentette, hogy a tiszta réz felhasználásának korszaka gyakorlatilag kimaradt, a fém réz használata tulajdonképpen rögtön ötvözetként kezdődött. Mezopotámiában a Kr.e. 3000 és 1500 közötti időszak valamennyi fémtárgyának mindegy harmada arzénes rézből

készült, Egyiptomban a Kr.e. 3. évezred végéig főként arzéntartalmú érceket olvasztottak, de Peru északi partvidékén megtalált, nagyobb kiterjedésű (több mint 50 kemencét tártak fel) rézolvasztó kemencetelepeken a Kr.u. 10-16. században is kizárólag arzénes rezet állítottak elő [2.25].

Az előállított réz tisztasága, összetétele természetesen alapvetően a felhasznált rézérc jellegétől függött. A kőrézkorban és az ókorban a rezet karbonátos (pl. malachit – $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) illetve oxidos (pl. kuprit – Cu_2O) formában tartalmazó ércekből aránylag egyszerű, direkt úton kinyerhették a fémeket, faszenet használva fűtőanyagként és redukálószerként, illetve fúvókán át – kisebb tömlős kézi fújtatóval, esetleg hosszabb csövön át szájjal - befújt levegővel biztosítva a megfelelő égéshőmérséklethez szükséges oxigént. Lényegesen könnyebben juthattak viszont a rezet szulfid alakban tartalmazó ércekhez (kalkozin – Cu_2S és kalkopirit – CuFeS_2), illetve jellemző alapanyagok lehettek a komplex szulfidos formátumú ún. fakóérc (tetraedrit) amelynek egyik legjellemzőbb tagja a rézarzenit (tennantit – $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$).

A szulfidos ércek feldolgozása azonban a technológia kibővítésének szükségességét jelenti, mivel egy relatíve hosszabb, $800\text{ }^\circ\text{C}$ alatti hőmérsékletű, oxidáló pörkölés szükséges ahhoz, hogy a szulfidokból – és nem csak a réz-szulfidból – először oxidok képződjenek. Az olvasztás során a vas-oxid vas-szilikát (fayalit – $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) formájában a salakba kerül, azonban az arzén – például az említett fakóérc-fajta használatakor – redukálódva ötvözetet alkothat a rézzel. A réz szulfidos érceiből való előállítása közben lezajló alapvető kémiai reakciók a következők:



Nem véletlen azonban, hogy a „klasszikus” bronz fogalmát az ónnal ötvözött réz teremtette meg. Míg az arzén-szulfidos rézércből előállított fém előnyös mechanikai tulajdonságai alapvetően az alakítás hatására jelentkeztek, az ón esetében erre nem volt szükség, elegendő volt a megfelelő arányú ötvözés. A réz ónnal történő ötvözésének korszakalkotó technológiája azonban lassan fejlődött, a kőrézkor tipikus közel-keleti térségében például hosszú időn keresztül együtt használtak arzénes és kis óntartalmú rezet.

A fejezet bevezetőjében található korszakolás a bronzkor korai, középső és késői szakaszokra is bontja. Ez azonban koránt sem minden tájegység esetében tehető meg egyértelműen, illetve gyakran inkább a kerámialeletek jellegének eltérésén alapul, mint a bronztárgyak, a bronztechnológia változásán. Ennek ellenpéldája a Brit-szigetek, ahol a korai bronzkorban arzénes rezet, illetve arzén és ólom nélküli, relatíve kis óntartalmú bronzot, a középső szakaszban gyakran a 10%-nál is nagyobb óntartalmú bronzot, a késői szakaszban pedig a jellemzően 10% körüli óntartalmú bronzot használtak, amelybe bizonyos tájakon – pl. Délkelet-Britanniában – ólmot is ötvöztek [2.24]. Van példa olyan tájegységre is, ahol az ólom használata végigkíséri a bronzkort. Az ideálisnak tartott ón-réz arányként az idők folyamán egyértelműen az 1:10 aránypár alakult ki, amely a középkor folyamán is alapvetően megmaradt, esetleg 1:8 arányig változott, természetesen speciális anyagoknál (pl. harangöntés) ettől jelentősen eltérhetett. Mindazonáltal, a technológiát figyelembe véve elfogadható a bronzkor kettős tagolása is, megkülönböztetve a technikák kifejlődését, mintegy kísérletezést jelentő korai, illetve a markáns termelékenységet, domináns technológiákat jelző,

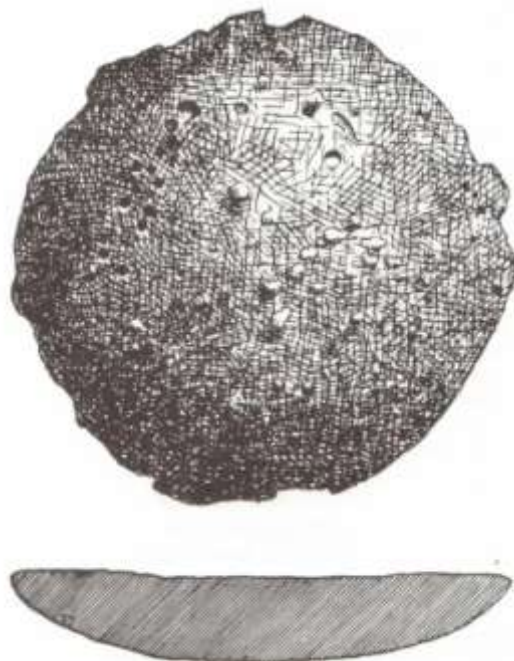
kiterjedt korszakot és archeometallurgiaiilag – a technikát és technológiát tekintve - is célszerű ezt a tagolást követni.

A korai, jellemzően alacsonyabb óntartalmú bronzokra magyarázat lehet a bronz előállítási technológia kialakulásának véletlenszerűsége. Ezzel kapcsolatosan számos elmélet látott már napvilágot. Az egyik legismertebb Theodore Wertime, a közel-keleti kohászati technológiákat (is) kutató tudós rekonstrukciós kísérletek alapján felállított elmélete, miszerint a korai rézkohászok előszeretettel adagolták az érclerakódások felső, színes, változatos, könnyen bomló rétegeinek (gossan) darabjait a rézolvasztó tűzhelyekbe, kohókba, mivel azt tapasztalták, hogy így könnyebben elválik a réz a salaktól. Ezek között persze kassziterit-tartalmú darabok is előfordultak, és megfelelően redukáló közegben aztán akár 3-4% óntartalmú ötvözet is keletkezhetett [4.9]. Ezek után empirikus tapasztalataik, az ércek színe, állaga alapján már azonosítani tudták a kassziteritet és annak szándékos adagolására is sor kerülhetett.

Kis (1-2%-os) óntartalmú és 1-4% arzéntartalmú bronz – ún. arzénbronz – készülhetett közvetlenül ón- illetve arzéntartalmú ércekből is. Ezeknek a bronzoknak a mechanikai tulajdonságai hidegkovácsolás hatására lényegesen jobbak lettek, mint a tiszta rézből készülték. Az ón és arzén pozitív hatása összeadódott és közel azonos mértékben javította a bronz mechanikai tulajdonságait. A következő technológiai szint az ón szándékos ötvözése volt a rézzel, akár oxidos (szulfidos), akár fémes állapotból kiindulva (erről részletesebben az ón archeometallurgiáját tárgyaló fejezetben).

A korai és középső történeti bronzkorszak közötti átmenet idejéből származó rézalapú tárgyak esetében megfigyelhető volt az arzéntartalom egyre csökkenő mértéke, gyakran olyan területeken is, ahol eredetileg arzénban dús érceket használtak. Ez bekövetkezhetett az olvasztási technológia változásával, ami által a keletkező fém hosszabb ideig volt oxidáló környezetben, avagy a felhasznált érc jellegének alapvető változása miatt. Ugyanakkor helyenként az antimon is betölthette az alapvető ötvöző szerepét. Miske Kálmán 1896 és 1928 között a nyugat-magyarországi Velem melletti Szent Vid-hegyen mintegy négyszáz bronz tárgyat talált, többek között sarlókat, baltákat, ékszereket, jellemzően 20%-ot is elérő antimon-tartalommal, amelyek a Kr.e. 1100 és 950 közötti bronzkorra datálhatók. A területen fúvócsöveket, olvasztótégelyeket és közel ötven öntőformát találtak, a legtöbbjüket nyeles fokosok készítésére használták [4.10].

A bronzkor technológiája alapjaiban nem sokban különbözhetett a kőrézkorban használatostól. A maradványok leginkább salakdarabok, salakhalmok, amelynek datálása igen nehéz feladat, önmagában gyakran szinte lehetetlen, mivel a rézkohászati salak összetételének jellege az évezredek során nem igazán változott. Az alapvető összetevők a fayalit (vas-szilikát), valamint változó mennyiségű Al- és Ca-oxid, illetve mindezek komplex oxidjai. A korabeli technológiát teljes egészében nem ismerjük, olvasztókemencében történt a fém előállítása, elválasztása, majd azt rendszerint hosszabb-rövidebb vékony rúd (ingot) öntötték vagy a kemence alját formázva sík-domború (plánkonvex), lepényszerű alakban dermedt meg (4.3. ábra).

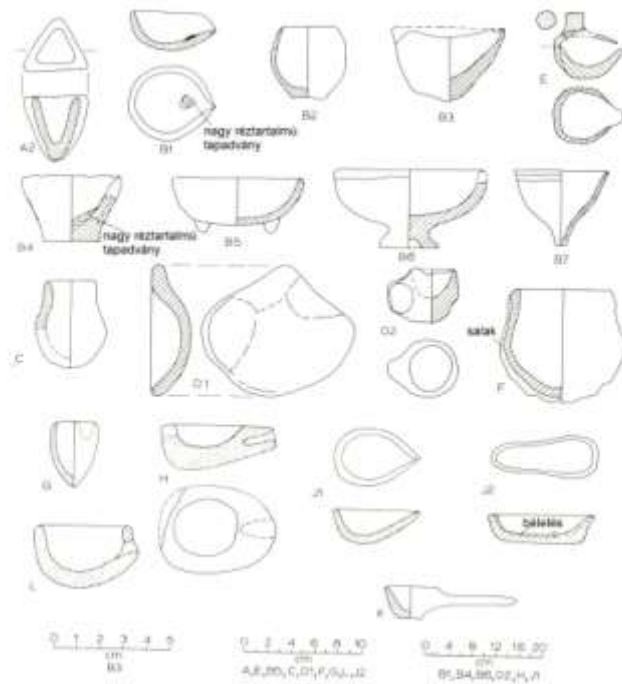


(4.3. ábra) Késő bronzkori sík-domború rézlepleny – átmérője: 145 mm [2.24]

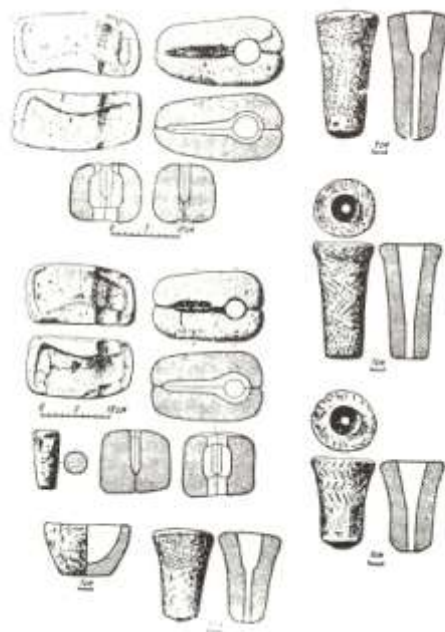
A félkész rudakat kalapálással tovább nyújthatták, akár 25-30 cm hosszúságúra, hogy könnyebben törhető, darabolható legyen. A kovácsolás mellett a kohósítással nyert réz (rézötvözet) másik lehetséges sorsa a tégelyes olvasztás és öntés lehetett. Iparrégészeti, technológiai szempontból az olvasztótégelyek maradványai az egyik legfontosabb réz- és bronzkori leletek. Az agyagból vagy kőből készült olvasztótégelyt használhattak fém (termésréz, kohósítással nyert réz, hulladékfém) megolvasztására (melting) és formába öntésére, de – amint arról korábban szó esett – esetenként magára az ércekből történő fémkinyerés folyamatára is (smelting). A két folyamat között természetesen lényeges dolog különbséget tennünk, bár régészetileg nem könnyű. A salakösszetételek adhatnak erre támpontot, mivel a rézérc kohósításának salakja túlnyomórészt vas-szilikátból áll – bár a korai tégelyes ércolvasztás gyakran igen kevés mennyiségű, vasszegény salakot hagyó, gazdag rézércet használó eljárás volt – a tégelyes fémolvasztás salakja lényegesen kevesebb vas-oxidot, viszont annál több réz-oxidot, valamint kalcium-alumino-szilikátot, esetleg ólom- és ón-oxidot, illetve hamut tartalmazhat. A rézérc kohósításának salakjai esetében érdemes annak kéntartalmát is megvizsgálni, amely a felhasznált ércek szulfidos jellegéről adhat információt.

A tégelyes fémolvasztás maradványainál a tégelyben keletkező salaktól meg lehet különböztetni a tégelyen kívül keletkezett salakszerű anyagot. Előző esetben a komplex szilikátok az érckohósításnál keletkezett és az újraolvasztandó fémmelel együtt érkezett salak, illetve a tégelyfal döntően Al-szilikátos anyagából származnak, utóbbi pedig a faszén hamujából és az agyagtégely letöredező anyagából keletkezik. Ha az olvasztás oxidáló atmoszférában történt, bizonyos ötvöző elemek (pl. ólom) az olvadákból a salakba oxidálhattak, de gyakran találtak arra utaló nyomokat, hogy a tégelyben az olvasztás faszénréteg alatt történt, redukáló atmoszférában [2.24]. Volt példa arra is, hogy nyers fémréz 6-18%-os vastartalma inert atmoszférában történt újraolvasztás esetén nagyságrendekkel csökkent [4.11].

A korai olvasztótégelyek alakja, mérete igencsak különböző volt (4.4. ábra). Mellettük a technológiáról árulkodó egyéb leletek a fűvókák és öntőformák maradványai (4.5. ábra). Előzőek jellemzően kiégetett agyagból – kemencébe érő végükön gyakorta üveges salaktapadvánnyal – utóbbiak jellemzően kőből vagy agyagból készültek. Találtak bronz öntőformákat is, amelyet vélhetően viaszöntésre használtak a viaszveszejtéses öntés viaszmintájának kiöntésére (4.6. ábra).



(4.4. ábra) Bronzkori, vaskori és római kori olvasztótégelyek [2.24]

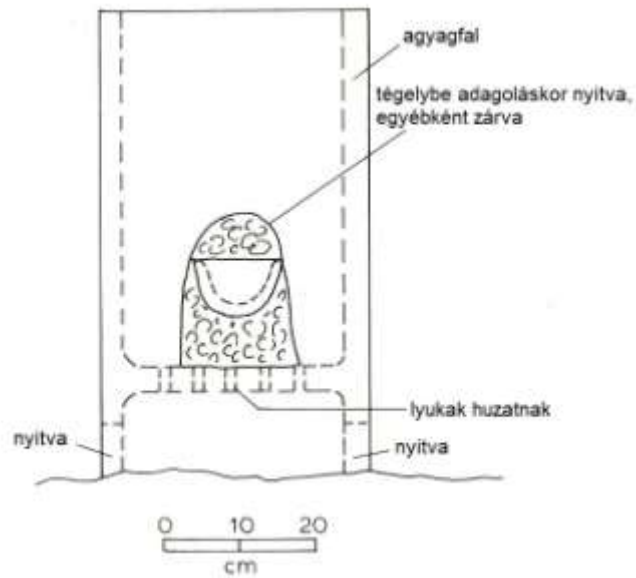


(4.5. ábra) Kőből készült öntőformák, agyagfűvókák és olvasztótégely egy bronzöntő sírjából (Kr.e. 2000-1800, Kalinovka [4.12])

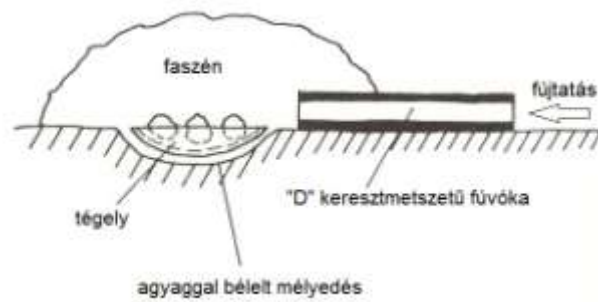


(4.6. ábra) Bronz öntőformák (Kr.e. 1400-1000, Nagy-Britannia) [2.24]

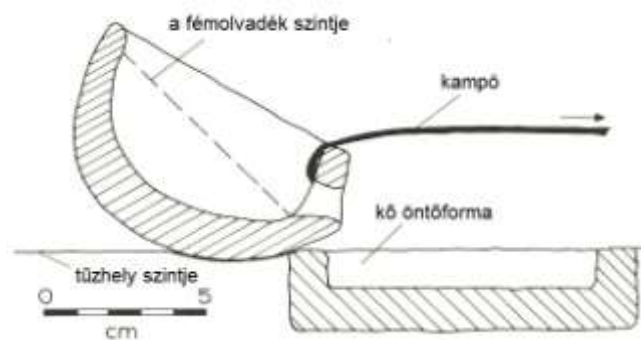
Amint arról a fejezet elején szó esett a bronzkor hármás régészeti tagolása inkább kerámia-alapú, mint a fémek és a fémtechnológiák változásának függvénye. Mindazonáltal a korai időszakban gyakran használt rezet, illetve arzénos rezet arányában fokozatosan felváltotta a bronz (nagyjából a középső bronzkorban), majd a késői „totális” bronzkorban az előállított ötvözet mennyiségének növekedése is látványos volt. Az alkalmazott technológiában ez a fajta változás alapvetően abban jelentkezett, hogy amíg a korai időszakban a készített tárgyak végső alakját rendszerint kalapálással, kovácsolással érték el, addig a késői bronzkor tárgyait legtöbbször kétrészes formába való öntéssel készítették és alig, vagy egyáltalán nem igényeltek öntés utáni alakítást. Ezzel együtt járt az egyre kifinomultabb öntési technika, azaz a kohósítással nyert félkész terméket (ingot) tégelyben újraolvasztották, finomították, ötvözték a jobb anyagminőség, illetve önthetőség érdekében. A bronzolvadék folyékonyságának növelése érdekében hozzáadagolt ólom (általában 5-10%) tipikus jellemzője a késő bronzkori tárgyaknak. A kohósítással nyert nyersrész súlya kultúránként változó volt. Míg Európában kisebb kemencékben általában 2-4 kg-os síkdomború rézlepenyeket állítottak elő és csak a római időszakra datálható 20 kg körüli tömegű darabok előkerülése, addig például Kínában 30-40 kg-os tömbök is előkerültek a kemencéből. Különböző jellegű, tégelyt és kemencét alkalmazó technika rekonstrukciós rajzai láthatóak a 4.7-4.10 ábrákon.



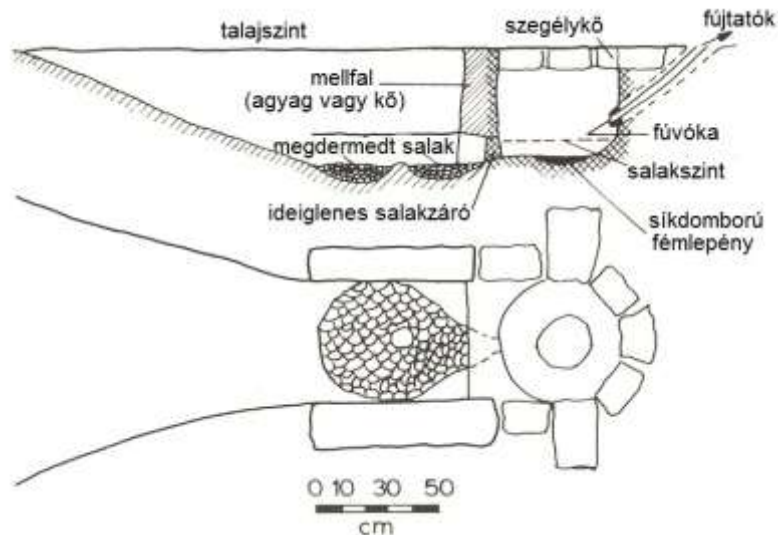
(4.7. ábra) Kőrész kori olvasztótégelyes kemence (Kr.e. 3300-3000, Abu-Matar) [4.13]



(4.8. ábra) Tégely és fűvóka alkalmazása korai bronzkori kovácstűzhelyként (Ciprus) [2.24]



(4.9. ábra) Olvasztótégely és öntőforma késő bronzkori alkalmazása (Kr.e. 1500-1200, Görögország) [4.14]



(4.10. ábra) Tipikus késő bronzkori rézérc-olvasztó kemence (Kr.e. 1400-1200, Timna, Izrael)
[2.24]

A késői bronzkorszak megnövekedett volumenű fémelőállítására nem volt véletlen. A Kr.e. 2. évezred második felében a bronztárgyak korábbi kultikus, díszítő szerepe mellett egyre inkább dominált a fegyverzetkészítésre való felhasználás igénye is, sőt már mindennapi használati tárgyak (sarlók, kések, kapák) is egyre gyakrabban készültek bronzból. A megnövekedett nyersanyagigény vitte rá a korabeli rézkohászokat a szulfidos ércek felhasználására, amely a technika már említett kibővítését igényelte. A legnagyobb előállítók továbbra is a mezopotámiai, föníciai városok voltak. Jellemző példa, hogy Ciprus szigetének neve is a rézből származik, az ottani gazdag szulfidos érckelőhelyekre utalva. A bronzkereskedelem az egész Mediterráneumot behálózta és a bronz adás-vétele mellett az előállításához szükséges ón felkutatására is szolgált. A réz- és ónércek elvileg előfordulhattak egy helyen, de igen ritkán akadt példa közös bányászataikra. A nagyobb nehézség az ón beszerzése volt, így annak kereskedelmi értéke igencsak felértékelődött. A túlzottan megnövekedett bronzigény és a Földközi-tenger keleti vidékének az ún. „tengeri népek” általi Kr.e. 12. századi elárasztása - ezáltal az addigi állandó kereskedelmi útvonalak többségének megzavarása, megszűnése – ezért aztán fokozatosan előtérbe helyezte a vastechnológiát, amelyet akkor már ismertek a Közel-Keleten, de az alapanyag könnyebb beszerezhetősége miatt ekkortól egyre többfelé mutatkozott igény a vaselőállítás eljárásának elsajátítására, illetve az egyébként szeszélyes, nehezkesebb technológia fejlesztésére, megbízhatóvá tételére.

Fokozatosan, de biztosan beköszöntött a vaskor. A bronz természetesen nem vonult ki a társadalmi életből, de ismételten megmaradt kultikus, díszítő, gazdagságot kifejező, értékteremtő szerepében. Emellett a vaskori rézművesség legjellemzőbb újonsága a cink rézötvözetekben való megjelenése és elterjedése volt. A bronzkorban a cink hiányzott az ötvözetekből, illetve esetleg véletlen módon minimális szennyezőként került bele, a réz-cink ötvözet, azaz a sárgarézt ismerete a Kr. e. 1 évezred kezdetére datálható. Egyiptomban a Kr.e. 1. század utolsó negyedéig nem jelenik meg a cink, de aztán a Római Birodalomban igen gyorsan elterjedt a sárgarézt ismertsége. Legfőként ékszerek, fibulák, érmék, fegyverdíszítések készültek sárgaréztből. A sárgaréztből készült tárgyak, illetve maga a nyers fém igen komoly export terméke volt a birodalomnak. Mindazonáltal a Római Birodalom korai korszakára volt inkább jellemző a cink ötvözőként való használata. A Kr. u. 1 század közepétől a római érmék

cinktartalma fokozatosan, de markánsan csökkent, egyre inkább felváltotta az ötvözetekben ón és az ólom, mígnem a 3. század közepére szinte el is tűnt az érmékből [4.15]

A rézötvözetet a cink keményebbé, nagyobb szakítószilárdságúvá, jól önthetővé, viszont nehezebben alakíthatóbbá teszi, 35-40%-os cinktartalmú fém már csak melegítve alakítható megfelelően. A 20% körüli cinktartalmú sárgaréz színe hasonlít az aranyéhoz, amely nem volt mellékes a korabeli kultikus és díszítő funkciót tekintve. Mindazonáltal fémcsinket még a középkorban sem tudtak előállítani. Helyette porrá tört kovacinkércsel (kalamín) együtt olvasztottak rezet, faszénnel beborítva, redukáló körülmények között. A cink-karbonát és cink-oxid redukciója után a diffúziós lehetőségekhez mérten alakult aztán ki az ötvözet végső összetétele.

A római kor utáni rézkohásatról igen keveset tudunk, a hozzá kapcsolódó régészeti anyag volumene össze sem hasonlítható a bronzkori leletanyaggal. Fémelőállítási technológiák alkalmazására gyakran csak a középkori érlelőhelyek, illetve a rézérc kitermeléséről szóló források utalnak. A kevés kivétel egyike Theophilus Presbyter: *Shedula diversarium artium* című műve, amely részletesen leírja a réz ércből történő kinyerésének a 11-12. században ismert eljárását, a hozzá szükséges eszközök elkészítésének és használatának menetével együtt [4.16]. A 14-15. századi technológia – amit általában „német eljárásnak” neveznek, megkülönböztetve a későbbi „angol eljárástól” – általában szulfidos rézérceket használt. Az eljárásban előzetesen sekély, nyílt gödrökben fatűzön, néha több mint egy hónapon át pörköltve, a réz-szulfid oxiddá alakult át, majd faszénnel fűtött kemencében redukálták ki a fémeket. Legközelebb Georgicus Agricola *De re metallica* című, 1556-ban kiadott művében találkozhatunk, immár metszetekkel illusztrálva a réz kohászatának akkori technikai-technológiai színvonalának bemutatásával [4.17].

4.1.2. Korabeli bronzöntési technológiák

A vas elterjedésével felhasználási terület, volumen és minőség szempontjából is átvértékelődött a rézötvözetek szerepe. Ennek megfelelően, a bronzkort követően főként az öntéstechnológia fejlesztésére fókuszáltak. A bronz öntéséről az olvasztótégelyek és korai öntőformák kapcsán az előző alfejezetben már volt szó. A réz újraolvasztásának, ötvözésének és öntésének munkafolyamatairól is alapvetően a régészeti leletek árulkodnak.

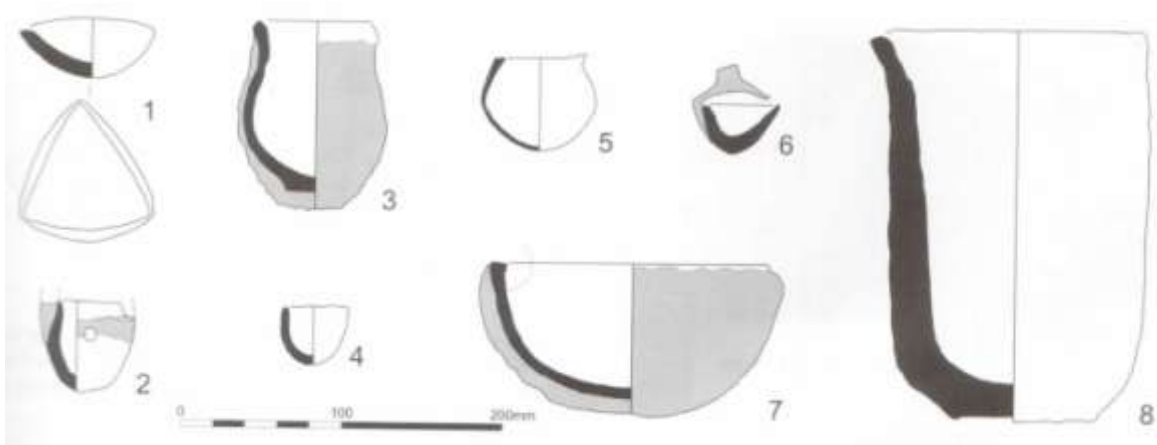
Gyakorta bemutatott ábrázolás a Kr. e. 1500 körül készített egyiptomi (Théba) sírkamra-rajz, amely a 4.11. ábrán látható. A rajzon jobb oldalról érkezik az alapanyag; marhabőr (oxhide) alakú rézlepeny, faszén és egyéb anyagok (tűzhelytégla v. ötvözőfém). A baloldalon fent négy taposó-fűjtatóval izzítják a tűzhelyet, majd alatta, vélhetően nyers, nedves pálcákkal leemelik a fölé helyezett olvasztótégelyt. Középen aztán – ugyanazon vesszős szerkezet segítségével – a fémolvadékot a sorba rakott öntőformákba öntik. Más olvasatban ezek egy nagy öntőminta beömlői és a termékek bronzajtók, amelyeket felettük az írnokok szorgalmasan adminisztrálnak [2.25].



(4.11. ábra) Bronzolvasztást és öntést ábrázoló egyiptomi sírkamrarajz (Kr.e. 1500, Théba)
[4.18]

Az öntés előkészületeként a nyersréz és az ötvözők összeolvasztásához szükséges bronzkori tűzhelyek, kemencék általában egyszerű szerkezetűek voltak. Ismeretesek agyagból készült hengeres alakú kemencék (lásd 4.7. ábra), de kövekkel körberakott, dobozszerű forma is [2.24]. A hevítéshez a tüzelőanyag szerepét betöltő faszén mellett alapvető volt a megfelelő mennyiségű fűvósél – redukáló atmoszféra itt már csak a fém reoxidációjának elkerülése miatt szükségeltetett – így a fűvókák képezik ennek a munkafázisnak a jellegzetes maradványait.

A tűzhelyeken, kemencékben elhelyezett tégelyekről, mint a technológiáról árulkodó alapvető régészeti emlékekről már az előző alfejezetben is volt szó. Az öntés előtti újraolvasztás, ötvözetkészítés tégelyei számos formában, különböző méretben kerültek elő a bronzkor után is. A 4.12. ábra néhány példát mutat be az egyes korszakokra jellemző olvasztótégely típusok szerkezetéről, formájáról a vaskortól a középkort követő időszakig. Néhány rajon szürkével a ráadásként - akár tégelyfedőként (2, 6), akár plusz külső bevonatként (3,7) - hozzátapasztott agyagrétegek vannak jelölve.

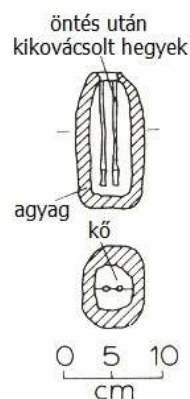


(4.12. ábra) Olvasztótégelyek keresztmetszetei – 1: vaskor; 2-3: római kor; 4-6: korai középkor; 7: késő középkor; 8: korai újkor.

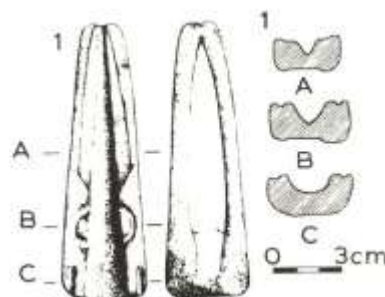
A folyékony bronz általában tölcser bemenetű, illetve cső alakú beömlőn keresztül jutott el a formaüregig. A beömlő csatorna rendszerint akkor is agyaggal bélelt volt, amikor az öntőforma kőből vagy éppen fémből készült.

A bronztárgyak öntésének korai technológiája alapvetően az öntőformák kialakítása alapján csoportosítható. A közvetlen öntés korábbi formái jellemzően egyrészes nyitott öntőminták voltak. Árulkodó nyoma lehet az ilyen öntőformának a jellemzően egyszerű, lapos tárgyknál (kések, török, balták, sarlók), hogy az egyik oldalon – amely a levegővel érintkezett - az oxidált réz aránya nagyobb, mint az öntőformával érintkezve megdermedt felületen, illetve annak közelében.

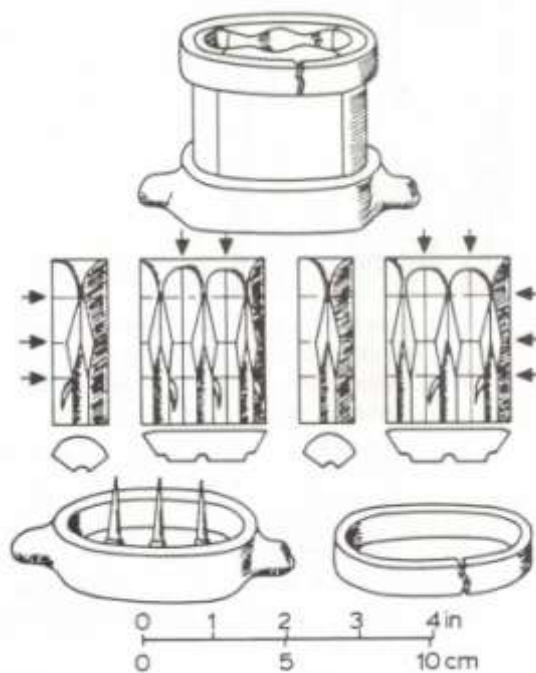
Kétrészes formába öntött tárgy mindkét felén magán viseli az öntés nyomait. Ugyanakkor nem törvényszerű, hogy például egy mindkét oldalán egyszerű vércsatornával ellátott bronz díszítő csakis kétrészes mintával öntötték, mert ezt a bemélyedést akár utólagos hevítés melletti alakítással is elérhették. Ennek biztonságos eldöntésére optikai vagy elektronmikroszkópos vizsgálat célszerű. Amennyiben ennek megfigyelésére lehetőség van, kétrészes mintába való öntésről árulkodik a szélen megmaradt öntési sorja, illetve az annak eltávolításakor keletkezett hegek. Bronzszeg öntésére alkalmas, kőből készült, agyaggal egymáshoz rögzített, kétrészes formát mutat be a 4.13. ábra. Az öntést felülről, a szegek hegye felől végezték. Kétrészes, lándzsahegy és tör öntésére készült minta egyik felei láthatók a 4.14. ábrán, ahol az öntés szintén felülről, a tárgyak hegye irányából történt, a lándzsahegy felerősítéséhez szükséges üreget pedig alulra behelyezett agyagmag segítségével alakították ki. Többrészes bronz nyílhegyek készítésére használt öntőmintát mutat be a 4.15. ábra.



(4.13. ábra) Kétrészes öntőforma, bronzszeg öntésére (Késő bronzkor, Csehország) [2.24]



(4.14. ábra) Lándzsahegy és tör öntésére használt kétrészes öntőformák egyik felei (Késő bronzkor, Írország) [2.24]



(4.15. ábra) Többrészes öntőforma, bronz nyílhegyek készítésére (Kr.e. 700-600, Irak) [2.24]

A legtöbb épen megmaradt öntőforma kőből – gyakran homokkőből - készült, mivel a kiégett agyag változatok igencsak törékenyek, illetve gyakran egyszer használatosak voltak. A régészek általában csak a belül – a fémolvadékkal érintkezett felületen - szürkére vagy feketére, kívül vörösre vagy narancsszínűre kiégett öntőforma kerámiadarabjait találják meg, amit rendszerint nem könnyű azonosítani. Az eltérő színt az öntőforma belső felületén lezajlott redukció, illetve a külső felület oxidációja eredményezi [3.4]. Általában a fel nem használt agyag öntőformák maradtak egészben, amire példa a 4.16. ábrán látható. A díszű (fibula) kétrészes öntőformáján jól látható a beömlő nyílás, illetve a két formafél peremén körbefutó, a pontos összeillesztést elősegítő rovátkolások.

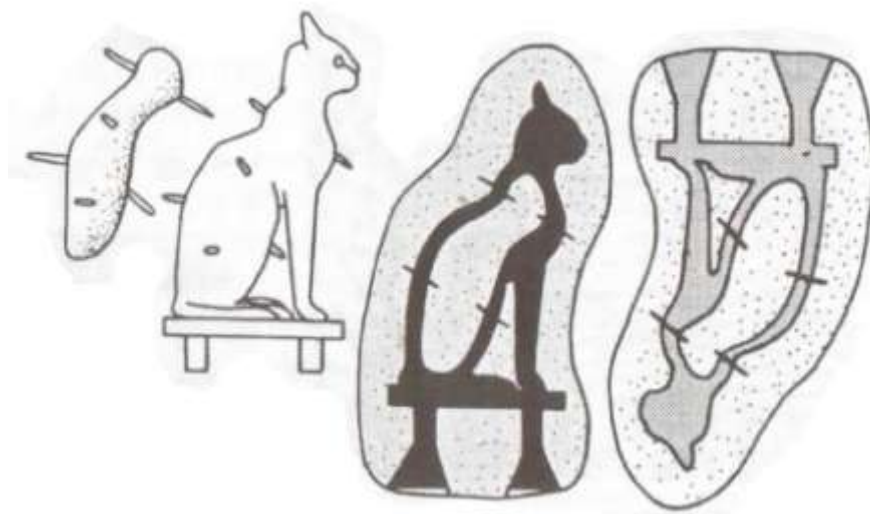


(4.16. ábra) Kétrészes, épen maradt agyag öntőminta, bronzfibula készítésére (Wales) [3.4]

Agyagot kétféleképpen alkalmaztak öntőforma készítésére.

1. Ha volt mintapéldány – amely készülhetett fából, vagy esetleg nagyon ritkán ólomból - a készítendő tárgyból, azt félig egy puha agyagágyba nyomták, majd az agyag szélén körbefutó rovátkolt jelöléseket csináltak. Ezek után a minta tetejére nyomkodták az elkészítendő agyagforma másik felét, a peremjelölések negatívjával. A két részt szétválasztották, a mintát kiemelték, majd a két felet újra összeillesztették, képlékenyebb agyaggal összetapasztották – ezek maradványait néha szintén megtalálják a lelőhelyeken – végül kiégették a kész formát.
2. Részletgazdagabb, bonyolultabb öntvények készítésére az ún. viaszveszejtési eljárást alkalmazták. Ennek egyszerűbb változata, amikor a készítendő tárgyat viaszból megformázták, amelyet körbetapasztottak körbetapasztották jól formázható, puha agyaggal. Az agyagot kiégették, miközben egy rajta hagyott nyíláson keresztül az olvadt viasz kifolyt. A fennmaradó üreget aztán folyékony fémmel töltötték ki.

A viaszveszejtési eljárásnak többféle változata is kialakult. A készítendő tárgy formája, tagoltsága, tervezett díszítésének bonyolultsága függvényében a fent említett alapeljárást kiegészíthették. A 4.17. ábrán látható egyiptomi példán agyagmag köré formálták a szobrot viaszból, benne tüskékkel rögzítve az agyagmagot, amelynek helyzete így majd a viasz kiolvadása után is megmaradt. A viaszszobrot agyaggal tapasztották körbe és kiégetés után olyan öntőformát kaptak, amellyel jelentős mennyiségű fémet is megtakaríthattak.



(4.17. ábra) Viaszveszejtési öntés lépései agyagmag alkalmazásával (Kr.e. 1500, Egyiptom)
[2.25]

A 4.1. animáció szintén egy kibővített viaszveszejtési bronzöntési eljárást mutat be. Kora középkori övcsat készítése követhető nyomon:

1: A mestermintát fából kifaragták (esetleg puhább kőből, vagy lágú fémből kialakították).

2: Ezt felhasználták egy kétrészes közbenső öntőforma elkészítéséhez.

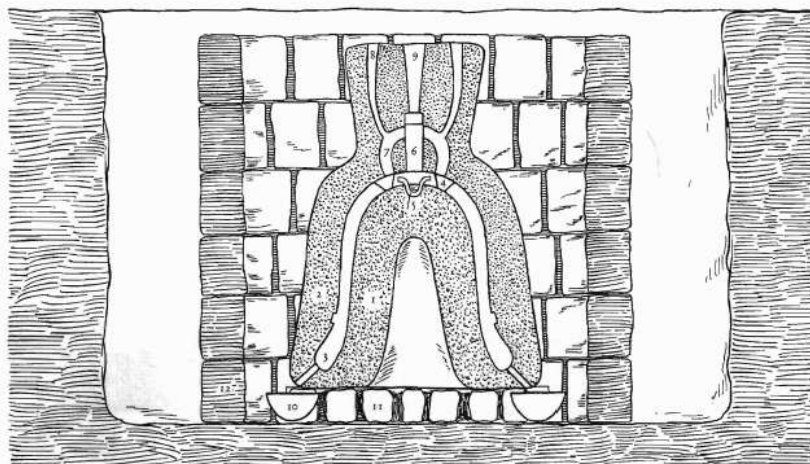
- 3: Az öntőformát viasszal töltötték fel (ez által viaszminták sorozatát készíthették el).
4. A viaszmintát annak megdermedése után kivették az öntőformából.
- 5: A viaszmintát szabadon tovább dekorálhatták cizelláltabb díszítésekkel
- 6: A viaszmintát körbetapasztották lágy agyaggal.
- 7: Az agyag öntőformát megfordítva kiégették, miközben a viasz kifolyt.
- 8: A keletkezett kerámia öntőformát újra megfordítva bronzolvadékkal öntötték tele.
- 9: Az öntőformát összetörve visszamaradt a kész öntvény.

Az eljárás előnye, hogy sorozatgyártásra könnyebben alkalmazható volt, mivel a viaszmintákat nem kellett mindig újra kifaragni, illetve azokat aprólékosabban díszíthették.

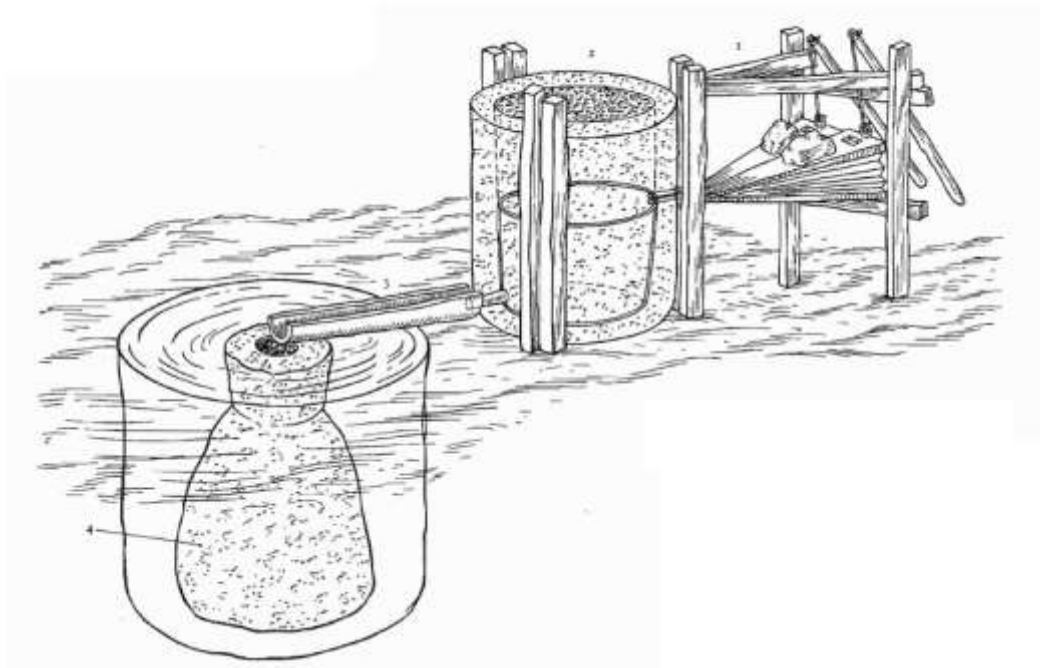
(4.1. animáció) Övcsat készítése kibővített viaszveszejtési eljárással (Meroving kor)

Amint korábban szó volt róla, fémből (bronzból) készült öntőformákat is találtak (4.6. ábra). Ezeket valószínűleg viaszveszejtési eljárásnál használták, a viaszminta elkészítéséhez.

Nagyobb bronztárgyak, mint például harangok, középkori és kora újkori öntésére külön szakma alakult ki, speciális eljárásokkal. Az általában 4:1 arányban réz és ónt tartalmazó harangok öntésére a középkorban két módszer alakult ki. A korábbi, a 9-12. században szerte Európában alkalmazott módszer, szintén egyfajta viaszveszejtési eljárás volt. A 4.18. ábra mutatja be - az előző alfejezetben említett Theophilus Presbyter munkája alapján - a viaszveszejtési módszerrel történt harangöntés öntőformáját, a 4.19. ábra pedig a harangöntés technikai részleteit [4.19, 4.20]



(4.18. ábra) Viaszveszejtési eljárással történő harangöntés öntőformája. (1) mag; (2) köpeny; (3) az öntendő harang viasz formája; (4) csengőlyuk; (5) az ütő felfüggesztésére szolgáló vaskampó; (6) fül; (7) függesztőkarika; (8) szellőzőnyílás; (9) öntőnyílás; (10) a kiömlő viasz felfogására szolgáló edény; (11) alapozás; (12) a formázókemence oldalfala [4.19, 4.20]



(4.19. ábra) A harangöntés technikai felszerelésének elhelyezkedése Theophilos Presbyter leírása alapján. (1) fújtató; (2) olvasztókemence; (3) öntőcsatorna; (4) öntőforma [4.19, 4.20]

A későbbiekben a méret növelésének, a bonyolultabb formák és szebb hangzás elérésének igénye miatt a 12-13. századtól kialakult az ún. álharangos öntési mód. Ez abból állt, hogy a harang belsejét kialakító, a kemence gödrében kialakított agyagmag felületét zsírral, vagy faggyúval kenték be, erre tapasztották rá a szintén agyagból kialakított álharangot. Az álharang külső felületén faggyúból, vagy viaszból mintákat, feliratokat tudtak kialakítani, amely negatív lenyomatot hagyott a tetejére rétegesen tapasztott agyagköpeny belső felületén. A faggyú, illetve viaszrétegek a kiégetés során könnyen kiolvadtak, így a mag, az álharang és a köpeny könnyen elválasztható volt egymástól. A köpenyt vaspántokkal erősítették meg, hogy a forma kiégetése után le lehessen emelni, majd az álharang eltávolítása után ismét vissza lehessen helyezni a magra [4.19].

4.1.3. Kutatási-vizsgálati lehetőségek, módszerek a réz és ötvözetek archeometallurgiájában

A rézhez és ötvözetekhez köthető régészeti ásatási anyagokon elvégzett anyagvizsgálatok alapvetően két fő csoportra oszthatók:

1. Elkészített réz és bronz tárgyak, eszközök, illetve azok töredékeinek, gyártásukkor keletkezett fém melléktermékek, hulladékok metallográfiai anyagvizsgálata.
2. A réz és ötvözetek előállításának, öntésének, alakításának technikájához köthető tárgyak, illetve a technológiák alapanyagainak, nyersanyagainak, segédanyagainak és

melléktermékeinek (salakok, nemfémes tapadványok) maradványain elvégzett különböző jellegű anyagvizsgálatok.

Ezek a vizsgálatok tulajdonképpen archeometallurgiai célú, archeometriai vizsgálatok. Az első csoportba tartozó vizsgálatok nemzetközileg is relatíve nagy számát természetesen az indokolja, hogy a réz és a bronz a korrózió, az idők viszontagságainak igen jól ellenálló anyag, ugyanakkor az összetétel igen széles skálájával találkozhat a kutató időben és térben egyaránt.

A fémtárgyak vizsgálatokor egyik fontos szempont az ötvözet kémiai összetételének meghatározása. Erre leggyakrabban használatos eljárás a röntgenfluoreszcens spektrometria (XRF), illetve az energiadiszperzív röntgenspektrometria. (EDX). A bronzleletek igen gyakran túl nagy értéket képviselnek ahhoz, hogy roncsolásos vizsgálat alá vessék azokat, az előbb említett módszerekkel leginkább a felületeken végeznek el méréseket, amely nem minden esetben szolgáltat kielégítő információt a tárgy teljes anyagának kémiai összetételéről.

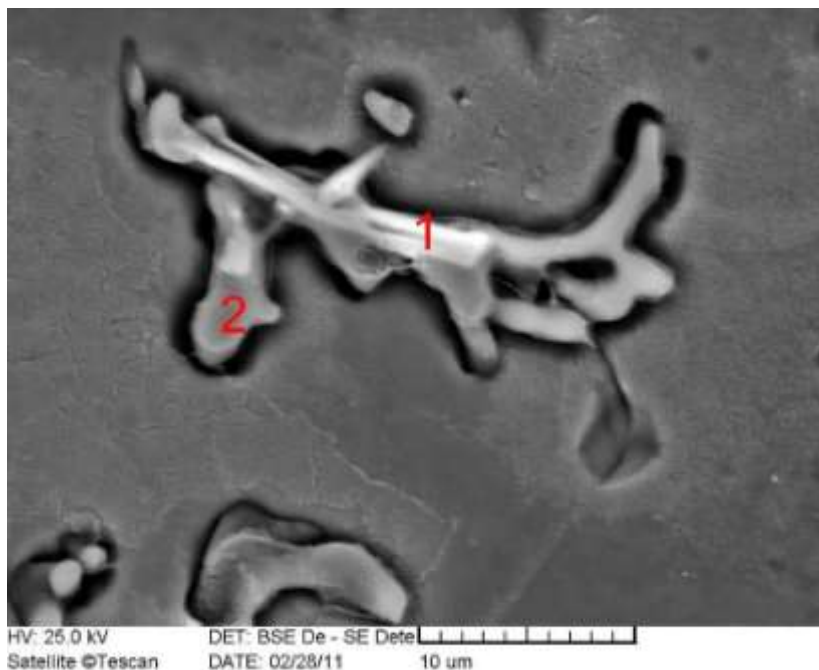
A bronztárgyak felületeinek vizsgálata ugyanakkor számos speciális aspektusból lehet konkrét célja a kutatásnak. A bronztárgyak felületén vizsgálható a természetes korrózió, tapadványok, kiválások, esetleges bevonatok, festések, díszítések rétegeinek maradványai. Ugyanakkor az egyes ötvözők – kiváltképp az ón – felszíni dúsulása is a vizsgálat tárgya lehet.

Jó példa erre a Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportjának (ARGUM) 2011-12-es vizsgálati projektje, amelyben bronzkori nyakkorongos csákány (4.20. ábra) felületi rétegeit vizsgálta.



(4.20. ábra) Bronzkori nyakkorongos csákány (Kr.e. 1800-1600, Szendrőlád) [4.21]

A csákány felületén a korrózió hatására bekövetkező táblás leválások voltak megfigyelhetők, amelynek jellege azt sugallta, hogy a lelet felületi rétege eltér a lelet belsejétől. A csákányból a 4.20. ábrán pirossal jelölt metszéssel vett, polírozott, maratott vizsgálati minta optikai és elektronmikroszkópos vizsgálata jelentősen eltérő óntartalmat jelzett a tárgy felületén (28%) és a tárgy belseje felé eső részen (5.7%). A vizsgálatok viszont kimutatták, hogy nem felületi ónozásról van szó, hanem az óndúsulás vélhetően a darabot teljes mértékben át nem alakító kovácsolás hatására következett be. A kemény, nagy óntartalmú intermetallikus vegyületek - amelyek kristályosodás során a mikrodúsulás következtében alakulnak ki - nem szenvedtek el akkora alakváltozást, mint a réz szilárd oldatának mátrixa, így a felület közelében megnövekedett a mennyiségük. A kovácsolás vagy azt követő hőkezelés során ezek a vegyületfázisok részlegesen visszaoldódva megnövelték a felület közeli réteg ónkonzentrációját. Gyors hűtés hatására ez által kialakult a csákányon vizsgált felületi kemény réteg. Az eredményeket megerősítő és a tisztázatlan kérdéseket eldöntendő, 30 percig 600 °C-on hőkezelt, majd gyorsan lehűtött, rekonstruált darabokból vágott metszetek is mikroszkóp alá kerültek. A 4.21. ábrán látható zárvány elektronmikroszkópos képe – amelyben az 1 pont a zárvány gerincében zömében ónszulfidot, a 2 pedig főként ónt és antimont jelöl kénnel – elárulta, hogy a csákány alapfémé szulfidos ércből származik [4.21].



(4.21. ábra) Zárvány SEM-képe a szendrőládi csákányból [4.20]

A bronztárgyak metallográfiai vizsgálata esetén a legtöbb információt az optikai, illetve még inkább az elektronmikroszkópos vizsgálat szolgáltat. Ezekhez rendszerint elkerülhetetlen a vizsgálandó tárgy bizonyos mértékű roncsolása. Az archeometallurgia interdiszciplináris szakmai berkein belül tipikus vitahelyzet, amikor a régész és a metallográfus anyagvizsgáló konszenzusra akar jutni a bronztárgyak (illetve főként a nemesfém-leletek) belső anyagának mikroszerkezetére irányuló mikroszkópos vizsgálathoz ki-(le)vágandó metszeteket illetően. A kérdésben gyakorta a restaurátor lehetőségei szolgáltatják a megoldást.

Az optikai mikroszkóp elsősorban a bronz általános szövetszerkezeti jellemzői, illetve az egyes szövetelemek kvantitatív, nagyságrendi arányainak megállapítására használatos.

Az elektronmikroszkópos vizsgálatok célja:

- jellemző szövetszerkezet megállapítása,
- egyes ötvözők azonosítása (EDX), eloszlási, dúsulási jellegének megállapítása,
- öntésre, alakításra, hőkezelésre utaló nyomok, jellemzők megállapítása,
- kristályosodási jellemzők meghatározása szemcseméret vizsgálattal,
- zárványok jellegének, összetételének leírása,

Az elektronmikroszkóphoz kapcsolt mikroszonda által a nagyítások lokális, illetve területi elemekkel egészíthetők ki. A rézötvözet-leletek mikroszkópos vizsgálata mellett – az ötvözetek sokfélesége miatt – lényeges kiegészítés a keménységmérés, amelyet lehetőség szerint a tárgy anyagának belső zónáiban, illetve a felületen és a felület közeli rétegeken is el kell végezni.

A maradványfémek, sorják, túlcordult és lepattant bronzdarabok, olvasztótégelyek, kemencék alján maradt, annak alakja szerint megdermedt öntecsdarabok, elrontott öntvények formája, összetétele és szövetszerkezete - a kész tárgyaknál alkalmazotthoz hasonló módszerrel, de rendszerint jóval szabadabb mintavételi lehetőségekkel - szintén vizsgálandó és a korabeli technológiáról szolgáltatandó indirekt információt.

A második csoportba tartozó leletek vizsgálati aspektusa igen különböző lehet. Az eredetileg agyagból készült, kiégett maradványok (kemencefalazat, fűvóka, tégely, öntőforma) esetében vizsgálandó a darabot ért hő hatása, tehát a kiégettség mértéke, jellege, amely technológiai jellemzőkre utalhat. Ebben a kémiai és ásványi összetétel elemzése, porozitás-vizsgálat, szilárdságvizsgálat, derivatográfus termóanalitikai vizsgálat, hőtágulási együttható meghatározása nyújthat segítséget. Az összetétel-mérések – különösen, ha mód van a kiégett felülettől távolodva több rétegben is kivitelezni – utalhatnak az agyagfelület (kerámia) és a képződött salak közötti diffúziós folyamatokra is.

Az olvasztótégely- és öntőforma-darabok formai és anyagvastagsági jellemzői technológiai sajátosságokra utalhatnak. A bennük talált tapadványok, fém- és salakmaradványok vizsgálatai (főként, ha kisebb a kisebb összetevők, nyomelemek szisztematikus, statisztikai mértékű vizsgálatára is mód van) akár egyes gyártási helyek, illetve a felhasznált alapanyagokra utalva, más-más helyen alkalmazott technikák, technológiák rokonítására, megkülönböztetésére is információt szolgáltathatnak.

A salakok vizsgálata szintén többértékű információt szolgáltat. Kémiai és ásványi összetételük alapján az egyes salakfajták, így a lokálisan alkalmazott munkafolyamat - kohósítás, újraolvasztás, alakítás, öntés - technológia megkülönböztethető egymástól (az egyes jellemző salakalkotókról a korábbi alfejezetekben már szó volt). A salakösszetételből következtethető a nyersanyag jellege (szulfidos, oxidos, karbonátos), minősége, így esetleg annak származási helye is. Néha, főleg szórványlelet esetén nem könnyű egyértelműen definiálni, hogy réz- vagy vaskohászati salakleletről van-e szó.

Az érckohósítás és rézolvasztás salakjainak vizsgálata által a technológia hőmérsékleti és időbeni paraméterei, a lezajlott redukciós és oxidációs folyamatok termodinamikai jellemzői is körülírhatók. A salakok ásványi összetétel vizsgálata (XRPD) alapvető lehet a salakminta egyes munkafolyamathoz való társítása szempontjából. Megfelelő minőségű minta készítése esetén a salakleletek elektronmikroszkópos vizsgálata, illetve azzal egybekötve energiadiszperzív röntgenspektrometriás vizsgálata (SEM-EDX) is gyakori.

4.2. Bevezetés az ón, ólom, ezüst és arany archeometallurgiájába

4.2.1. Ón

Az ón szerepéről az előző, bronzötvözeteket tárgyaló fejezetben már esett szó. Az önmagában puha, alacsony olvadáspontú (232 °C) fehér fém jelentősége és értéke a középső és késői bronzkorban rohamosan felértékelődött, annál is inkább, mert érceinek elérhetősége földrajzilag igencsak korlátozott volt. Az ón legfontosabb ásványérce az általában sötét színű (feketés-lilás) kassziterit, amely a fémot redukálható, oxidos formában (SnO_2) tartalmazza. Az ón-szulfidos sztannit ősi ónkohászati jelentősége koránt sem akkora. Amint arról korábban szó volt, a korai rézötvözetek relatíve alacsony (1-2%-os) óntartalma aligha származott szándékos ötvözésből. Bár az első, számottevő mértékű ónt tartalmazó bronzötvözetek Kr.e. 3000 után bukkantak fel sumer lelőhelyeken - jellemzően arzénrezes környezetben - magasabb, 8-10%-os óntartalmú bronzok rendszeres előállítására csak Kr.e. 2500 után volt lehetséges a kis-ázsiai, illetve mezopotámiai civilizációk számára, amikor már kontinensnyi távolságokból is be tudták szerezni az ónércet, azaz megnyíltak a hosszabb kereskedelmi utak mind kelet, mind nyugat felé [4.22].

Ónbronzt alapvetően háromféleképpen lehetett előállítani:

1. Rézércet és ónércet együtt kohósítottak és az eredmény „nyersbronz” lett.
2. Rezet és kassziteritet együtt, faszénréteg alatt összeolvastottak, miközben a kassziterit óntartalma redukálódik és a rézben oldódik.
3. Meghatározott mennyiségű olvasztott fémest ónt adagoltak ismert tömegű rézolvadékba.

Az egyes módszerek elterjedése, gyakorisága időben nagyjából a fenti sorrendet követte. A korai bronzkorszakban – többek között óasszír szövegek alapján - az ónt és a kassziteritet nem is különböztették meg egymástól. Az ónt csak később állíthatták elő rendszeresen fémest alakban, de azután – az ónkereskedelem fellendülésével – a mind több bronztárgy ötvözetét készült külön-külön kohósított fémest egybeolvasztásával.

Az ónérc kitermelésének első – Kr.e. 2500 körüli - európai nyomaira a Németország szász vidéke és Csehország határvidékén lévő érchegységben (Erzgebirge, Krušné hory) bukkantak. A legismertebb és leggazdagabb ónérc lelőhely Európában viszont Britannia déli részén Devon és Cornwall vidéke volt. A kitermelés már Kr.e. 2000 környékén megkezdődött, illetve több régészeti bizonyítékot találtak itt arra, ónsalak, illetve réz öntecsbe záródott kassziterit-szemcsék formájában, hogy a középső bronzkorban (Kr.e. 1600 körül) már fémest ónt is ki tudtak olvasztani az ónércből [2.24]. A dél-nyugat britanniai ónérc-

lelőhelyek hosszan tartó kiemelt ipari és kereskedelmi szerepét jelzi, hogy a későbbi britanniai római hódítások egyik mozgató rugójának is tartják a helyi ércforrások megszerzését, illetve a középkor folyamán is megmaradt jelentős ónforrás vidékként [4.23]. Európa további bronzkori ónforrása az Ibériai-félsziget észak-nyugati vidéke volt, ahonnan az ónkereskedelem a római időkben jelentősen fellendült, majd a középkorban a jelentősége már szinte elenyésző volt.

Az ónérc elérhető volt sziklás telérekből, illetve – könnyebben hozzáférhető módon – a sziklákából erodált, a meddőtől jobban elkülönült üledékes változatban a folyómedrekből. Minden bizonnyal az utóbbi fajtát használták először ónolvasztáshoz, gyakorlatilag csak az érc mosására volt szükség a kohósítás előtt. A középkorban használatos, érctelérekből származó, rendszerint jelentős meddőt tartalmazó ónércet előzetesen aprítani és mosni is kellett [4.24].

Az ókori és korai középkori ónkohászattal kapcsolatosan csak nagyon kevés régészeti lelet került elő, azok is leginkább többé-kevésbé plán-konvex alakú öntecsek. A technológia konkrét jellemzőiről legkorábban a 13. századtól lehet beszélni, akkor is valószínűleg egyfajta kismértékű technológiai váltás kapcsán. Annyi bizonyos, hogy a középkor azon szakaszában a kohóból olvadt állapotban folyt ki a fémes ón és a főként vas-szilikátból álló salak, sűrűségkülönbségük miatt könnyen elválaszthatók voltak egymástól. Az ón öntecseket aztán kis, csésze alakú olvasztókemencében olvasztották újra. A középkor után egyre inkább mészke helyettesítette a vas-oxidot a kohósításnál, nagyobb hőmérsékleten működő és kalcium-szilikátos salakot produkáló nagyolvasztókat használtak [4.25]. A 13. századtól főként a Brit-szigeteken használt, vízkerekes meghajtású ónérc-törőket aránylag egyértelműen azonosítani lehetett.

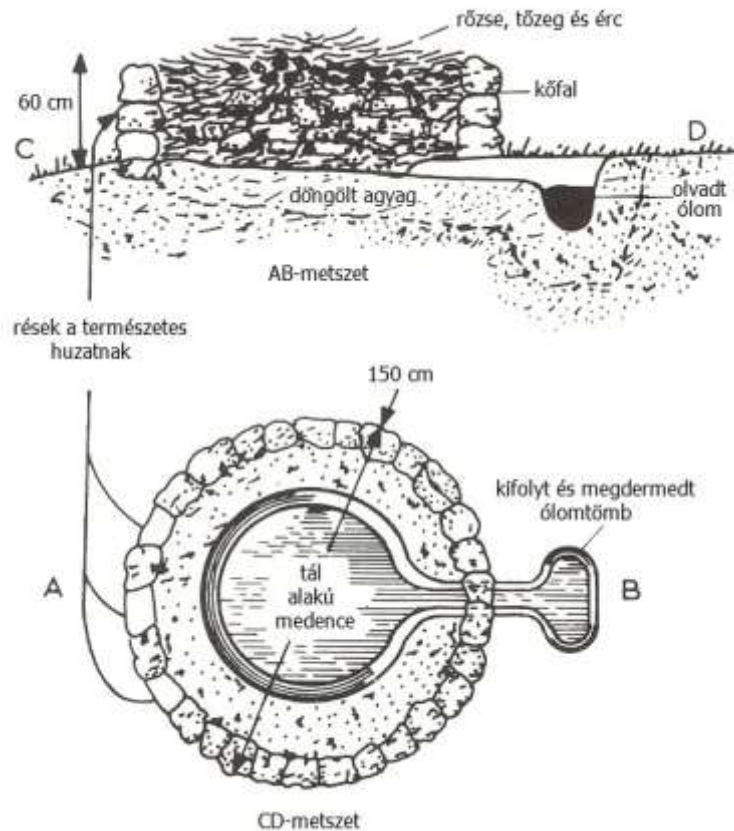
Az ónt a rézalapú bronzötvözetek mellett ólommal is ötvözték, amely kupák, edények alapanyagául, illetve később forrasztóanyagként is szolgált. Fontos volt díszítő szerepe, mivel az ón-ólom ötvözetek az ezüsthöz hasonló színűek voltak, illetve jó kontrasztot biztosítottak bronzsal és az aranyhoz hasonló színű sárgarézsal. Az ónt önmagában lágysága miatt nemigen használták, de például vastárgyakat bevontak vele. Alacsony olvadáspontja miatt egyszerű tűzhelyeken, gyakran házaknál, kis adagokban olvasztották meg a felhasználás előtt.

4.2.2. Ólom, ezüst és arany

Nem véletlen, hogy egy alfejezet tárgyalja ennek a három fémnek az archeometallurgiai alapvetéseit, mivel az ólom és az ezüst gyakran egy ércben jelentkezik - technológiailag összeköti őket egy sajátos eljárás, a kupellálás -, az ezüst és az arany korabeli finomítása, kezelése pedig nagyon hasonló.

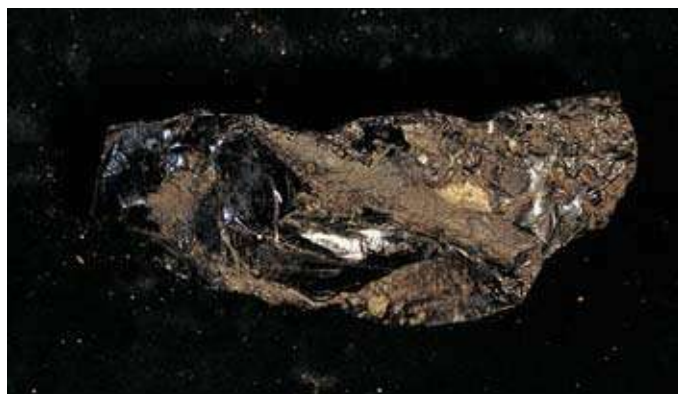
Az alacsony olvadáspontú (327 °C), és relatíve alacsony, 800 °C alatti hőmérsékleten érceiből már teljesen fémre redukálható ólomot tiszta állapotban legfeljebb csak súlynak alkalmazták, nagy sűrűsége miatt. Egyébként puhasága, deformálásra való hajlama miatt leginkább ötvözőanyagként használták fel a rézötvözetekben. Az ólom a késő bronzkorban legjellemzőbben kisebb ékszerek – gyakran valószínűleg kultikus szereppel – illetve a réz mellett 40-50 %-os összetételi arányban, ún. tokos balták alapanyagaként bukkan fel, amelyek használati eszközök is lehettek [4.26].

A korai ólomelőállítás technológiájának kevés régészeti nyoma maradt, általában az ólomtartalmú ércek lelőhelyeinek közelében. Az ólom előállítására jellemzően galenitet használtak, amely az ólmot szulfid alakban tartalmazta, de felhasználásának gazdasági indoka gyakran nem is ez volt, hanem, hogy a galenit rendszeresen tartalmazott kinyerhető mértékben ezüstöt is. Az ókori görögöknél az ólom leginkább még az ezüst előállítás „mellékterméke” volt, felhasználása a Római Birodalomban kapott nagyobb hangsúlyt. A római korban 1-2 méter átmérőjű, döngölt agyag alapra épített alacsony kemencékben állították elő az ólmot. Hasonló jellegű, korai, természetes huzatú ólomolvasztó kemence szerkezetére mutat jellemző példát a 4.22. ábra.



(4.22. ábra) Természetes huzattal működő ólomolvasztó kemence (Yorkshire – Britannia) [4.27]

Az ércet megfelelő méretre való törés után kohósították, előzetes pörkölésére viszont nem volt szükség, ezt rekonstrukciós kísérletek is bizonyították. Az adag tetején, illetve felső zónájában termodinamikailag is megfelelő, oxidáló atmoszféra alakult ki a szulfidok oxidokká alakulásához. Az érc meddőjéből és relatíve jelentős mennyiségű - akár 30%-nál is több - ólom-oxidból (PbO) képződött salak elfolyt. A salak összetétele térségenként változhatott, ólom-oxid mellett rendszerint kalcium-szilikát (30-60% SiO₂, 5-20% CaO), változó mennyiségben vas-oxid, illetve esetenként akár nagy arányban más oxidok (Al₂O₃, BaO) alkották [2.24]. Az olvasztás után megdermedt salakdarabok szétszóródtak vagy gyakran újra beolvasztásra kerültek más eljárásokban. A kevés mennyiségben megmaradt, üvegszerű, nagy fajlsúlyú, feketés-szürkés-zöldes színű ólomsalak jellemző példája látható a 4.23. ábrán. A mintegy 10 cm legnagyobb keresztmetszetű darab felszínén jól láthatók a folyás megdermedt nyomai.



(4.23. ábra) Ólomérc olvasztás salakja – római kor [3.4]

A kohósítás végére a folyékony ólom a kemence melletti téglyszerű gyűjtőbe folyt és ott megdermedt. Az eljárás egyszerű volt, a technika mondhatni primitív, ráadásul az ólomot tekintve nem is túlságosan hatékony, a salakkal távozott ólom rontotta az ólomkihozataalt. Ugyanakkor az eljárás „gazdaságilag” előnyös volt, mert az érc ezüsttartalma viszont a keletkezett ólomtömbökbe került. Tipikus római kori, feliratozott ólomtömbök láthatóak a 4.24. ábrán, a korabeli ólomkohászat két jellemző vidékéről, a Brit-szigetéről illetve az Ibériai-félszigetről.



(4.24. ábra) Római kori kohósításból nyert ólomtömbök (a, b – Britannia; c – Hispania) [2.24]

Az ólomolvasztás eljárásának alapvető jellege a középkor és a korai újkor folyamán sem változott jelentősen. A korai tüzhelyek, kemencék természetes huzatát idővel fűjtatók pótolták, amelyeket később vízikerek segítségével működtettek. A 13. század végén Angliában a primer kemencében keletkezett salakot újraolvasztották lábbal hajtott fűjtatóval ellátott kemencében [4.28]. A 16. századtól aztán szárított fával, helyenként tőzeggel fűtött ércolvasztó kemencék terjedtek el, amelyekbe fűjtatóval a korábitól intenzívebb fűvőszelet biztosítottak, így nagyobb hatásfokkal dolgoztak. Ez a fajta kemence fel tudta dolgozni azt az ércet, amit a természetes huzatú tüzhely nem, illetve az onnan származó salakot is. A később vízikerek-meghajtású fűjtatással működő ércolvasztó kemencék egészen a 19. századig működtek [4.25].

A korabeli ólomkohászat régészeti maradványai – általában a tűzhely döngölt agyagrétegeinek darabjai, illetve salakdarabok – mellett kemencék lelőhelyére jellemzően árukkodó lehet az ólomkoncentráció miatt ritkább növényzet, illetve az ólomtűrő növényfajták nagyobb aránya. A primer ólomtömböt általában a formába öntés előtt házi tégelykemencékben olvasztották újra, amelyek maradványai – öntecsdarabok, maradványfém, elrontott öntvény, öntőforma- és beöntő tölcserdarabok – gyakrabban kerülnek elő. Az öntőformák általában mészkőből, fából vagy agancsból készültek [3.4].

Ahogy többször is említésre került az ólom kohászatának kezdetektől fogva fontos – illetve gyakran az ólom előállításától jóval fontosabb – velejárója volt az ezüst elválasztása az ólomtól. A kupellálás alapvető lényege, hogy fémötvözeteket (esetleg érceket) magas hőmérsékletű eljárás alá vetnek, melynek során az alapfémek oxidálódnak (általában az ólom, de ugyanígy viselkedhet a réz, cink, arzén, antimon is), a nemesfémek (általában az ezüst, de az arany is) pedig nem oxidálódnak, így elválaszthatók a salakszerű állapotba kerülő, oxidált meddőtől.

Az ezüstnek ólomtól kupellálással való elválasztása már Kr.e. 2000-ben is ismert és alkalmazott eljárás volt. A termésezüst ugyanis korántsem volt olyan gyakori, amennyire gazdasági értéke, szerepe azt megkívánta, az ezüst évezredek át fontos fizetőeszköz volt. A spanyolországi Rio Tinto Kr.e. 8-7. századi lelőhelyein hatalmas mennyiségben (15-20 millió tonna) talált salakban 0.06% ezüst-tartalmú ólomcseppeket találtak. A vizsgálatok nagy kiterjedésű területen házilag folytatott kupellálást feltételeztek [2.24, 2.25]. A római korban alapvetően gazdasági céllal nyerték ki az ezüstöt az ólomból, amely tonnánként általában 100 gramm körüli mennyiségben tartalmazott ezüstöt [2.24]. A vagyont, a váltságdíjat, a hadisarcot a korai középkorban is jellemzően ezüstben mérték.

A kupellálás folyamán ólom ólomglétté oxidált (PbO). Az el nem gőzölgött ólomgléttel egyszerűen lefölozték, vagy abszorbeált a tűzhely porózus aljába, amely agyagból volt kialakítva és nagy kalcium- és/vagy magnézium-tartalmú anyaggal, égetett csonttal, csont- vagy fahamuval, kagylótöredékekkel, mészkővel volt kibélelve. Kr.e. 1. évezredtől a csonthamu használata terjedt el leginkább, amely alapvetően stabil kalcium-foszfát. Ha rézötvözetből történt a kupellálás, az eljárás kezdeti megkívánt hőmérséklete az ezüsttartalomtól függött a Cu-Ag kétalkotós rendszer alapján. Akár megfelelő mennyiségű ólom rézötvözethez való beadagolása, akár eleve ezüsttartalmú ólom kupellálása esetén az ólomban oldott ezüst a Pb-Ag kétalkotós rendszer alapján 650 °C körüli olvadáspontú olvadékot alkot. Az ekkor még relatíve alacsony hőmérséklet minimális gőzölgési veszteség mellett oxidációt jelent az ólom - illetve a még rendszerben lévő réz, esetleg a többi kis mennyiségű nem nemesfém (ón, antimon) – számára. Ezek után már csak tartósan az ezüst olvadáspontja (962 °C) feletti hőmérsékletet kellett biztosítani, hogy tiszta ezüstolvadék keletkezzen. Az ólomglét nem reagált a kalciumtartalmú összetevőkkel, viszont az agyagból származó szilícium-dioxiddal igen, viszkózus, üvegszerű ólom-szilikátot alkotva, amely felszívódott a már említett, bázikus anyagokkal bélelt bélésbe. Így lelőhelyenként ugyan különböző összetételi arányú, de alapvetően ólom-, réz-, szilícium-, foszfor- és kalcium-oxidból álló ólomglét lepény alakult ki, amely esetleg némi ón-oxidot, illetve minimális ezüstveszteséget tartalmazott [4.29].

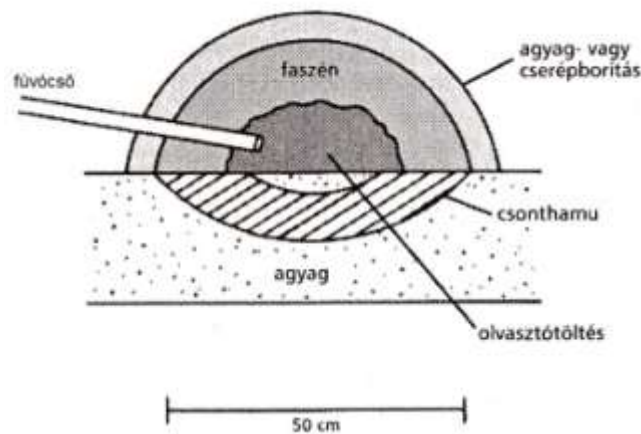
A sekély, csészealj vagy tál alakú tűzhelyet fával vagy faszénnel fűtötték és a peremén két nagyobb teljesítményű, az olvadt ólom relatíve nagy felszínére irányított fűjtató biztosította a megfelelő égéshőmérsékletre szükséges levegőt, illetve az oxidációhoz szükséges oxigént. A kupellálás régészeti öröksége rendszerint a 10-15 cm átmérőjű

ólomglét-lepény, illetve a tűzhely aljának maradványai. A 4.25. ábrán egy ólomglét lepény 78 mm-es darabja látható, ahol a nyíl a felszínen megtapadt ezüstmaradványt mutat.



(4.25. ábra) Római kori ólomglét lepény maradványa (Southwark, Britannia) [4.29]

Kupellálás történhetett alacsony ezüsttartalmú réztárgyak, érmék ezüsttartalmának kivonása céljából. A római kori Britanniában erre a célra használt kupelláló kemence rekonstrukciós rajza látható a 4.26. ábrán. Ugyanakkor a késő középkor, illetve kora újkorig is jellemző volt a házilag végzett kupellálás. A házilag végzett kupellálás jellemző régészeti öröksége, egy kisméretű kupellációs tégely csonthamuból készült alja, illetve a hozzátapadt ezüströg látható a 4.27. ábrán. A kisebb tégelyekben, agyagcserépben elvégzett kupellálás célja gyakran az ezüst tisztaságának tesztelése, ellenőrzése is volt, rendszerint fizetőeszközként használt nemesfém-darabokon.



(4.26. ábra) Római kori kupelláló kemence rekonstrukciója (Silchester, Britannia) [2.25]



(4.27. ábra) Kupellációs tégely csonthamuból készült alja (London) [2.26]

Amíg az ezüst legfőbb forrása az ezüsttartalmú ércekből, ólomból, rézötvözetekből kupellálással kiválasztott nemesfém, addig az arany – bár elvileg szintén lehetett kupellációs termék – alapvetően terméсарany-eredetű volt. Az arany kultikus, díszítő, gazdagságot és státuszt kifejező szerepéről ehelyütt nem célszerű hosszasan értekezni, technikátörténete is egyszerűbb a többi fémnél (az alkímia természetesen most nem idesorolandó). Nincs elvitathatatlan álláspont arról, hogy az arany ismerete megelőzte-e a rézét, s bár sok régész alapvetően ezt vallja, egyiptomi leletek ennek az ellenkezőjét sugallják. Az Arábiában, Perzsiában, Kis-Ázsiában, Kaukázusban és a Balkánon szétszórtan található, kis volumenű aranylelőhelyek mellett az ősi időkben egyértelműen Egyiptomé (a Núbiai-sivatag több mint száz aranybányájával) volt az arany monopóliuma [4.30].

A terméсарany többféle környezetben és koncentrációban fordulhatott elő akár aranytartalmú kvarc telérekben, akár hordalékos, üledékes jelleggel, vízmosásokban. Az egyedüli feladat gyakorlatilag fém kinyerése volt az összetört kőzetből, kitermelt hordalékból. A különböző kitermelési, zúzási, mosási technikákról már igen korai írások is szólnak, Egyiptomban már Kr.e. 1300-ban papirusztérképen hieroglifák által azonosított területek jelölték az aranylelőhelyeket, a mosás helyszíneit és a szállítási útvonalakat [4.30].

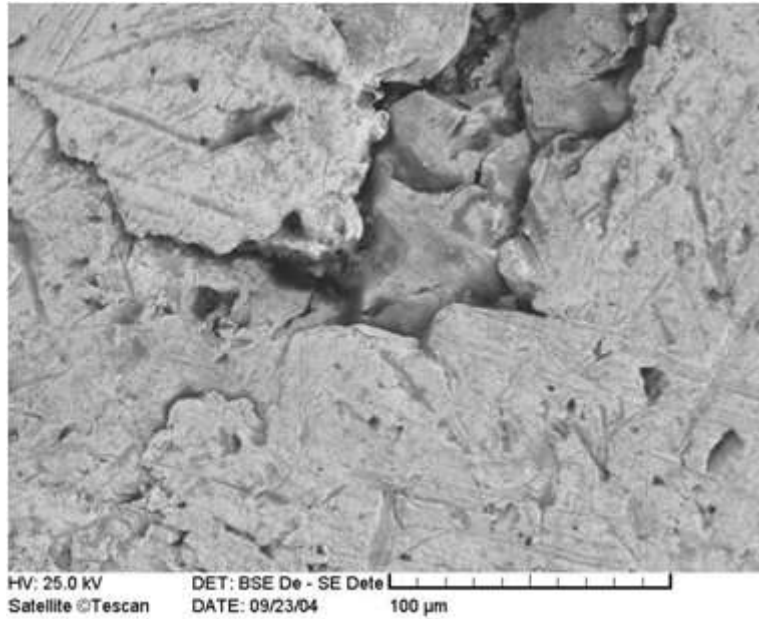
A korai aranytárgyak általában relatíve sok szennyezőt (ezüst, réz, vas) tartalmaztak. Igen korán rájöttek, hogy a kupellálással az arany is kinyerhető, a probléma viszont az volt, hogy ötvöződött az ezüsttel. Az arany és az ezüst szétválasztására többféle módszert is kidolgoztak:

1. Só adagolásával az ezüst ezüst-klorid alakjában leválasztható. Agatharkidész (Kr.e. 2. sz.) szerint a tisztítandó, aranyat tartalmazó ötvözetet lezárt agyagtégelyben ólommal, sóval, ónnal és árpahéjjal 5 napon át hevítették, majd amikor lehűlve azt kibontották, csak a tiszta arany maradt meg fémnek [4.30].
2. Az arany-ezüst ötvözetet kéntartalmú reagenssel (pl. antimonit – Sb_2S_3) és faszénnel együtt hevítették. Az arany könnyen elválasztható a keletkező ezüst-szulfidtól, ami aztán kupellálással szintén visszanyerhető.

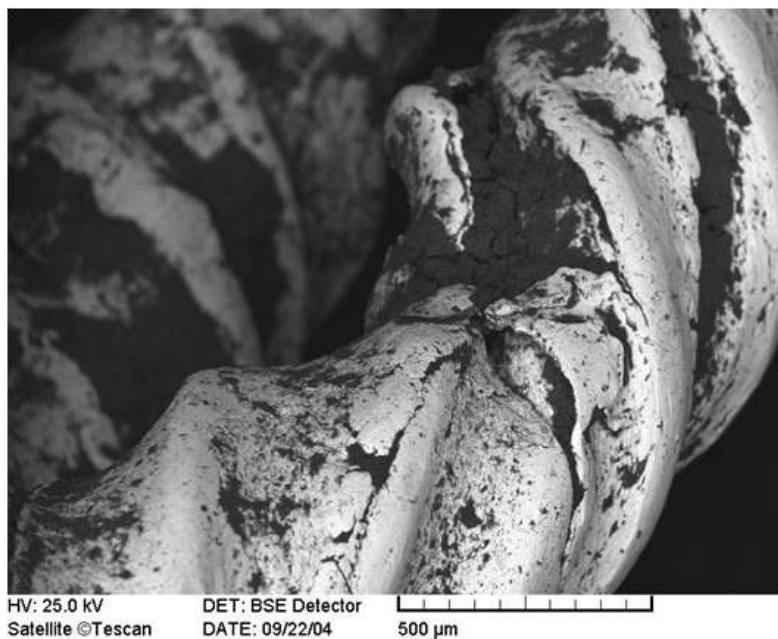
Az arany tisztaságát próbakővel tesztelték, a fémet megdörzsölték a kővel és a rajta maradt nyom színe árulkodott az aranytartalomról, akár gyakorlati tapasztalat, akár ismert összetételű aranyötvözetrel való összehasonlítás alapján.

Az archeometallurgiai vizsgálatok az agyagtégelyekben talált maradványok, illetve legfőként maguknak az aranytárgyaknak az anyagvizsgálatára terjednek ki. Előzőek esetében kémiai összetétel és ásványszerkezet alapján a lezajló fizikai-kémiai folyamatokat, az eljárás termodinamikai jellemzőit, utóbbiaknál pedig főként a tárgyak elkészítésének, alakításának technológiai részleteit kutatják.

Utóbbira szemléletes példa a Miskolci Egyetem Fémtani és Képlékenyalakítástani Tanszékén Kovács Árpád (ma az ARGUM tagja) által 2004-ben elektronmikroszkóppal vizsgált 14 darab – összesen 345 g tömegű – Bódvaszilas mellett talált bronzkori aranytárgy. A kevés rézzel, illetve 5-15% között, inhomogéen eloszló ezüsttel szennyezett arany alapfém nem tökéletes olvasztási technikára utalt. A vizsgálatok két öntés utáni alakítási technikára utaltak: ékes felületek közötti húzásra, illetve finom kalapálásos kovácsolásra. Öntés utáni porozitás csak azokon a tárgyakon volt megfigyelhető, amelyet kovácsolással alakítottak tovább (4.28. ábra). Volt olyan húzott szál, amelyet csavarással alakítottak tovább (4.29. ábra)



(4.28. ábra) Öntés utáni porozitás bronzkori aranytárgy SEM-képén

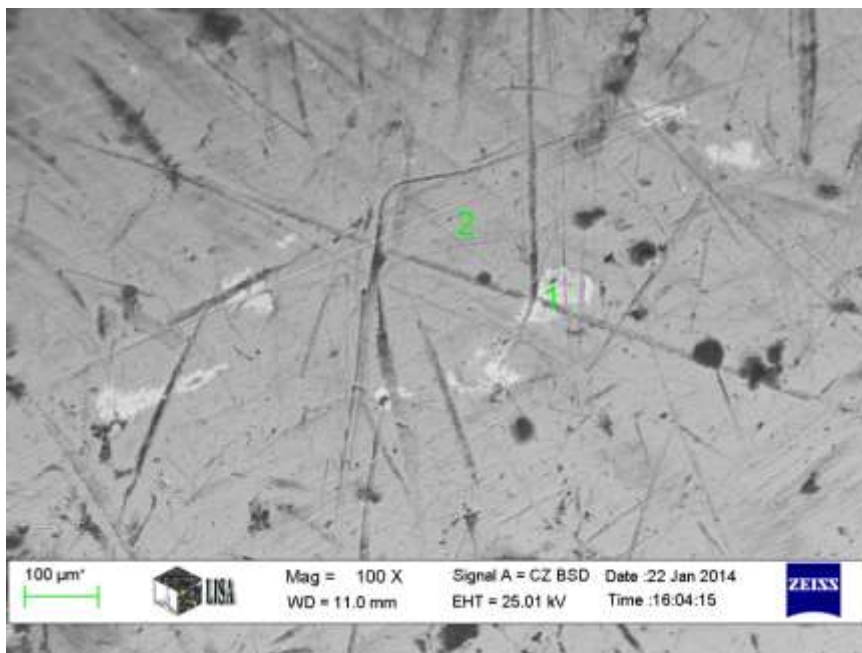


(4.29. ábra) Húzás után csavarással alakított aranyékszer SEM-képe

Honfoglalás kori, illetve Árpád-kori ezüst veretek, kisebb ezüstitárgyak gyakran kaptak arany bevonatot. Ezen tárgyak felületének elektronmikroszkópos vizsgálata számos információt nyújthat az alapanyag és a készítés-technika jellemzőiről. A 4.30. ábrán egy – a Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportja (ARGUM) által vizsgált - Árpád-kori, ezüst lemezből hajlított, belül üreges (szíjelosztó?) karika látható, amelynek elektronmikroszkópos képén (4.31. ábra) látható világos foltok az egykori, használatban lekopott aranybevonat szabad szemmel már nem látható maradványai.



(4.30. ábra) Árpád-kori ezüst lemezből hajlitott karika (Csanádpalota)

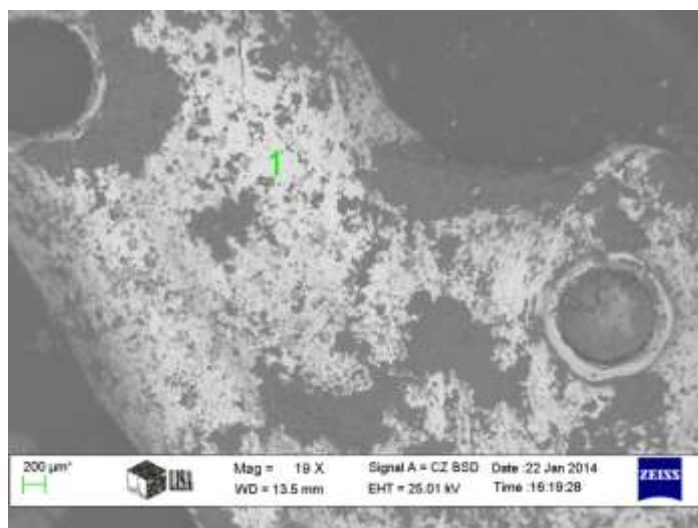


(4.31. ábra) Árpád-kori ezüstkarika SEM-képe (1 – Au:83.95%, Ag:16.05%; 2 – Ag:98.75%, Cu:1.25%)

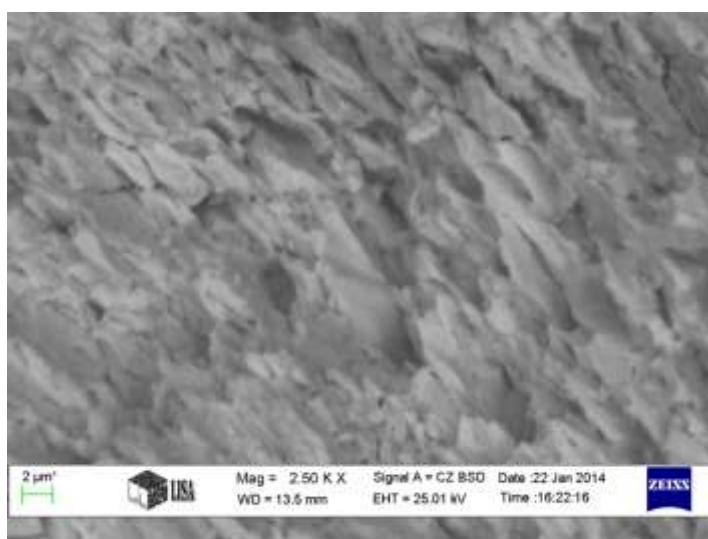
Szintén ebből a vizsgálatsorozatból származik a 4.32. ábrán látható aranyozott ezüst veret, amelyről az aranyréteg (4.33. ábrán 1 jelöléssel) nem dörzsölődött le. A minta SEM-képén a töret durva, réteges mikroszerkezete nem tökéletesen átolvasztott ezüstre vallott, inkább mintha csak felmelegítve alakították volna az egyébként 12% aranyat és 3% rézet is tartalmazó fémeket, amely talán természetes ezüst. A töret réteges keresztmetszete a 4.34. ábrán erős nagyításban jól megfigyelhető.



(4.32. ábra) Árpád-kori aranybevonatú ezüst veret (Csanádpalota)



(4.33. ábra) Árpád-kori aranyozott ezüst veret SEM-képe



(4.34. ábra) A veret töretének réteges szerkezete (SEM-kép)

5. A VAS ARCHEOMETALLURGIÁJA

Nem szükséges túlságosan bizonygatni, milyen alapvető fontosságú szerepet töltött be az emberiség történetében a fémes vas, annak felfedezése, előállítása, használata. Az archeometallurgia tudomány- és kutatásterületén belül is kivételezett szerepet tölt be ez a fém. A nem vas alapú fémekkel kapcsolatosan a kutatások, archeometriai és archeometallurgiai vizsgálatok leggyakrabban a fémleletek metallográfiájára fókuszálnak. Bár a korabeli fémelőállítással és fémalakítással kapcsolatos alapanyagok, melléktermékek, eszközök anyagvizsgálata is fontos információkat szolgáltat az adott fémmel kapcsolatos technológiákról, a korai vaskohászattal kapcsolatos kutatások, tanulmányok legalább akkora, talán még nagyobb volument is képviselnek az archeometallurgiában, mint az összes többi fém együttvéve. Ennek alapvető oka az, hogy a vas előállításához sajátos technika, eljárás szükségeltetik, különösen a korábban megismert fémekéhez képest. Ugyanakkor, bár a vas a leggyakoribb előfordulású (5%) a földfelszín közelében az korai történeti időkben használt fémek közül (csak az alumínium előzi meg a maga 8% körüli értékével), a leginkább hajlamos a korrózióra, viszont relatíve nagy tömegben való előállíthatósága mellett széles skálán befolyásolható a kristályszerkezete, így mechanikai tulajdonságai is.

Bár a jegyzet nem kimondottan ipartörténeti prioritású, mégis az archeometallurgiai jellegű vizsgálatok, megállapítások érdekében célszerű röviden végigtekinteni a korai vaskohászat változatos technológiatörténetét. Ehelyütt minderre – a terjedelmes kutatási anyag figyelembe vételével – első sorban európai vonatkozásban kerül sor, azon belül is leginkább a Kárpát-medence fókuszában.

5.1. A vaskohászat korai és középkori technikatörténete

A vaskohászat technológiai fejlődésének korszakolásakor nem célszerű feltétlenül a történeti cezúrák mentén haladni, bár az egyes alapvető technikai, technológiai újítások az által, hogy alapvetően megváltoztathatták a korabeli vaskohászati produktum minőségét és/vagy mennyiségét, tekintve a vas kiemelt szerepét az élet szinte minden területén, egyúttal hosszabb-rövidebb idő alatt társadalmi, politikai változások közvetett előidézői közé is tartozhattak.

A vaskohászat technológiája öt nagyobb periódusra bontható, amely általában véve egész Európára érvényes, de időbeli tagolása térségenként eltérő lehet. Az alábbi felsorolásban zárójelbe az egyes periódusoknak a Kárpát-medencére jellemző időintervalluma került [2.2]:

1. A kezdetektől a vízierő vaskohászati felhasználásáig: vaselőállítás bucakemencében – direkt módszerű bucavas készítése (Kr.e. 7. sz. – Kr. u. 14. sz. első fele).

2. A vízierő felhasználásával működő fűjtatók, hámorok, massák kora: ez is egyfajta bucavas-gyártás (13. sz. második fele - 18. sz. közepe).
3. A faszéntüzeléses nagyolvasztók korszaka – már indirekt (nyersvas-alapú) módszer (18. sz. első fele - 19. sz. közepe).
4. A kőszénkocsz-tüzelés és a kavarásos vasfinomító eljárás virágzó korszaka – ipari forradalom a magyar vaskohászatban (19. sz. második fele – kocszfelhasználás már korábban is).
5. A modern nagyipari nyersvas- és acélgyártás korszaka (19. sz. végétől)

A felsorolás alaptechnológiát tekintve két részre bontható. Az ember által előállított vas felhasználásának kezdetétől mintegy kétezer évig tartó első, történelmileg roppant változatos periódusa alatt – bár ez háromszor olyan hosszú, mint a többi periódus összesen – a vaskohászat elve alapvetően nem változott. Külszíni gyűjtésből vagy relatíve alacsony művelésű bányákból származó vas-oxid tartalmú ércet bucakemencékben (esetleg olvasztógödörökben) közvetlenül fémessé redukáltak. A „közvetlen” vagy „direkt” jelző onnan származik, hogy a nagy vasvesztésű, hosszadalmas és fáradtságos eljárás alatt a vasérc meddőtartalmából folyékony salak keletkezett, viszont a fémessé vas a procedúra alatt alapvetően nem került folyékony állapotba, nem tudott annyi korbont oldani, hogy a kemencéből kiemelve ne legyen tömöríthető, illetve a salaktól megszabadítva, később újrahevítve kovácsolható, alakítható. Ez az ún. bucaeljárás, amelynek technikai-technológiai jellemzőiről, metallurgiájáról a következő fejezetben részletesen is szó lesz. A vas archeometallurgiai kutatásainak zömét ezen eljáráshoz köthető régészeti emlékek, anyag- és technológiai vizsgálatok adják.

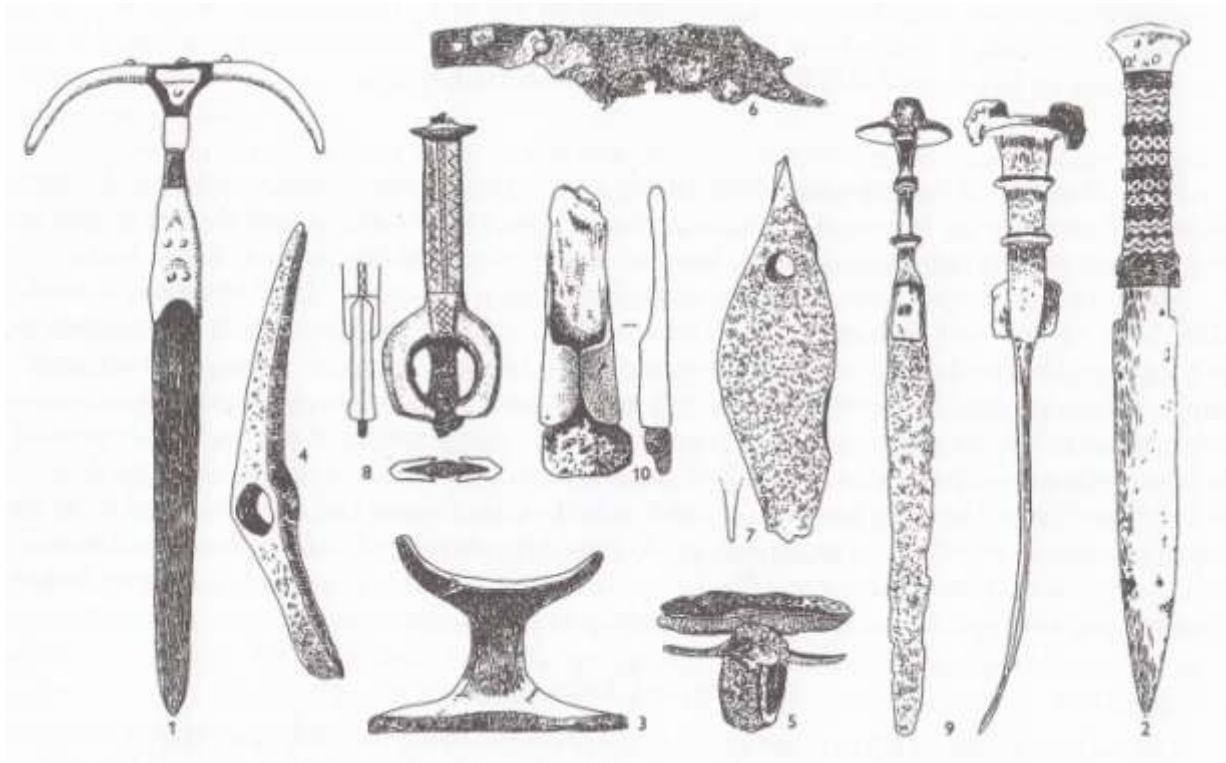
A bucaeljárás jó néhány évszázaddal túlélte azt a lassan kibontakozó alapvető technológiai váltást, ami a befűjt levegőnek a fáradtságos kézimunka megkönnyítése, kiváltása, egyúttal intenzifikálása illetve a kemence üzemi hőmérsékletének emelése céljából történő, vízikerek általi biztosítása volt. A második, mondhatni átmeneti és technológiai szempontból nem is teljesen tisztázott időszak mélyen belenyúl az újkorba és még a 18. században is működtek bucakemencék. A rákövetkező, kétlépcsős (indirekt) vas- és acélgyártás periódusai nem tartoznak a jelen tárgyalt archeometallurgiai témakörök közé. Ezek az időszakok a nagyolvasztókban előállított folyékony nyersvas, illetve a belőlük készített acél és öntöttvas újkori, illetve modern technológiáiról szólnak.

5.1.1. A vas használatának és kohászatának kezdete és elterjedése

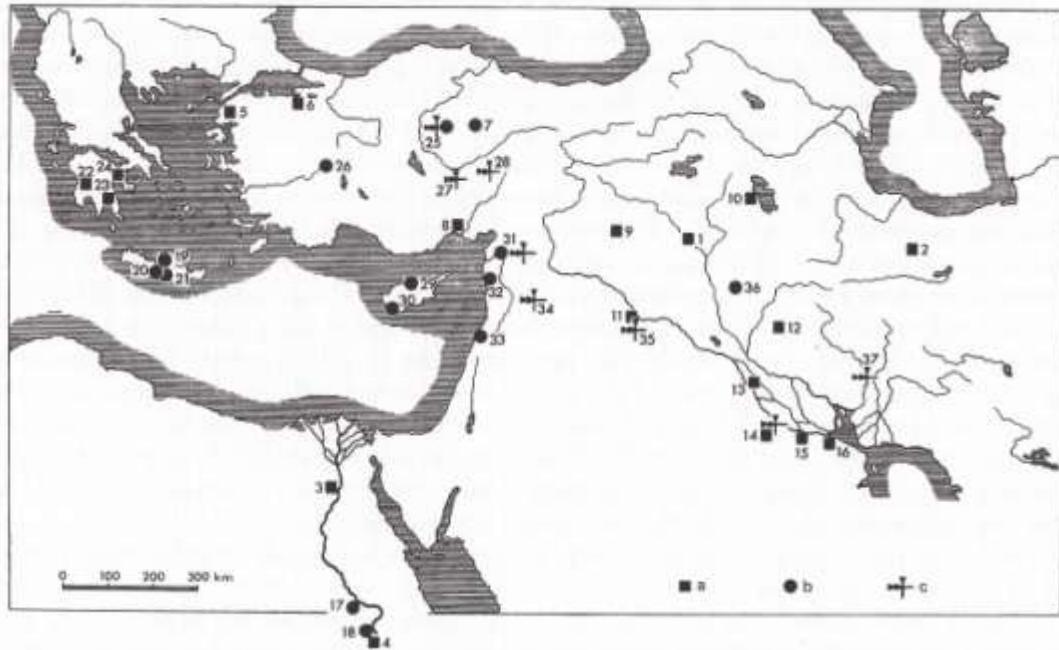
Elvileg - a rézhez és a nemesfémekhez hasonlóan - a fémessé vassal is találkozhatott az ember a természetben, ez azonban döntő többségben nem földi eredetű volt. A meteoritvasak ritkaságára jellemző, hogy 1785 és 1985 között mindössze 36 becsapódó meteoritot regisztráltak, illetve mintegy 700 fémessé vasat is tartalmazó meteoritdarabkát találtak. Összetételük jellemző vonása a magas nikkeltartalom, amely az alacsonyabb értékek esetén is 5-6% körüli, 13%-os tipikus, de előfordul 42%-os nikkeltartalom is. A külső és belső korrózióra is hajlamos meteoritvas-darabok bizonyos összetételnél hidegen alakíthatók. A meteoritvasaktól is ritkábbak a vulkanikus működésből származó ún. természetes vagy földi vasak, amelyekből 10 kg és 25 tonna közötti tömegű darabok kerültek elő Grönlandon, ahol

egy középkori sírban ebből készült vastárgyat is találtak [2.29]. A meteorvasból készült tárgyak régészeti öröksége természetesen nagyon ritka és leginkább a Közel-Kelethez kötődik.

Amint arról korábban már volt szó, a vaskor kezdete relatív fogalom, földrajzi egységenként is változó. A legelső, ember által meteoritvasból készített egyszerű tárgyak megjelenése hosszú évszázadokkal megelőzi a vas előállításának képességét. Tepe Sialk-ban (Észak-Írán) Kr.e. 4600-4100, a gízai piramisokból pedig Kr.e. 3000-2700 körüli időkből találtak vasgolyókat, vasgyöngyöket [5.1, 2.29]. A Kr.e. 3-2. évezredből Anatóliából (vastór az Alaca Hüyük-i királysírból - Kr.e. 2400-2100 [5.2]), Mezopotámiából, Egyiptomból, Szíriából és a görög félszigetről és szigetekről kerültek elő vastárgyak, a 2. évezred közepéig mintegy 70-80 darab, majd azt követően Kr.e. 1200-ig valamelyest növekedett az előkerült vastárgyak száma és lelőhelyeinek területe is. A Kr.e. 12. század tekinthető a vaskor kezdetének a már említett kis-ázsiai és egyiptomi térségben. Az 5.1. ábra néhány példát mutat be az legkorábbi vastárgyak közül az említett térségekből, illetve Kelet-Európából, illetve az 5.2. ábra térképén azok a helyek láthatóak (megnevezés nélkül) Délnyugat Ázsiában, Egyiptomban és a Mediterráneum keleti vidékén, ahol Kr.e. 4000 és 1200 között jellemzően vastárgyak, illetve vasat említő írásos emlékek bukkantak fel.



(5.1. ábra) Korai vastárgyak: 1 – aranyozott markolatú vastőr (Alaca Hüyük, Törökország, Kr.e. 2300 körül), 2 – vastőr Tutankhamon sírjából (Théba, Egyiptom, Kr.e. 1350), 3 – fejtámasz Tutankhamon sírjából (Théba, Egyiptom, Kr.e. 1350), 4 – vascsákány (Har Adir, Palesztina, Kr.e. 12.sz.), 5 – ólom és ezüst foglalatos vasgyűrű királyi sírból (Dendra, Görögország, Kr.e. 14. sz), 6 – bronzszegecses vaskés (Perati, Görögország, Kr.e. 12. sz), 7 – kéttős gúla kialakítású vas félkész termék (Khorsabad, Irak, Kr.e. 8. sz.), 8 – bronzberakásos vastőr (Lurisztán, É-NY Irán, Kr.e. 8. sz.), 9 – rövid vaskard emberfej-díszítésű kardgombbal (Lurisztán, É-NY Irán, Kr.e. 8. sz.), 10 – bronzfoglatba ágyazott meteorvasból készült vájóbalta (Boldirevo, Dél-Ural, Oroszország, Kr.e. 18.sz.) [2.27]



(5.2. ábra) Vastárgyak és a vas írásos említése a vas előfordulásának legkorábbi területein (szimbólumok: a – vastárgyak Kr.e. 4-3. évezredből, b – vastárgyak Kr.e. 2. évezredből 1200-ig, c – a vas írásos említése a Kr.e. 2. évezredben) [2.27]

Természetesen nem lehet markáns időbeli határokat húzni, mint ahogy teljes bizonyossággal azt sem lehet megállapítani, mikortól tudtak alakítható vasat ércekből előállítani. Mindenesetre a Kr.e. 2. évezred második felében már lassú növekedés mutatkozott a használt vastárgyak számát illetően. A fémes vas ércekből való előállítás, kivonása (iron smelting) természetesen nem célirányos eseményekkel kezdődött, de nem véletlen a kis-ázsiai, közel-keleti térség vezető szerepe. A réz és bronzkultúra elterjedésében is alapvető szerepet játszó területeken a rézércet olvasztásánál folyósító szerként használt vas-oxid tartalmú ércekből redukálódhattak ki az első fémes vasrögök, amely után még igen hosszú út vezetett a folyamat felismeréséhez, az anyagok (kiinduló ércek és keletkezett fémek) beazonosításához és elszeparálásához, azaz a vasércet olvasztási technológiájának a rézkohásztól való leválasztásához.

A vasból készült tárgyak, eszközök első használói a társadalom vezető rétegeiből kerültek ki, a kezdeti időkben a vas értéke igen nagy volt. Amikor viszont szembesültek vele, hogy nyersanyagkészlete jóval nagyobb, így könnyebben előteremthető, a bonyolultabb metallurgiai procedúra ellenére is kezdte kiszorítani a réz és bronz használatát a mindennapi életben is. A Hettita Újbirodalom (Kr.e. 14-13. század) volt az első olyan államszervezet, amely nagyobb mértékben használta a vasat, többek között fegyverek előállítására is. A birodalom felbomlásával, illetve az ún. tengeri népek támadásával, mozgásával közvetítődött a vas nyugat felé a Kr.e. 12. század elejétől, amelynek első európai állomása az ókori görög világ volt. Ez a lassú és az előállítási technológiát is magával vivő, dél-keletről észak-nyugat, nyugat felé mutató áramlás a Kr.e. 8-7. századig tartott, amikortól datálhatjuk Közép-Európa vaskorát. A rákövetkező évszázadokban a vastechnológia útja észak felé irányult, míg Kr.e. 500 körül Észak-Európában is beköszöntött a vaskor. Az 5.3. ábrán lévő térképen a vas használatának európai elterjedési irányai figyelhetőek meg, míg az 5.4. ábra a vassal kapcsolatos főbb kereskedelmi útvonalak mellett azokat az európai lelőhelyeket is bemutatja, ahol bizonyítékot találtak a legkorábbi időszak európai vaskohászatára.



(5.3. ábra) A vas használatának elterjedése Európában. (Jelölések: a – a legkorábbi vaskor területe, b – nagy nikkel-tartalmú, vélhetően meteorvas tárgy lelőhelye, c – vasleletek Kr.e. 15-13. sz.-ból, - késő bronzkori vastárgyak /Kr.e. 1. évezred kezdetéig/, e – a legkorábbi vastárgyak elterjedésének feltételezett irányai) [2.27]



(5.4. ábra) A vas legkorábbi előállításának helyszínei és a jellemző (vas)kereskedelmi útvonalak. (Jelölések: a – a vasat előállító legkorábbi civilizációk, b – vaskohászatra utaló lelőhelyek Európában, c – a legfontosabb Kr.e. 8. sz-i vastárgy-lelőhelyek, d – kelet-európai bronzkori vasleletek, e – trák-vend útvonal, f – kimmer útvonal, g – görög és föníciai útvonal) [2.27]

Meg kell azonban említeni, hogy a távoli kelet-európai, nyugat-szibériai sztyeppéken szintén igen korán tűnnek fel a vas előállításának régészeti bizonyítékai, például a Don melletti Voronyezs környékén Kr.e. 15. századra keltezhető vassalakot és kisméretű bucatűzhely-maradványokat találtak. Mindazonáltal a vaselőállítás és vasművesség bölcsőjének tekinthető kis-ázsiai, közel-keleti térségből az északra irányuló népmozgási, kereskedelmi tevékenységek hatásaként a Kr.e. 8. században az említett sztyepei térségben is elterjedt a vas előállításának technológiája és a vaseszközök használata. Érdekes feltevésekre ad okot, hogy az ősmagyarok Kr.e. 5. századi feltételezett szállásterülete az Ural-egységtől délre szomszédos lehetett az iráni eredetű, már Kr.e. 8-7 században északra költöző szarmatákéval. A Kárpát-medencébe a szarmaták elől nyugat-keleti irányba szkiták hozhatták be az ősi vaskohászat technológiáját [2.22]. A mai Magyarország területén megtalált legkorábbi vassalak egy mezőcsáti preszkíta sír szórványleletei közé tartozik [5.4].

A Kr.e. 8-6. századból Közép- és Nyugat-Európa szerte több térségben is felbukkantak korabeli vaskohászat maradványai. A Hallstatt-korszak (Kr.e. 750-450) vaskultúrája több néphez kötődik. Több elszórt kemence működhetett az Alpok és a Kárpát-medence közötti régiókban, illetve egyszerű, nyitott kemencében való vasolvasztással több, késő Hallstatt-kori nép (pl. illírek, dákok, proto-kelták) sajátíthatták el iparszerűen a vaselőállítás ősi eljárását [2.27]. A Kr.e. 8. századtól a vas használata fokozatosan, de egyre nagyobb ütemben nyert teret a fegyverek és dísz tárgyak, díszítések mellett immár a hétköznapi használati tárgyak körében is. Itália középső részén a Kr.e. 6. században az etruszkok kohósítottak vasércet, amelyet akár 50 méter mélyből hozhattak fel [2.22]. Európa első olyan civilizációja amely, mindennapi fémhasználatát (kézműves és földműves eszközök, stb.), hadviselését egyértelműen és kiterjedten a vas használatára alapozta, a kontinens szinte minden részén előforduló kelták voltak. A La Tène korszak (Kr.e. 5. századtól időszámításunk kezdetéig) vaskultúrája, különösen a késői időszakban egyértelműen hozzájuk kötődik. A kelták vaskultúrájának régészeti hagyatéka a késői La Tène időszakig nem annyira a kemencék maradványaiban, mint inkább a néhány generációnyi idő alatt elkészített vasfegyverek számában, illetve a felhalmozott vasrúd, tömörített vasbuca tekintélyes mennyiségében (140 helyen mintegy 700, egyenként 5-7 kg-os darabot találtak) nyilvánul meg [2.27].

5.1.2. Vaskohászat a római kori és a korai középkori Európában

A rómaiak alapvetően militarista, birodalomépítő politikája, ugyanakkor innovatív, építészeti dimenziókban az előző korokhoz képest – de a birodalom összeomlását követő századokhoz képest is – kimagasló teljesítménye a korabeli vaskohászat jellegét is átformálta, meghatározta. Általánosságban elmondható, hogy a fő hangsúly az előállított vas minőségéről a mennyiségre tevődött át, amely érthető a jelentősen megnövekedő és folyamatosan megújuló fegyver- és munkaeszköz-szükségletet tekintve. Ugyanakkor a Római Birodalom jól kiépített vaskohászati és vasműves rendszere volt a történelem első, régiókat is összefogó, koordináló, igazán birodalmi szintű iparjellegű szerveződése. Európában a főként Dacia, Dalmatia és Noricum tartományok bányáiból származó vasércet a birodalom különböző térségeiben működő bucakemencékben kohósították és a jellemzően szögletes rúd tömörített – gyakran felirattal pecsételt - köztés vasterméket (5.5. ábra) aztán elszállították a birodalom különböző településeire, amelyek gyakran speciális vastermékeikről voltak ismertek. Ilyen volt például Toledó (Toletanus - kard), Lucca (Lucensis – kard), Verona (Veronia – pajzs), Mantua (páncél), illetve Damaszkusz (amely inkább kereskedelmi központ volt), Aquilea, Siscia [2.22].



(5.5. ábra) Hajónoncsban talált római kori vasrudak [2.29]

A Római Birodalom korában Európa a vaskultúra szempontjából is ketté volt osztva. Míg a római provinciák az előbb említett, teljes vertikumú vaskultúra (ércbányászat, kohászat, fémalakítás) részei voltak, a katonai légiók biztosította határokon túl, a „barbaricum” világában élő, főként kelta és germán törzsek többé-kevésbé a négy-ötszáz évvel korábbi, alapvetően kelta vastechnológiát folytatták tovább, amely metallurgiáját tekintve ugyanaz a direkt eljárás volt, mint a birodalom határán belüli technológia. Keletről adoptálták vasolvasztási technikájukat az Európába érkező, iráni nyelvet beszélő népek (szkíták, szarmaták, alánok, stb.). Az 5.6. ábra térképén jól látható a kettéosztott kontinens, illetve számokkal jelölve az egyes prominens vaskohászati területek a birodalom határának két oldalán. Valamennyi jelölt terület megnevezését kerülve ugyan, de mindenképpen érdemes a Kárpát-medencéhez legközelebb álló vaskohászati régiókat megnevezni, amelyek a Római Birodalmon belül a bányatelepeknél már említett Noricum (2) és Dalmatia (3) a birodalomon kívül pedig a ma Szlovákiában lévő várnai (Zsolnai járás) környék (13) és a lengyel Świątokrzyskie (Szent Kereszt) hegység (14).



(5.6. ábra) Fontos vaskohászati helyek római korban (Jelölés: A – a Római Birodalmon belüli hely, B – a birodalmi határ Kr.u. 1. sz-ban, C – nagyobb volumenű vaskohászati helyek a „barbaricum”-ban [2.27])

A Római Birodalom felbomlásával járó drasztikus változások eredményeként, a népvándorlás korának európai vaskultúrája is heterogén képet alkotott. A birodalom területén működő kohókból, vaskohászati műhelyekből több is fennmaradhatott és tovább működött, de a vas iránti igény volumene nagyságrendekkel csökkent, illetve eltűnt az ipari jellegű szervezettség. A Nyugat-Római Birodalom bukása és korai középkor végére létrejövő európai birodalmak megszületésig terjedő évszázadokat szokás „sötét középkornak” nevezni, amely a kor forráshiányosságára, illetve a római korhoz képest technikai, kulturális, életmódbeli hanyatlásra is utal. Vasra természetesen ekkor is volt igény, de a „hivatásos katonák” száma – akik a legtöbb vasat használták fel – Európa-szerte drasztikusan csökkent. A rómaiak urbánus civilizációja helyett az általában csak rövid ideig egy helyben élő, igen változatos és változó európai népesség vaselőállítására és vasművessége jellemzően helyi igényeket kielégítő műhelyekre, bucakemencékre korlátozódott, a korábbi jellegzetes vaskohászati központok rendszerint elvesztették kiemelt szerepüket. A Kárpát-medencében a népvándorlás korának korai időszakából csak néhány, főként helyi igényeket kielégítő volumenű kovácslásra utaló nyomok bukkantak elő, legfőként sírokban található kovácsszerszámok és félkész vastárgyak által.

A népvándorláskor második felében (6-9. század) új népek jelennek meg Európában, a többek között a szláv törzsek, az avarok és mintegy a korszak lezárásaként a magyarok. Miközben az első évezred utolsó századaiban a Nagy Károly (ur. 768-814) által hatalmassá növelt, majd halála után feldarabolt Frank Birodalom utódállamaiban, illetve Nyugat-Európa többi korai államkezdeményeiben (pl. az angol-szász királyságokban) egyre inkább kialakuló feudális társadalmi-gazdasági rendszer vaskultúrája a meglévő technológiára épített, addig a Kelet-Közép-Európában megjelenő, fent említett „új népek” (szlávok, avarok, magyarok) több helyről származó ismereteik által – ha nem is feltétlenül szándékosan – de néhány innovatív megoldással, jellegzetes bucakemencéikkel kialakították saját technikájukat a 8-10. században. Az archeometallurgiai kutatások fontos szerepet játszhatnak annak a kérdésnek a tisztázásában – vagy legalábbis tisztábban látás folyamatában – hogy a Kelet-Közép-Európában ekkortájt berendezkedő népek - köztük a magyarok – vaskohászati technikája, szakmai tudása mennyiben gyökeredzik a korábbi itteni népek (pl. szkíták, szarmaták stb.) ismereteiből, illetve milyen vaskohászati ismereteket hozhattak magukkal keletről, a sztyepei, illetve Kaukázus környéki népekkel (pl. kazárokkal) érintkezve.

A nagy népmozgások utolsó szakaszában, illetve az utána megállapodott Európa virágzó középkorában (10-13. sz.) kialakultak és hosszú időn át tartósan működtek a vaskohászat jellemző területei. Az 5.7. ábrán ezek figyelhetőek meg. A feketével jelölt területeken a korabeli vaskohászat jelentős volumenű régészeti bizonyítéka került elő, közülük néhányon igen hosszú időbeni kontinuitással (pl. 7 – Westerwald, Siegerland, Sauerland, 8-13. sz.; 13 – Sussex, 7-13. sz.). A fehér körök pedig azokat a területeket jelölik, amelyek középkori vaskohászatának vonatkozásában főként írásos forrás található. Ezek közül kiemelendő az F jelű, ma Szlovákiában lévő Gömör-Szepesi-érchegység, ahol akkoriban természetesen magyar vasat termeltek. A Kárpát-medence szempontjából kiemelendő a (4) terület, amely a Nyugat-Dunántúlt takarja, de az utóbbi évtizedek régészeti kutatásai e területet bővítették a somogyi vastermelő vidékkel, illetve az (5) terület, amely Észak-Magyarországon főként a Borsodi-dombságot, a Sajó középső vidékét jelenti. Jelen jegyzet a vas archeometallurgiájának tárgyalását illetően a következő fejezetekben alapvetően ezen területek leleteire, illetve a hozzájuk kapcsolódó kutatások, vizsgálatok eredményeire épül. A Kárpát-medencéhez közeli középkori vaskohászati területként megemlíthetők a stájer (1), morva (2) és burgenlandi (3) területek. Látható, hogy Skandinávia a római kor barbár világa után jelentős előretörést mutat, amely már a 600-as évektől elkezdődött, a 10-13.

században pedig a svédok vastermelése már egyértelműen meghaladta a helyi igényeket [2.27]. Mindazonáltal az északi viking kultúrában a vas előállításának és a vasművességnek kiemelt szerepe volt és nem csak a fegyvergyártás terén.



(5.7. ábra) A középkori Európa jellemző vaskohászati területei [2.27]

5.1.3. A Kárpát-medence középkori vaskohászata

A továbbiakban a vaskohászat ipartörténetének, technikatörténetének alakulását kifejezetten a Kárpát-medence fókuszában tárgyalom. Egyrészt azért, mert az avar időktől a magyar honfoglalás időszakán át, az Árpád-kor végéig nemzetközi mércével is jelentős régészeti és ezzel összefüggő archeometallurgiai kutatási eredményeket tudunk felmutatni a kárpát-medencei vaskohászatot illetően, másrészt az alaptechnológiában azonos, de később technikai jellegzetességekben, részleteiben, helyi termelési sajátosságaiban differenciálódó európai vaskohászatban hazánk vaskultúrája nem csak technikatörténetileg, hanem – talán még inkább – archeometallurgiai is reprezentatív egységet, ugyanakkor folyamatosságot képez.

Az ázsiai – esetleg türk rokonságú - nomád eredetű avarok 6. és 9. század közötti birodalma meghatározó katonai hatalom volt a Kárpát-medence térségében. Az avar sírok fémtárgyai önmagukban is jelentős bronz- és vaskultúrára engednek következtetni, az avar korszak második feléből származó pannoniai műhely-lelőhelyek viszont bizonyítják, hogy jelentős vaskohászati tevékenység folyt az Avar Birodalomban. A 670 körüli onogur betelepülés utáni időszakból nagyobb kiterjedésű kohótelepek kerültek elő Nyugat-Magyarországról - az Alpokalja keleti és a mai Kisalföld dél-nyugati részén - és a mai Somogy megye vidékéről. Ezek a vaskohászati telephelyek minden jel szerint túlélhették az Avar Birodalom bukását és technológiai örökségük a 9. század végére, a magyar honfoglalás idejére is kihatott [5.5, 2.22].

Az avarok kohászati tevékenységére jellemző kohótípust - a Gömöri János által „avar” illetve „nemeskéri” típusúnak nevezett [2.22] – szabadon álló bucakemencék alkotják (a kemencetipológia részletei a következő fejezetben). A legfrissebb ismeretek szerint az avarok nyugati „hercege”, a tudun területén az avar korszak második felében tűnnek fel jelentős vaskohászati telepek. Minden bizonnyal az alvezéri központok közelében, a Győr-Moson-Sopron megyei Tarjánpuszta, illetve Ravasz, de főként a Somogyban Kaposvár és Zamárdi környékén telepíthettek nagyobb számban össze kohászokat, kovácsokat. A 2001-es kaposvár-fészerlaki ásatás – bár a mintegy 110000 m² kiterjedésű lelőhelyből csak 17500 m²-t tártak fel – több mint 20 avar bucakemence maradványát hozta felszínre a 7-8. századból [5.6], a Balaton-parti Zamárdiban pedig 2006-ban Közép-Európa egyik legnagyobb korai középkori vaskohászati jellegű lelőhelyét tárták fel [5.7]. A környék avar kori vaskohászati jelentőségét már korábbi ásatások is sejtették [5.8]. Kérdés viszont, hogy kik és milyen rendszerben dolgozhattak a később egyre elszlávosodó és frank függésbe kerülő Avar Birodalomban ezekben a műhelyekben. Az avar kori műhelyek és közvetlen környezetük a kutatások alapján a vaskultúra teljes vertikumát lefedték, tehát egy csoport lokális szinten megszervezve végezhetette az ércgyűjtést, ércelőkészítést, faszénégetést, kohósítást, bucatömörítést és valószínűleg gyakran a készre kovácsolást is. Egy ilyen 9. századi – „nemeskéri” típusú bucakemencékkel kohósító - műhelykomplexum rekonstrukciós rajza látható az 5.8. ábrán, ahol a fújtatás technikája természetesen csak feltételezésen alapul. A Balaton dél-nyugati végén többször is kutatott, karoling közigazgatás alatt álló frank-szláv-avar népességű, 9. századi zalavári uradalomban és a környező udvarházaknál is komplex háziipar működött, amely a vaselőállítás és kovácsolás valamennyi fázisát valószínűleg egymáshoz közeli helyeken magába foglalta [5.9, 5.10].



(5.8. ábra) Elképzelés egy 9. századi vaskohászati telep működéséről [5.11]

A hazai archeometallurgiai kutatások egyik sarkalatos témája a honfoglaló magyarok vaskultúrájának eredete, illetve kialakulása a Kárpát-medencében. Közvetett, de a magyarok vastermelésének folytonosságát alátámasztó bizonyítékok a dél-oroszországi és ukrainai pusztákon talált, 6-9. századi vastermelésre utaló régészeti leletek [5.12], illetve azok a nyelvileg, néprajzilag és régészetileg is alátámasztható kutatási eredmények, miszerint a magyarok és a környezetükben élő török népek – amelyek vastermelő kultúrájáról egyértelmű források vannak – között népességkeveredés is létrejött [5.13]. A fémműves technikák fejlettsége a térségben élő, egymáshoz közeli népek esetén valószínűleg nem sokban különbözött egymástól [5.14, 5.15].

Mindazonáltal a magyarok nem hozták magukkal a Kárpát-medencébe azt a kétoldali, alagútszerű járatokon keresztüli fűjtatással működtetett kemencetípust, amelyet a 9. században a Kazár Birodalomban általánosan használtak [3.6]. A nyugat-magyarországi, avar-onogur hagyományokat követő, szabadon álló bucakemence-típus viszont nem sokkal élte túl a honfoglalást. Az azt felváltó, főként a 10. századra datálható, műhelygödör oldalába beépített, ún. „fajszí” kemencetípus formái, műhely-környezetbeli változásának – rendszerint több kemence működött egy műhelygödörben egymás mellett – okaiként korabeli empirikus tapasztalatok, illetve hidegebbre, csapadékosabbra változott éghajlati tényezők merültek fel, de az utóbbi évek régészeti eredményei – éppen Zamárdi és Kaposvár vonatkozásában – azt is feltételezik, hogy már az avarok is használtak beépített kemencéket.

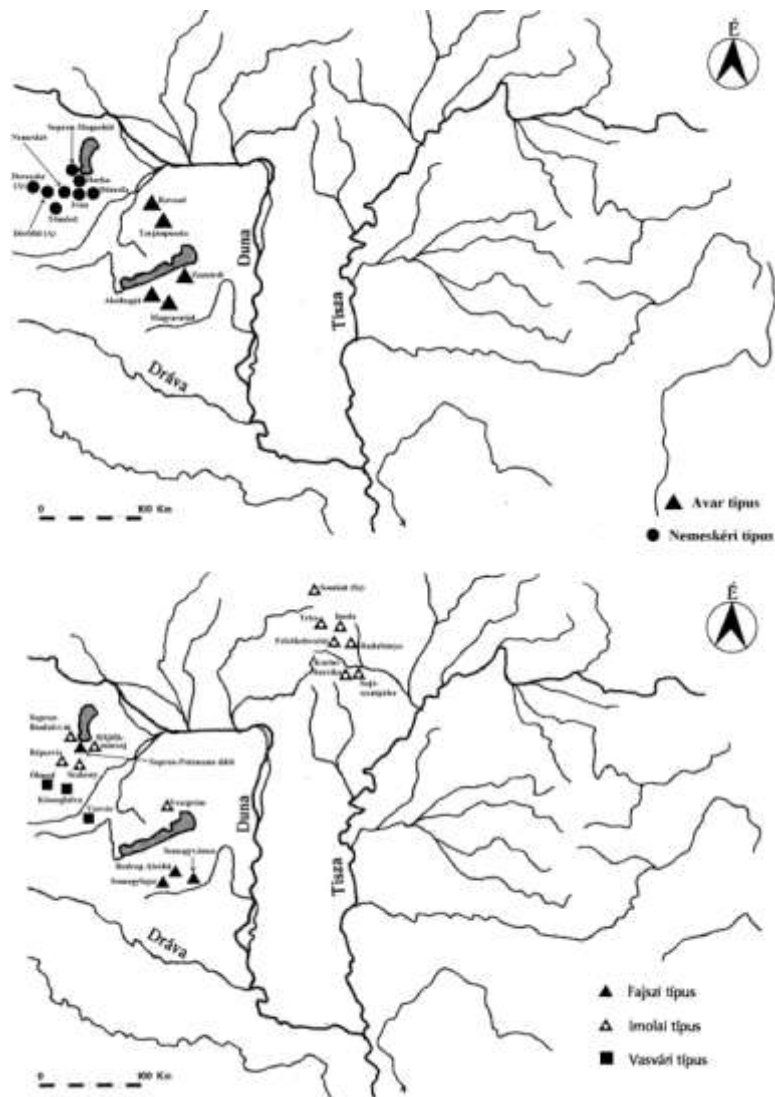
A honfoglalás-kori „fajszí” kemencetípussal képviselt vaskohászat még nem az országos szintű vastermelő szervezet kialakításához tartozik. Viszont a 11-13. századi ún. „imolai” típus már az Árpád-kori Magyar Királyság tipikus, műhelygödör falába épített kemenceformája volt. Az országban Vasvár nevű központtal két vaskohászati régió bontakozott ki, amint arról az 5.7. ábra kapcsán már szó esett. Mind az észak-, mind a nyugat-magyarországi területen jól megszervezett korai vasipari rendszer működött, ércgyűjtéssel, kohótelepekkel, kovácsműhelyekkel. A vasas szakmákra korai településnevek is utaltak. A műhelyfalba vájt, a régészeti leletek tanúsága szerint külön kialakított mellfal nélkül működő „imolai” kemencetípust mindkét említett korabeli vaskohászati régióban használták. Ezen kívül a nyugati határvidék mentén a 11-12. században néhány helyen felbukkant egy durván kivitelezett ikerkemence-fajta (az ún. „vasvári” típus), amelyen mellnyílás sem volt, mint az „imolai” típuson. A kemencetípussal kapcsolatosan nyugati szláv eredet mellett esetleg germán hatás is feltételelezhető, de az előbbi valószínűbb a helynevek eredete miatt [2.22].

Az újabb és újabb lelőhelyek felbukkanása miatt a kutatások természetesen korántsem tekinthetők lezártak. Jó példa erre egy 2005-ös, Cegléd külterületén végzett feltárás, amely többek között egy komplett, Árpád-kori, a tatárjárás alatt szétdúlt, kiterjedt település periferiáján lévő vasas műhelyrendszert talált az előbb említett vaskohászati régióktól relatíve távol eső, alföldi környezetben. Az egyik lelőhely képviselte a metallurgiai fázishoz tartozó tevékenységeket (az 5.9. ábra egy itt talált, három bucakemencéből álló műhelygödör maradványait mutatja), a másik, előzőhöz közeli, azzal gyakorlatilag összefüggő, mindössze árokkal elválasztott lelőhelyről pedig inkább a kovácsolásra jellemző nyomok, műhelymaradványok kerültek elő [5.16, 5.17].



(5.9. ábra) Három bucakemencéből álló műhelygödör – Cegléd, 12-13.sz.(közöletlen)

Az 5.10. ábrán a 7-9. századi és 10-12. századi kemencetípusokat külön ábrázolva láthatók a korai középkori Kárpát-medence legfontosabb vaskohászati lelőhelyei.



(5.10. ábra) Fontos vaskohászati lelőhelyek a korai középkori Kárpát-medencében [2.22, p. 222. és 228. alapján, de átszerkesztve]

Az Árpád-kori szolgálónépek rendszere a 12. század vége felé indul bomlásnak, ennek hatására a 13. század közepére a vaskohászok szolgálónépi szervezete is eltűnik a forrásokból. A változások fő oka az új vaslelőhelyek felfedezése és aktivizálása (Stájerország, Szlovák Érchegeység), illetve a társadalmi igények változása folytán a feldolgozó kézműves ipar falusi csoportokból városi koncentrálttság felé történő átalakulása is közrejátszott. Mindezen a tényezők hatása azonban mintegy száz év alatt érvényesült oly mértékben, hogy a bucavaskohászat technológiáját országos szinten megváltoztassa, ugyanis ehhez technikailag alapvetően az szükségeltetett, hogy a 14. század második negyedében Magyarországon is elkezdtek használni a vízikerek energiáját a vaskohászatban.

Az vas archeometallurgiája – a kapcsolódó régészeti lelőhelyek és leletek jellegéhez igazodva – túlnyomórészt a bucaeljárás vízikerek alkalmazását megelőző mintegy kétezer évből merít kutatási-vizsgálati témát. Magyarországon a 8-13. századi vaskohászat – ami magába foglalja a kárpát-medencei magyar vaskohászat kezdetét is – kutatása igen hangsúlyos, amelyben több kutatási projektet is végzett a miskolci ARGUM kutatócsoport.

5.1.4. Az indirekt eljárás kialakulása és elterjedése

A vaskohászat kezdetétől a 13. századig Európában közvetlenül alakítható (kovácsolható) úgynevezett bucavasat kézi fűjtatással ellátott tűzhelyeken, kemencékben állították elő. A bucakemencében lejátszódó folyamatokat, illetve a technológia részleteit a későbbiekben külön fejezet tárgyalja. A 13. században a bucakemence metallurgiáját későbbiekben alapvetően befolyásoló innováció történt; egyre inkább kezdett elterjedni a vízikerek használata a fűjtatók, illetve a kovácskalapácsok működtetésére, kiváltva ezzel a kézi erővel történő munkavégzést.

A folyóvizek mozgási energiájának felhasználását lehetővé tevő vízikereket az ókori Keleten már a Kr.e. 2. században ismerték. A Római Birodalomban a Kr.e. 1. században már működtek vízimalmok, de az állati erő, illetve rabszolgák igénybe vétele egyszerűbb, olcsóbb volt, ezért csak a 3-4. századtól kezdtek lassú ütemben elterjedni és a 8-9. századra váltak általánossá [2.21]. A víz energiájának közvetítését a vízikerek tengelyén alkalmazott bütykök tették lehetővé, így a forgó mozgás váltakozó irányú mozgássá alakult. A felülcsapó vízikerek feltalálása hatásfoknövelő volt, mivel a víz folyása általi forgatónyomatékot az esési energia megsokszorozta [5.18].

Európában a vízikerek nyugatról terjedt észak, illetve kelet felé, hazánkban körülbelül a 11. században honosodott meg, abban a században, amelynek végén Európában már egy-egy helyi kezdeményezésként próbálkozhattak a vízierő vaskohászati hasznosításával. A fűjtatók meghajtása mellett a vízikerek a vas alakításához használt kalapácsok működtetésére is szolgálhat. A „hol”, „mikor” és „melyik történt hamarabb” kérdésekre többféle kutatás, többféle eredményt szolgáltat. Leginkább az feltételezhető, hogy a vízikerek vaskohászati alkalmazása francia területről, illetve Észak-Spanyolországból kiindulva terjedt el Európában és a 13. század közepére Stájerországban és Karintiában volt az új technika alkalmazásának kiemelt területe [2.21, 2.27, 2.28]

A vízikerek használatának egyik jelentős hatása a középkori vaskohászatra, hogy létrejöttek a bucakemencétől rövid idő alatt függetlenné váló, csak a vas megmunkálásával foglalkozó műhelyek, a hámorok. Stájer források a 13. század közepétől számolnak be a

korábbiaktól két és félszer nagyobb vasbucákról [2.27], amely mind a kohósítást, mind a kovácsolást illetően árulkodó adat. Magyarországon a legrégebbi hámorrról szóló adatot közlő írásos feljegyzés 1344-ből származik, de feltételezhető, hogy a mai Szlovák Érchegeység vidékén az 1320-as évektől megszorodott vastermelési adatok is az új technika bevezetéséhez köthetők [2.21].

A vashámorok kalapácsainak vízikerekes működtetésétől is nagyobb - bár jóval hosszabb idő alatt érvényesülő - hatása volt a vízikerek fűjtatók működtetésére történő alkalmazásának. Nincs egyértelműen eldöntve, hogy a hámorok kalapácsok, vagy a fűjtatók működtetésére használtak-e előbb vízi energiát. Az ezzel foglalkozó kutatók többsége a fűjtatóhoz való alkalmazást gondolják hamarabbra, bár írott források elemzők közül akadnak, akik a hámorok kalapács vízi erővel történő meghajtását a 12-13. században, a fűjtatóét csak a 14. században látják egyértelműnek [2.21, 5.19]. A fűjtatók megnövekedett teljesítményével együtt járt, hogy kétszer-háromszor nagyobb kemencéket kellett építeni a bucaeljáráshoz, ezzel együtt természetesen a vasbucák mérete is megnövekedett. A 13. században főként német, francia, cseh és svéd földön egyre több műhely jött létre a magasabb helyek helyett immár a folyó völgyekben, különösen olyanok, ahol buca kemencék és hámorok is működtek egy helyen [2.27].

A megnövekedett volumenű és intenzitású fűvószerű, legjelentősebb hatása, hogy a megnövekedett - 1500 °C feletti - metallurgiai hőmérséklet hatására immár olvadék formájában is keletkezett vas, amely már oldott annyi korbont, hogy később kovácsolásra, alakításra alkalmatlan lett. Megjelent a nyersvas - illetve az öntött vas - amely kezdetben nem kis bosszúságként, elrontott kohósításként kezelhetők. Az új technikáról azonban nem akartak lemondani, így hosszú átmenettel létrejött az indirekt, kétféle lépésű eljárás, aminek folyamán a primeren gyártott nyersvas korbontartalmát frissítéssel – oxigénhordozó bevitelével – csökkentették, belőle alakítható acélt előállítva, valamint kialakult a vasöntés iparága.

Az indirekt eljárás jellemző berendezése a nagyolvasztó, amelynek európai megjelenése éppúgy a homályba vész, mint az indirekt eljárás kezdete. Egyes vélemények szerint a nagyolvasztó a 14. századtól kezdve lassan fejlődött ki és csak a 16. században beszélhetünk klasszikus nagyolvasztóról [5.18]. Más vélemények szerint a 14. század második felében, Franciaországban már több helyen is megjelent és a szakmunkások vándorlásával lassan terjedt kelet felé, de a 16. századig a Rajnától keletre még nem jutott el [2.21]. Ugyanakkor egyes feltételezések szerint az észak-itáliai források által 1226-tól említett „furnum” nyersvasat állított elő, amit aztán feldolgozásra alkalmas vassá alakítottak át a „fusina”-ban [5.20], illetve Svédországban tártak fel 13. századnak datált nagyolvasztó maradványait [5.21].

Az első nagyolvasztó üzembe helyezésének helye és ideje talán mindig is megállapíthatatlan lesz, mindenesetre Georgius Agricola 1556-ban kiadott átfogó bányászati-kohászati művében a „De Re Metallica”-ban még nem szerepel. Ott még csak a buca kemence (5.11. ábra), illetve az ún. vasolvasztó aknáskemence (5.12. ábra) lett bemutatva.



A - kemence; B - elegyőbű; C - székelyfű; D - szűz; E - fakalapács;
F - vaspöröly; G - állí

(5.11. ábra) Bucakemence és vaspöröly – 16. sz. [4.17]

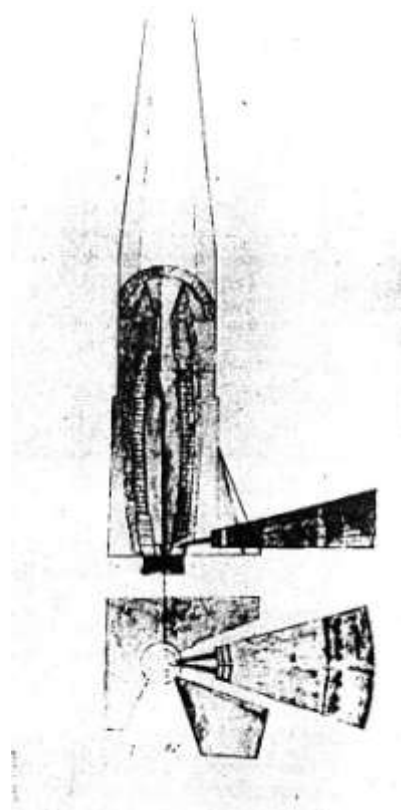


A - kemence; B - lépcső; C - szék; D - szűz

(5.12. ábra) Vasolvastó aknáskemence – 16. sz. [4.17]

A klasszikus indirekt eljárás első lépcsőjét képviselő nagyolvasztó hazai megjelenésének tisztázását is megnehezíti a 16-18. századi szakmai szándékú, de jórészt máshonnan vett, másolt megnevezések kavalkádja. A „massa” szó (a buca latin „massa ferri” nevéből) Magyarországon latin szövegben 1551-ben, magyar szövegben pedig 1592-ben jelent meg Dobsinán és jelentése „valamilyen (nem közönséges) vasolvasztó kemence” [2.21]. A 16-17. századi dobsinai massákban a vas már megolvadt, formákba öntötték, vagy acélhámorokban valamilyen módon acélszerű anyaggá kovácsolták, de frissítésnek nincs nyoma, nem tekinthetők klasszikus nagyolvasztóknak. Az acélhámorok a 16. század második felében tűntek fel a forrásokban és megkülönböztették őket a vashámoroktól (a vashámorokétól jóval alacsonyabb volt az acélhámorok évi cenzusa). A 17. században már rendszerint kardverő hámoroknak nevezik az acélhámorokat [2.21].

A 17. századi olvasztókemencékben gyakran vasbucát és folyékony nyersvasat is előállítottak, mint például 1616-ban a besztercebányai „Hochofen”-ben [2.21]. A kemencék és a termékek – hazánkban ekkor német vagy esetleg latin nyelvű – elnevezése árulkodó, de egyben megtévesztő is lehet. Az, hogy hagyományos vasbucát vagy inkább folyékony nyersvasat előállító kemencéről volt-e szó, általában csak a termelési adatokból lehet következtetni, amennyiben maradt fenn ilyesmi. Technikai import-próbálkozás volt a Zrínyiek csabari vasműve a 17. sz. közepén (5.11. ábra), amelyben az akkor Magyarországon használatos technikától való különbözőséget fennmaradt latin forrás is jelzi. Csabaron nyersvasat és vasbucát feldolgozó hámorok, illetve azokon kívül ún. szöghámorok is voltak, krajnai német mintára. Az első hazai „valódi” nagyolvasztónak a libetbányai kamarai nagyolvasztó tekinthető, amely 1692-1696 között működött. Mellette frisstűzi üzemet és hámort is létesítettek, tehát teljes vertikumú vasmű volt [2.21].



(5.13. ábra) Kohó alaprajza és metszete a Zrínyiek csabari vasművéből (1657?)

5.2. A bucakemencék típusai

A vasérc olvasztására, redukálására évszázadokon át használt bucakemencék – kezdetben tkp. bucatűzhelyek – tipologizálása több szempontból sem könnyű feladat. A korai időket tekintve szinte kizárólag a régészeti felmérés feltárt maradványokra lehet támaszkodni az egyes kemenceszerkezeteket illetően. Gyakran kérdéses, hogy az adott régióban általánosan használt, vagy valamiféle „egyedi” konstrukcióról van-e szó. Ugyanakkor számos esetben csak indirekt nyomok utalnak a kemence eredeti szerkezetére, működési mechanizmusára (pl. salakok helyzete, jellege).

A bucakemencék tipologizálása a következő paraméterek alapján történhet:

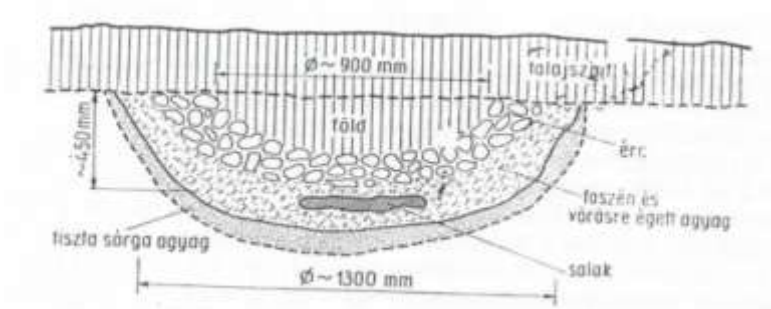
- a kemence alapvető formája, szerkezete,
- beépítettségének jellege, foka, környezetének jellege (pl. műhelygödör),
- falzatának anyaga (általában agyag, homokkal soványított agyag, esetleg kő, későbbiekben előre kiégetett téglák),
- a fűjtetés csatlakozásának, működésének jellege,
- kiegészítő elemek (pl. mellfal, fűvókák) megléte, formája, anyaga, rendeltetése,
- az adagolás és a salakelvezetés sajátosságai.

Az egyes jellemzők különbözősége nem jelent automatikusan más és más kemencetípust, esetenként azok kombinációja is előfordulhat. Általában irányadó a kemence alapvető szerkezeti felépítése, formája és a metallurgiáját leginkább meghatározó tényezők. Többféle csoportosítás is létezik, de általában azonos alapelv szerint. Az alábbiakban az iparrégészeti leginkább elfogadott tipologizálást mutatom be, alapul véve – kisebb szerkezeti és besorolási változtatással - R. Pleiner prezentálását [2.27]:

A. Olvasztótűzhelyek

A vasérc kohósításának legkorábbi és legegyszerűbb eljárása lapos, vagy enyhén gömbszelet alakban mélyített, esetleg sekély gödör mélységű, általában agyaggal kitapasztott – esetleg kővel kirakott - nyitott tűzhelyekben történt. A tűzhely átmérője igen változatos lehet, 30-180 cm között. A mélyedésbe keverten, vagy rétegesen helyezték a faszenet és a kis méretre tört ércet. Az adag tetejére faszénréteg, esetleg föld került. A kemence hatékonyságát igen nehéz megállapítani, fűjtetésnek rendszerint nem volt nyoma. A gödör alján összegyűlő salak vastartalma elkerülhetetlenül nagy vasvesztést jelentett.

Az 5.14. ábrán bemutatott, korai britanniai olvasztótűzhely-maradvány mintájára elkészített „kohóban” végzett rekonstrukciós kísérletek tanulsága – eredménytelensége – azt mutatta, hogy valamelyest jobb eredmény érhető el, ha réteges adagolás helyett a kohósítást szánt ércmennyiséget, a redukcióhoz elegendő faszénnel összekeverve, az olvasztás előtt már mind elhelyezik a gödörben [5.22].

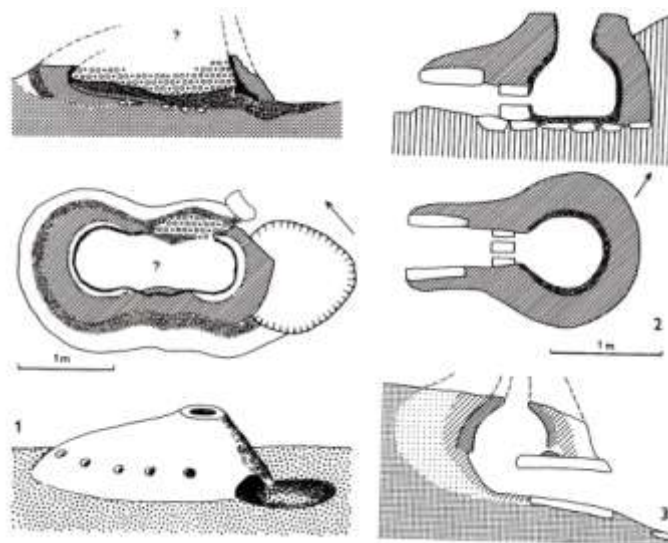


(5.14. ábra) Korai olvasztótűzhely maradványának metszete (Great Casterton – Nagy Britannia) [2.2]

A korai idők iparrégészetében gyakran nem könnyű egyértelműen eldönteni, hogy eredetileg is csak sekély olvasztótűzhely, vagy esetleg magasabb, aknás kemence megmaradt legalsó szintje került-e napvilágra. Az olvasztótűzhelyek használata egyébként nem tűnt el teljesen, a 18-19. században Katalóniában és Skandináviában is használták helyenként ezt a konstrukciót.

B. Kupolás bucakemencék

Szintén igen korai, de nem igazán elterjedt kemencetípus. Alapvető jellegzetessége, hogy a fazekaskemencékhez hasonló, és alapátmérőjéhez képest relatíve alacsony agyagkupola fedi be a tűztér - illetve a redukáló atmoszféra - döntő részét. A jellemzően kelta vaskohászattal kapcsolatba hozott (korai La Tène periódus) kupolás bucakemencék alapja ovális, vagy kör alakú volt, 70-80-cm-es, esetenként akár 120-160 cm-es átmérővel, néha kővel kirakott kemencealappal. Találtak 30 cm falvastagságú falmaradványt is a kupola alapjánál. A nagy alapterületű, többé-kevésbé zárt konstrukció nem feltétlenül jelentett előnyt a kemence hőviszonyai és a redukáló gázok áramlása szempontjából. Az 5.15. ábra a kupolás bucakemence néhány jellemző példáját mutatja be.

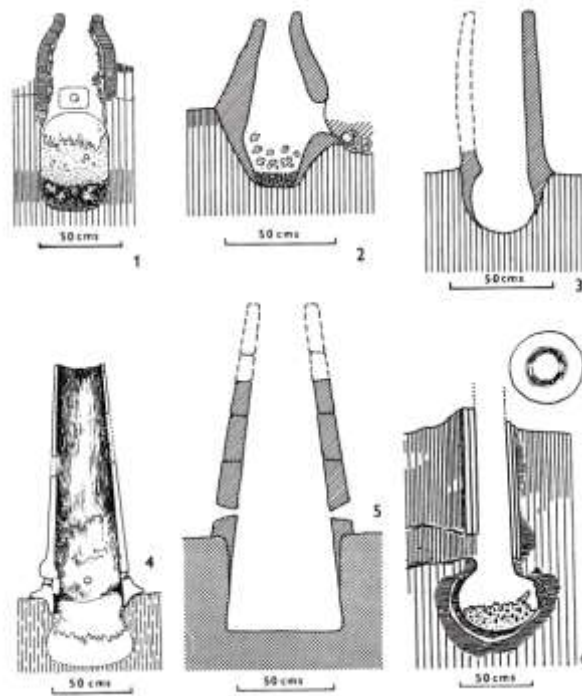


(5.15. ábra) Németországi kupolás bucakemencék rajzai – La Tène időszak (1 – Kelheim, 2 – Engsbach, 3 – Minnerbach) [2.27]

C. Aknás bucakemencék

Az olvasztótűzhelyek kis termelékenységére serkentette a korabeli kohászokat, hogy egy olvasztással nagyobb mennyiségű ércet befogadó konstrukciót fejlesszenek ki. Mindemellett hosszú időn át tartó megfigyeléseik alapján - amelyben közre játszhattak más, tüzeléssel, hevítéssel kapcsolatos szakmák tapasztalatai, ugyanúgy, mint átmeneti jellegű megoldások (részben ilyennek lehet nevezni a kupolás bucakemencét is) kísérletezések tanulságai - kialakult a bucakemencék hosszú évszázadokon át általánosnak mondható, alapvető jellegzetessége, az aknás kemencetípus. Rájöttek, hogy az érc megolvadásához, egyúttal „vassá való átalakulásához” elegendő idő és megfelelő konstrukciójú hely szükséges. A mai metallurgiai és fizikai-kémiai ismeretek tudatában már könnyen belátható, hogy energetikailag, illetve a redukció-hatásfok szempontjából is a legelőnyösebb szerkezet az aknás kialakítás, amelyben az adag - a mai nagyolvasztóhoz hasonlóan - fentről lefelé áramol. (A kémiai metallurgiai folyamatok részleteiről az 5.4. fejezetben.)

Az aknás bucakemencék szerkezetében fontos sajátosság, hogy ki van-e alakítva külön hely a kemencén belül a megolvadt salak elszeparálódásához. Megfigyelték ugyanis, hogy az eljárás hatékonyabb, a kohó menete zavartalanabb lesz, ha a megolvadt salak zöme fizikailag elválasztható a bucatól. A már többféle minőségű vasérc kohósítására alkalmas salagödrös bucakemencéknek többféle formája és mérete alakult ki. Az 5.16. ábra salagödrös kemencék néhány korai jellegzetes példáját mutatja be. Létezett részben, vagy teljes hosszában műhelygödör oldalába épített típus (6), amelyeknél a kemence vízszintes keresztmetszetének beépítettsége is változhat a szinte teljes beépítéstől a keresztmetszet mintegy feléig kidomborodó mellső falazatig. A salagödrös aknás bucakemencék másik fajtája a szabadon álló kemence, amelynek felmenő fala legtöbbször agyagból, esetleg előre formázott téglákból (5) épült.



(5.16. ábra) Salagödrös bucakemencék (1 - Csehország, késő La Tène; 2 - Németország, korai római-barbár időszak; 3 - Csehország, római-barbár kor; 4 - Németország, Kr.u. 2. sz.; 5 - Lengyelország, római-barbár időszak; 6 - Lengyelország, Kr.u. 2-3. sz. [2.27])

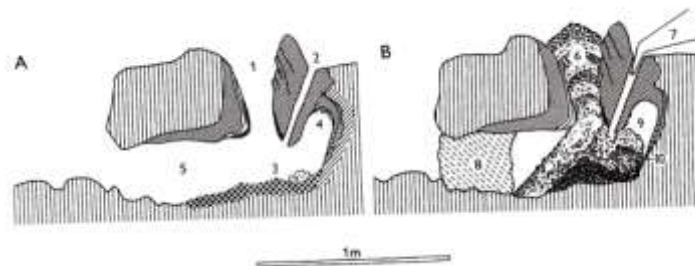
Az aknás kemencék másik csoportjánál az olvasztás alatt keletkező salak jelentős része kifolyik a kemencéből (Pleiner tkp. ezeket nevezi aknás kemencéknek). Bár technikailag nehezebb kezelni az olvasztást, az eltávozó salak több szempontból előnyös lehet:

- a salakkal eltávozott anyag véletlenül sem szennyezi a bucát,
- állaga fontos információt jelenthetett a korabeli kohásznak,
- biztonságosabbá válhatott a kohó üzeme (nem tömte el a fűvókákat),
- javulhatott a vaskihozatal,
- könnyebb az olvasztás után „kitakarítani” a kohót, kisebb annak sérülésveszélye.

Az aknás kemencék szintén épülhettek szabadon álló – vékony és vastag felmenő falas - illetve beépített formában. A témával foglalkozó iparrégészek és archeometallurgusok körében az aknás bucakemencék tipologizálásakor a beépítettség megléte és foka gyakran legalább annyira meghatározó tényező, mint a keletkező salak elszeparálódásának módja. Az előző befolyása inkább hőtechnikailag és kemenceszerkezeti utóbbi metallurgiailag fontos. A korai és középkori aknás bucakemencék kialakításaik arányában, falvastagságukban, egyes technikai részleteiben – alkalmaztak-e kibontható mellfalat, milyen irányú a fűjtetés, milyen a fűvóka formája és elhelyezése – időben és földrajzilag igen nagy változatosságot mutatnak. Mindazonáltal alapvető szerkezetük, a rendszerint kör, vagy enyhén ovális keresztmetszetű, felfelé szűkülő akna, illetve a csonkakúp alakú falazat általánosnak mondható. Méret szempontjából is szerte Európában jellemző adatnak tekinthető az 50-80 cm-es legnagyobb medenceátmérő, illetve a 70-100 cm-es kemencemagasság tetején a 20-30 cm-es torokátmérő. Természetesen mindig előbukkanhatnak egymáshoz képest lényegesen zömökebbnek, illetve nyúlánkábbnak rekonstruálható bucakemencék maradványai. A Kárpát-medencében talált aknás kemencék részletes bemutatását a következő alfejezet tartalmazza.

D. Földalatti bucakemence

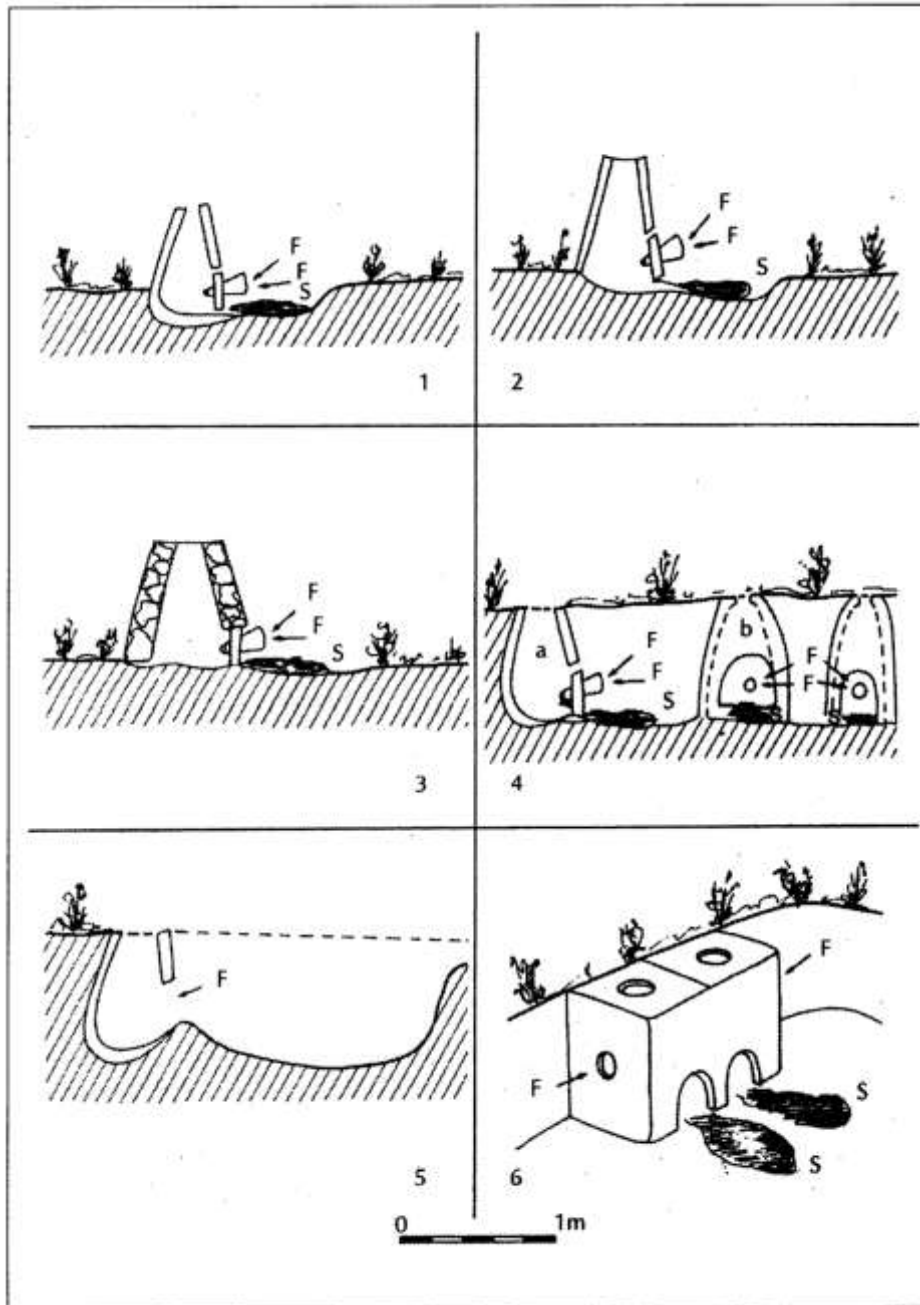
Az előzőektől merőben különböző konstrukciójú bucakemencék korai példányaira Szibériában, néhány középkori változatra pedig Közép-Európában bukkantak. A kemence alapvető jellegzetessége, hogy teljes méretében a föld felszíne alatt volt kialakítva. ez kiváló hőszigetelést, mechanikai stabilitást, így hosszabb használhatóságot biztosított. Az egyes olvasztások után, szükség szerint relatíve könnyű volt újraformázni a belső tér falazatát. Viszont éppen kialakításának bonyolultsága volt a legfőbb gátja a kemencefajta termelékenységének, ezért aztán technológiai zsákutcának bizonyult (5.17. ábra).



(5.17. ábra) Földalatti bucakemence – Želehovice, Csehország, kb. Kr.u.800 (megtalált (A) és rekonstruált (B) állapot; 1 – torok és akna; 2 – fűvóka; 3 – medence salakkal és faszénnel, 4 – újrahevítő kamra; 5 – alagút formájú munkanyílás; 6 – érc és faszén adagolás; 7 – fűjtató; 8 – zárókő; 9 – vasbuca a fűvóka közelében [2.27])

5.2.1 Kora középkori bucakemencék a Kárpát-medencében

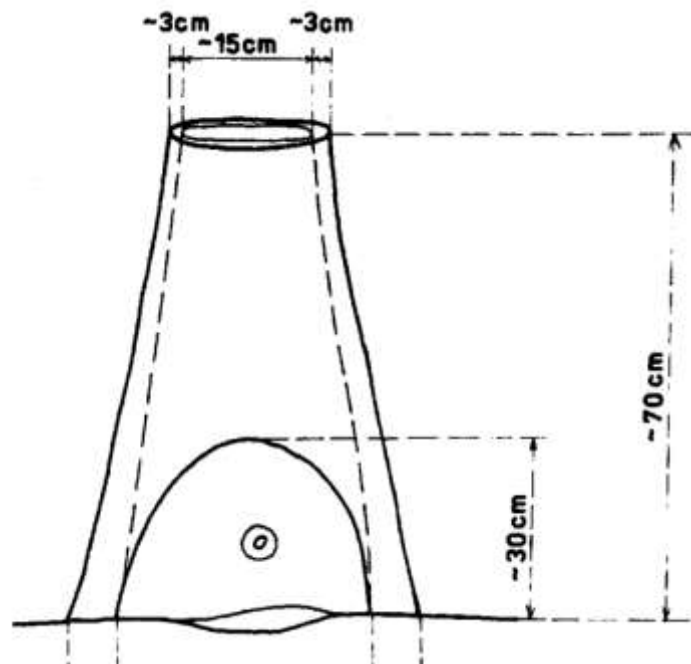
A Kárpát-medence korai vaskohászatának iparrégészeti kutatásai, illetve az ahhoz kapcsolódó archeometallurgiai, archeometriai vizsgálatok a 7-13. század időszakához kapcsolódóan több kemencetípust, illetve azok szerkezeti és működési jellegzetességét definiálták. A kemencék sorra beillenek az európai korabeli aknás bucakemencék közé, reprezentálva azok szinte valamennyi jellegzetességét. Az avar kori, honfoglalás kori és Árpád-kori kárpát-medencei bucakemence típusokat az 5.18. ábra foglalja össze.



(5.18. ábra) Korai középkori kárpát-medencei bucakemence típusok (1 – avar, 7-9. sz. 2 – nemeskéri, 8-9. sz. 3 – harkai variáns, 8-10. sz. 4 – fajszi, 10. sz. 5 – imolai, 10-12. sz. 6 – vasvári, 11-12. sz. F – fújtatás iránya, S - salak) [2.22]

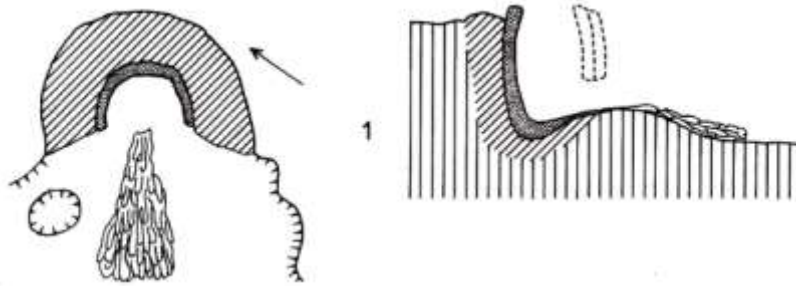
A 7-9. században használt, ún. „avar” és „nemeskéri” típusú bucakemencék részben földbe mélyített, vagy éppen szabadon álló kohók voltak és a többi korai középkori kemencéhez hasonlóan agyagból készültek. Mindkét típus belső salakgödör nélküli aknás bucakemence.

Az avar és nemeskéri típusú kemencék alakját leginkább egy nagyjából kör keresztmetszetű, felfelé keskenyedő, csonkakúp alakú palásttal lehet leírni. A palást magassága 70-80 cm, az alsó, legszélesebb átmérője 30-40 cm, felső, legkeskenyebb átmérője 10-15 cm volt. A kemencék tapasztott agyagból készültek. A falvastagság lentől felfelé keskenyedve 6 cm és 3 cm között változott. Jellemzője mindkét típusnak a kemence mellső részén, alul található, 30-40 cm széles és ugyanilyen magas mellnyílás, amelyet olvasztáskor oda illő, a falvastagságtól néhány cm-rel vékonyabb, szintén agyagból készült mellfallal zártak el. A mellfal közepébe 5-8 cm átmérőjű lyukat alakítottak ki, amelybe 10-12 cm hosszú agyag fúvócsövet helyeztek, amelyből 3-5 cm-es rész lógott be a kohótérbe és enyhén ferdén lefelé beépítve funkcionált. A fúvócső kemencéből kifelé álló, kiszélesített, tölcséres végéhez illesztették a kézzel vagy lábbal működtetett fújtatókat [2.20, 5.11] A nemeskéri típusú, szabadon álló kemence méretezett metszetét az 5.19. ábra mutatja.



(5.19. ábra) A nemeskéri típusú kohó szerkezete és jellemző méretei [2.20]

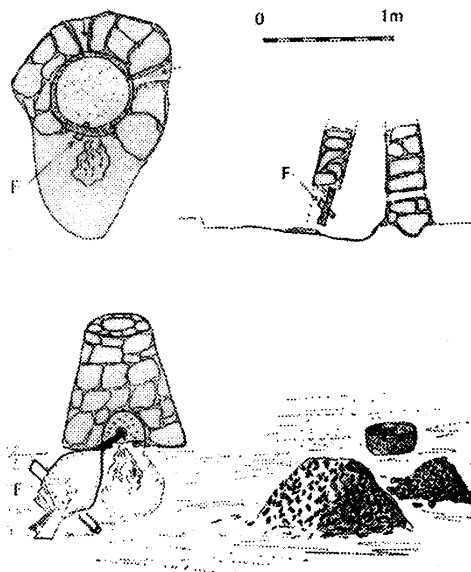
Az avar és a nemeskéri típus közötti formai különbség abban nyilvánul meg, hogy az előző típus nem teljesen szabadon álló, általában agyaggal kitapasztott medencerészüket 30-40 cm mélyen a földbe mélyesztették. Az utóbbi régészeti kutatások alapján – főként Zamárdi kiterjedt kohótelepe kapcsán [5.7] – felvetődött az is, hogy az avar típus beépítettsége lényegesen nagyobb volt, vagy legalább is ebben a típusban is használtak beépített kemencét, illetve átmeneti jellegű kialakítások is megjelenhettek. Pleiner egy tarjánpusztai 7. századi kohót beépített bucakemencék közé sorolt [2.27] (5.20. ábra), míg a lelőhelyen egymás közelségében a földbe különböző mértékig bemélyített kohókat találtak [2.22].



(5.20. ábra) Avar bucakemence metszetei – Tarjánpuszta-Vasasföld 7. sz. [5.24]

Az avar típusú kemencék gyakrabban köthetők lakótelepülésekhez és az ércpörkölő gödrök jelenléte is inkább jellemző erre a típusra. A nemeskéri típusú kemencék teljesen a talajszinten álltak, feltehetően rendszertelenül (lásd 5.8. ábra), a kemence alját általában nem tapasztották ki agyaggal. Lakótelepülésekhez kevésbé köthetőek, viszont faszénégető boksák és kovácsolás nyomai gyakorta felbukkantak mellettük, tehát kiterjedt munkafolyamat működhetett a kemencék körül [2.22]. Mindkét kemencefajtára jellemző viszont, hogy a kemence előtti sekély mélyedésben mindig található kifolyt salak (lásd 5.19. ábra), amely a mellfalazat alja és a talaj közötti résen át távozott a kemencéből [5.23].

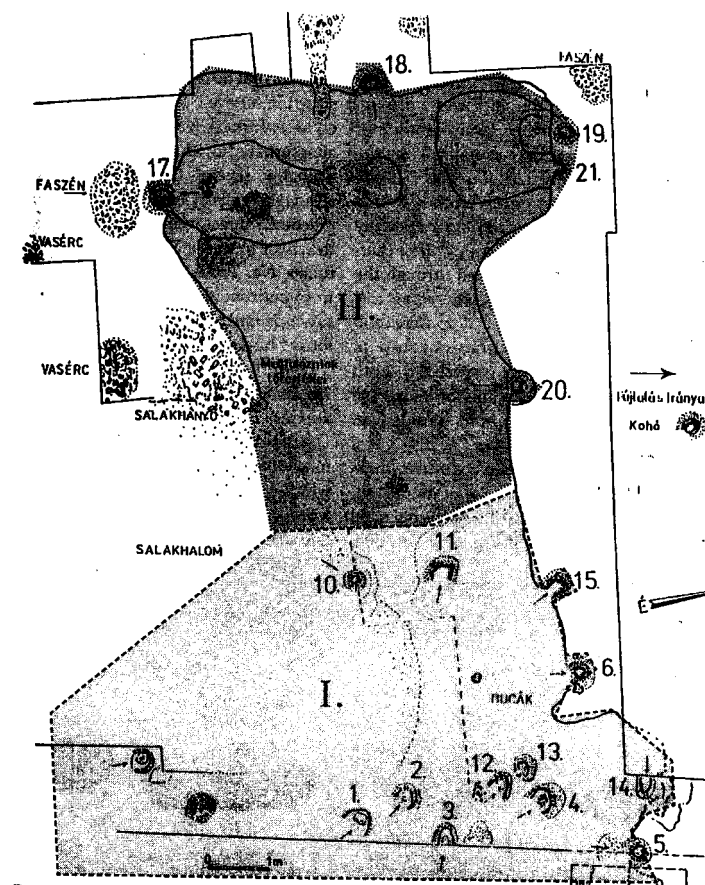
A kora középkori kárpát-medencei bucakemencék agyagból való építése alóli egyedüli kivételként a kőből készült, ún. „harkai” típusú kemencéket lehet említeni [5.23, 5.25]. A harkai kemencék méretarányaikat, működésüket tekintve nem különböznek a többi nemeskéri típusú kemencétől – medenceátmérőjük kissé szélesebb, így némileg nagyobb bucákat lehetett benne előállítani -, a kövek itt is agyagtapasztással voltak egybeépítve, illetve a kemence belső felülete agyagréteggel volt bevonva. Mégis külön variánsként kell kezelni, mivel kapcsolódnak a római kortól a középkor végéig használt noricum-i kőfalú aknakemencék sorához is [2.22.] A kő az agyagnál stabilabb felépítést biztosított, több olvasztást is kibírt a kemence. A harkai kemencét az 5.21. ábra mutatja be.



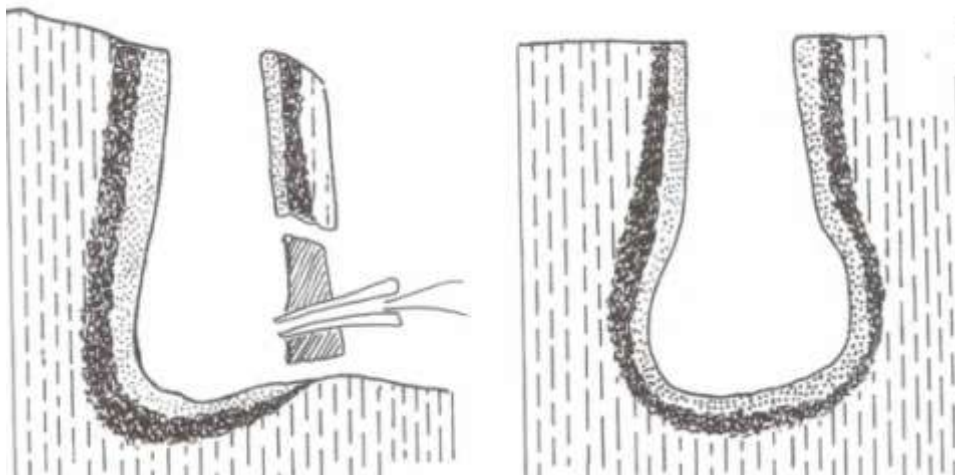
(5.21. ábra) Kőből készült, szabadon álló bucakemence – Harka-Kányaszurdok, 8-10. sz. [2.22]

A 10-11. században használt kárpát-medencei bucakemencék már egyértelműen földbemélyített műhelygödörök falába voltak kiépítve. A beépített kemencék hőszigetelése jobb, élettartama hosszabb, mint a szabadon álló kemencéké, bár kialakításuk – a rekonstrukciós kísérletek tanulsága szerint – nem minden részletében könnyebb. Ugyanakkor több mint valószínű, hogy a kalandozások korában az olvasztásokat általában ősszel, illetve tél elején végezték, így a mélyebb műhelygödörökben időjárástól védettebb helyen dolgozhattak a korabeli kohászok. Hosszabb távon érvényesülő éghajlati változás is közrejátszhatott a műhelygödörök kialakításában, ugyanis a későavar időszak igencsak száraz éghajlatát a 10. századtól csapadékosabb időjárás váltotta fel, fagyos telekkel tarkítva, amely a lakóházak építésmódjára is kihatott [2.22, 5.26].

A Somogyfajszon, 1995-ben folytatott ásatáson 16 méter átmérőjű helyen két – egymást részben fedő - műhelygödörben és 21 bucakemence maradványait tárták fel [5.27] (5.22. ábra). A kemencék a Sopron melletti Potzmann-dűlőben és a Somogyvamoson feltárt kohókkal azonos jellegűek, bár a műhelyek szerkezete lelőhelyenként kissé eltérő [2.22]. A jellegzetesen 10. századi, ún. „fajszói” típusú kemencék aknájának, medencéjének mérete, arányai, formája az avar és nemeskéri típusokhoz nagyon hasonló, de egyértelműen műhelygödör oldalába - esetleg 1-2 cm-es torokrésztől eltekintve - teljes hosszában beépített bucakemencéről van szó (5.23. ábra). Technológiai hasonlóság mutatkozik az ugyanolyan jellegű és szerepű mellfal és fúvókák használatában is. A salak ennél a kemencetípusnál is kifolyt a kemencéből, a salakcsapoló nyíláson át a mellfal előtti salakgyűjtő gödörbe.



(5.22. ábra) A somogyfajszói lelőhely műhelyeinek alaprajza [5.28]

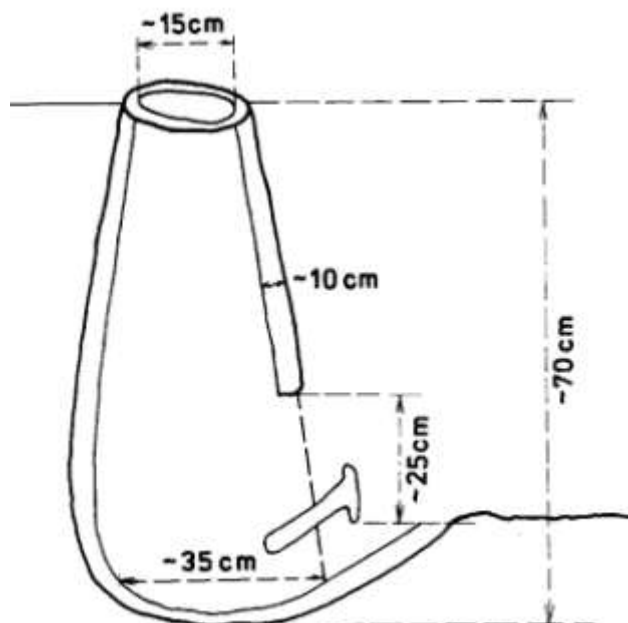


(5.23. ábra) A somogyfajszai bucakemence metszetei [2.27, 5.27]

Az eddig tárgyalt kemencetípusokkal ellentétben az ún. „*imolai*” típusú bucakemence maradványait mind a borsodi, mind a nyugat-magyarországi – és hozzá tartozó balaton-felvidéki – vastermelő vidéken megtalálták. Szlovák régészek is gyakran ezen a néven definiálják az ott talált, hasonló típusú kemencéket. Elmondható, hogy imolai típusú bucakemence az államalapítás és az Árpád-kori Magyar Királyság első két századának jellemző kemencetípusa.

Az imolai típusú bucakemencéket 80-90 cm mély, ovális, vagy szabálytalan téglalap alakú, változó nagyságú, 5-10 m²-es, néha ennél is nagyobb alapterületű műhelygödör rövidebb oldalába építették, műhelyként egyet, ritkábban kettőt. A műhelyekben rendszerint külön kimélyített gödrök is találhatóak, amelyek munkavégzésnél ülögödrökként vagy anyagtárolásra szolgálhattak. További 20-40 cm-es átmérőjű kiégett foltok utalhatnak a kemencéből kivett buca továbbbizzítására vagy a kemencéből kikapart, még meleg salak ideiglenes tárolásának helyére. A salakot ugyanis rendszerint ki kellett kaparni az olvasztás végén, ennél a típusra nem jellemző a kemencéből kifolyt salak. Az olvasztás folyamán az érc megolvadt salakalkotói heterogén, folyékony, de nagy viszkozitású, aránylag gyorsan megdermedő salakként az aknaszerű belső tér jól kimélyített medencéjének aljába gyűltek össze. A 25-30 cm széles, nagyjából ilyen magas, boltíves mellnyílás alatti padkaszerű kiképzés miatt a salak nem tudott kifolyni [5.23, 2.22].

A kemencék eredeti belső magassága, 70-80 cm, a medence legnagyobb átmérője 35-45 cm, a legkisebb felső átmérő 15 cm körüli, esetleg még kisebb volt. Ez utóbbi tulajdonképpen a torokátmérő. A kemencefal mintegy 3 cm vastag agyagból készült és a műhelygödör oldalához épített rész is ki volt tapasztva. Az imolai ásatáson a műhelyfalban ezt követően kb. 20 cm-es vastagságban szürkére, majd ugyanilyen vastagon vörösre égett réteg következett. Előfordult olyan eset is, amikor a kemence alján a megolvadt salak közvetlenül a földdel érintkezett. Az imolai típusú kohó méretezett metszete az 5.24. ábrán látható.

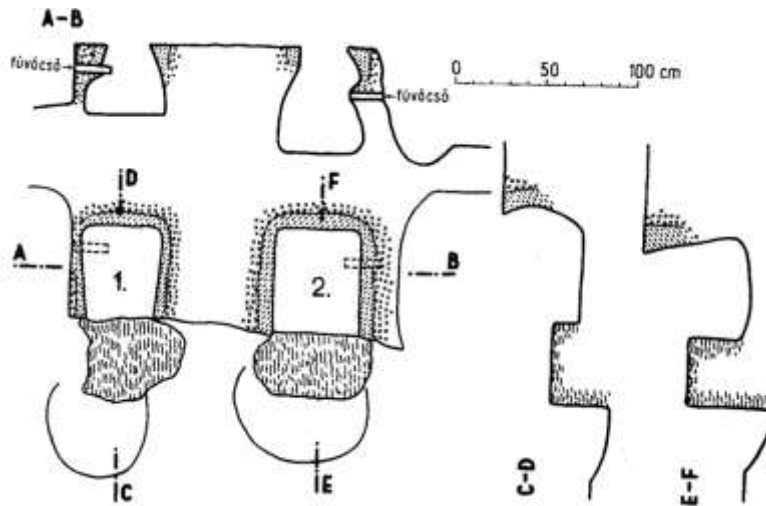


(5.24. ábra) Az imolai típusú bucakemence metszete és jellemző méretei [2.20]

Az imolai típusú kemencék ásatásainak szintén fontos jellemzője, hogy nem találtak mellfal-maradványokat. Fűvócsöveket igen, de nem mindig olyan nagy számban, mint a nemeskéri típus esetében. Feltételezések szerint az imolai típusú kemencében az olvasztás nyitott mellfallal történt, lehet, hogy nagyobb vasércrögökkel zárták el a mellfalat és ebbe illesztették bele az agyagfűvókát, amihez a fűjtató csatlakozott [2.2, 2.22]. Erre utal a műhelygödörökben és a szétrombolt kemencék feltöltésében talált, esetenként több kupacnyi félig pörkölt ércdarab.

Az ún. „vasvári” típusú, 11-12. században használt bucakemence maradványait csak a nyugati határrészen találták meg néhány helyen (lásd az 5.10. ábra térképén). A nyugati szláv eredet mellett esetleg germán hatás is feltételezhető, de az előbbi valószínűbb a helynevek eredete miatt [2.22].

A vasvári típusú kemencék általában durván kivitelezettek, a kemenceaknák rendszerint párosával helyezkednek el, előttük közös, gátszerű fal húzódik. A kemencék jellegzetessége, hogy nincs olyan mellnyílása, mint az imolai típusnak, viszont az elülső salakkifolyó nyíláson a salak kifolyt a kemencéből. A kemencefalat az olvasztás után minden bizonnyal kibontották. A kemencéket gödörműhely oldalához építették, de csak a kemencék háta érintkezett a műhelyfallal. Volt rá példa, hogy 14 cm vastag kiegészített agyagréteg volt a kemence háta. A fűjtatás itt oldalról történt, 10-20 cm hosszú, 20-25 cm-es magasságban beépített, tölcéses agyagfűvócsövön keresztül. Talán a beépítés miatt, a vasvári típusnál általában kevesebb fűvócsövet találtak, mint a nemeskéri és imolai típusoknál. A kemenceakna legnagyobb belső átmérője 35-40 cm. A medence általában lekerekített téglalap vagy hátrafelé szélesedő trapéz alakú volt. A vasvári típusú kohók fala a medence aljától 40-65 cm körüli magasságban állt, de az ólmodi ásatáson kupolás boltozat maradványai is előkerültek [2.22]. Az 5.25. ábrán a vasvári ásatásról származó kemencepár maradványainak metszetei láthatók.



(5.25. ábra) A vasvári ásatás 1. és 2. sz. bucakemencéi maradványainak metszetei [2.2]

A fejezet végén szót kell ejteni a Kárpát-medencében a késő középkorban, illetve az újkorban használt bucakemencékről is. A 16. század közepéig-végéig a magyarországi kohók kivétel nélkül bucakemencék voltak, de a direkt eljárás technikája még a 18. század első felében is markánsan létezett. Az újkori bucakemencék munkatere általában csonkakúp alakú, alaprajzuk négyszögletes vagy elliptikus volt. Magasságuk 220-380 cm, szélességük az alapnál 65-75 cm, a toroknál 30 cm körüli. A későbbi faszenes nagyolvasztókhoz képest relatíve kisméretű, kistermelésű kemencék voltak napi termelésük a 18. században 2-6 bécsi mázsa (1 bécsi mázsa = 56 kg). Vaskihozataluk 40-50% vastartalmú ércekből 15-30%-os, amely alig valamivel jobb, mint középkori elődei esetében. Tüzelőanyag-fogyasztásuk a kinyert vas arányában 400-800%, amely pl. a korabeli stájer bucakemencékének 2-4 szerese [2.21]. Ezeknek az egykori felszíni építményeknek nyilván kevesebb régészeti vonatkozásuk van, róluk inkább korabeli rajzokról, metszetekről, esetleg műszaki-termelési jellegű feljegyzésekből lehet képet alkotni.

5.3. A korabeli vaskohászat jellemző régészeti objektumai leletei és azok műszaki vizsgálatai

Bár az őskori, ókori és középkori vaskohászat metallurgiai szempontból és alaptechnikát tekintve egységesnek tekinthető - az alakítási technikák is jól meghatározhatók – régészeti szempontból azonos jellegű, rendeltetésű leletek esetén is gyakran jelentős heterogenitás tapasztalható. Ez főként földrajzi, de néha etnikai alapon is jelentkezik és különösen jellemző a felhasznált ércek és ebből eredően a salakleletek, illetve a kemencekonstrukciók kialakítása terén. Szigorúan vett, részletekbe ágyazott, a mai modern iparnál megszokott „szabványosított” logika szerint nem is beszélhetünk általános érvényű, európai szintű bucaeljárásról, hiszen ahány nép, ahány tájegység, annyi szokás tapasztalható a földből előkerült emlékek által. A nemzetközi archeometallurgiai, illetve archeometriai kutatások, konferenciák, szimpóziumok alkalmával azonban mégis rendre egy relatíve egységes, empirikus szakmai tudásra épülő európai vaskultúra tükröződik, sokféle helyi sajátossággal. A fejezet a példaként felhozott leleteket tekintve a vaskohászat hazai régészeti vonatkozásaira fókuszál.

5.3.1. Érccek

A vaskohászattal kapcsolatos iparrégészeti feltárások leletei között a vasérccek morfológiai, fizikai, kémiai és ásványtani szempontból igencsak változatos képet szolgáltatnak világszerte. Ma már széles körben elfogadott, hogy az első alapanyag, amiből – véletlenszerűen – fémes vasat redukáltak valószínűleg a korabeli rézkohászatban alapanyagként felhasznált kalkopirit (CuFeS_2) vagy folyósító anyagként adagolt, megfelelően nagy vastartalmú kőzet volt.

A lelőhelyeken talált ércdarabok a legbiztosabb helyi kohósításra, metallurgiára utaló leletek. Mindazonáltal néha kétséges, hogy elszóródott hasznos nyersanyagról, avagy a korabeli kohások hosszú idő alatt kialakult empirikus szakmai ismereteik alapján - minden bizonnyal szín és konzisztencia alapján - kohósításra alkalmatlannak tartott, szándékosan félredobott darabról van-e szó. Gyakran találni apróra zúzott, előpörkölt ércdarabokat is (a technológiai folyamatokról a következő alfejezetben). Az érccek vizsgálatakor a kémiai és ásványtani összetétel áll a fókuszban, amelyet az ARGUM kutatócsoport rendszerint induktív csatolású plazma (ICP), illetve röntgen-pordiffraktometria (XRD) segítségével vizsgál.

Számos hazai középkori lelőhelyről származó ércminta vizsgálatából alapvetően megállapítható volt, hogy a korabeli bucakemencékben kohósított érccek a manapság használatos vasérccekhez képest kisebb vastartalmúak, gyakran porózus, réteges szerkezetűek. Jellemző ásványi alkotójuk a hematit (vörösvasérc – Fe_2O_3), goethit (FeOOH), illetve a limonit (barnavasérc - $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) - amely tulajdonképpen goethitet, hematitot, ferrihidritet, lepidokrokitot különböző arányban tartalmazó ásványcsoport összefoglaló neve – illetve több-kevesebb kvarc (SiO_2). A bucakemencék jellemző kohósított nyersanyagát gyakran limonitos ércceknek aposztrofálják és lelőhelyük alapján gypervasércnek, lépércnek, tőércnek nevezik. A rendszerint nedves környezetben fellelhető ércrétegek, érclencsék létrejöttében fontos szerepet játszanak biokémiai folyamatok is, a *Thiobacillus ferroxidans* elnevezésű vashbaktériumok. Az 5.26. ábrán somogyfajszi rekonstruált bucakemencés kohósításra (lásd később a videókat) felhasznált, vízmosás oldalából kifordított limonitos vasérc-tömb fotója látható.



(5.26. ábra) Limonitos gypervasérc-tömb (saját fotó)

A kohósításra alkalmas állapotról árulkodhat az ércelet színe (a világosabb sárgás-barnás helyett előpörkölés okozta sötétebb barnászörös szín), mérete (a rekonstrukciós kísérletek alapján 1-2 cm-es szemcsenagyságban hatékony az olvasztás), illetve porózusabb szerkezete. Az 5.27. ábrán avar kori vaskohászati telepről származó vasércdarabok láthatók, az 5.1. táblázat pedig avar kori lelőhelyeken talált néhány ércminta kémiai összetételét mutatja, amelyet a technológia, illetve a metallurgiai folyamatok könnyebb követhetősége miatt célszerű oxidos formára átszámítani.



(5.27. ábra) Avar kori vasérc leletek – Zamárdi, 7-9. sz. (saját fotó)

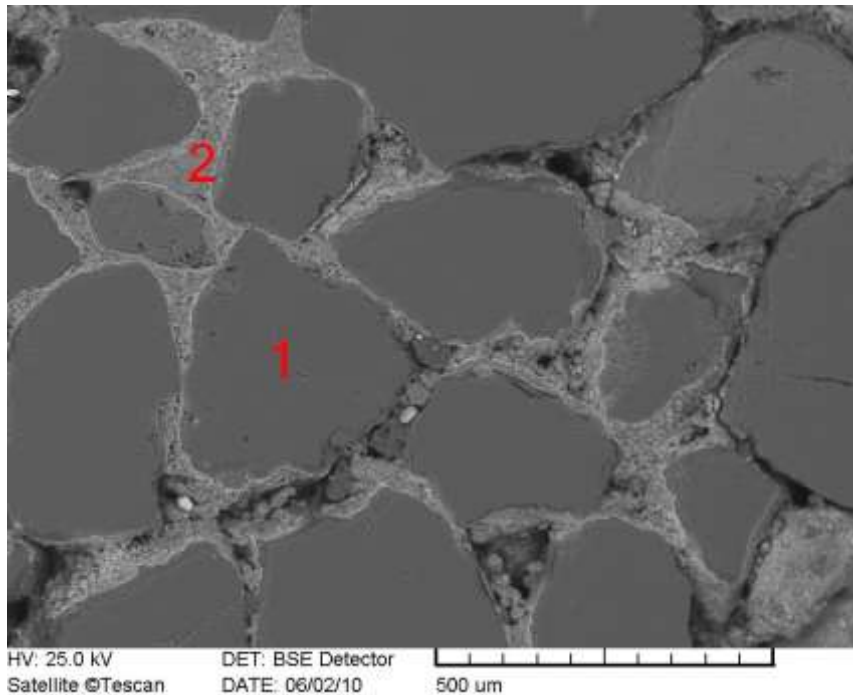
No.	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	H ₂ O
Z56/I	5,60	1,03	87,03	1,16	0,29	0,92	0,67	0,05	0,093	0,059	0,011	0,010	3,01
Z58B/I	4,05	2,05	57,78	1,05	27,02	1,22	1,79	0,08	0,097	0,313	0,124	0,005	2,18
Z58B/II	10,80	0,26	35,98	1,91	48,16	0,84	0,30	0,24	0,091	0,002	0,125	0,004	1,18
Z58B/III	5,51	0,01	74,76	0,66	8,48	1,21	5,50	0,07	0,095	0,024	0,033	0,012	3,61
Z89/I	5,03	0,51	84,43	1,02	0,39	0,87	5,37	0,04	0,112	0,042	0,028	0,010	1,95
Z89/II	6,30	0,51	81,15	0,80	0,85	0,87	6,06	0,05	0,068	0,033	0,019	0,005	2,86
Z89/III	33,21	0,51	52,17	1,03	3,15	0,41	7,31	0,09	0,060	0,040	0,012	0,020	0,25
K19/I	9,82	0,51	79,51	2,96	0,18	0,89	2,67	0,06	0,505	0,060	0,013	0,010	2,83
K19/II	7,80	3,08	80,63	1,14	0,26	0,81	3,51	0,04	0,119	0,032	0,012	0,012	2,51

(5.1. táblázat) Zamárdi (Z) és Kaposvár (K) avar kori lelőhelyein talált vasérc darabok kémiai összetétele (wt%) (saját vizsgálatok)

A táblázatból is látható, hogy az ércek összetétele igencsak változatos, bázikusságuk (CaO/SiO₂) többnyire alacsony, de vannak kiugróan magas CaO-tartalmú minták is. Lényeges az ércek foszfortartalma, amely meszes adalék nélkül alapjában befolyásolhatja a buca minőségét, kovácsolhatóságát. Alapvető még, hogy az érc számottevő kenet ne tartalmazzon, mivel a korabeli bucaeljárásban nem lett volna mód kéntelenítésre. A táblázatban látható H₂O-értékek nem az érc eredeti hidrátvíz-tartalmát jelzik, annak fizikailag, illetve kémiailag kötött víztartalma az ércelőpörkölés alatt eltűnt. A bucaeljárás érceivel foglalkozó kutatások,

számítások illetve a rekonstrukciós kísérletek tanulsága alapján legalább 35%-os vastartalmú savanyú bázikuságú ércet kell adagolni a bucakemencébe, hogy az eljárás nagy vasvesztése mellett is sikeres kohósítás történjék [2.29].

Az ércek esetében ritkábban szokásos, de mégsem haszontalan elektronmikroszkópos szerkezetvizsgálatot (SEM-EDS) is végezni. Az 5.28. ábrán látható a gyepvasércek jellemző mikroszerkezete. A gyakorlatilag SiO_2 -ből álló (az 1 pontban 63.3% Si-tartalmat mért a mikroszonda), alig 1-5% Fe-tartalmú sötét szigeteket hálószerűen veszi körül a vasban dús világosabb háló (2 pont), amelyben a vas dúsulása 30 és 85% közötti, de általában 50-60% körüli. Helyenként Mn- és Ca-dúsulás is megfigyelhető, a 2 pontban például 31.19 % Fe mellett 12.38% a mangán és 11% a kalcium előfordulási valószínűsége [5.5].



(5.28. ábra) Gyepvasérc SEM-képe – Zamárdi, 7-9. sz.[5.5]

5.3.2. Faszén és mészkő

Az olvasztás másik meghatározó alapanyaga a faszén. Faszénégető boksák nyomaira hazánkban főként „nemeskéri” típusú kemencék lelőhelyén akadtak a régészek, általában kerek vagy ovális, 2-3 méter átmérőjű, 20-35 cm mély, tányér alakú mélyedések formájában. A megvizsgált megmaradt korabeli kárpát-medencei faszendarabok döntő többsége kocsányos vagy kocsánytalan tölgyből származik [2.22].

A faszénégetés alatt távozó illókomponensek mennyisége nőtt a száraz lepárlás jellegű égetés hőmérsékletének és időtartamának növelésével. A faszén fafajától függően 78-92 % elemi kARBONT, 7-14% oxigént, 0.6-1.8% hidrogént és 0.5-3 % hamut, amely 20-40% K_2O -t, akár 10-16% MgO -t, illetve 1-7% foszfort tartalmaz [2.27]. A faszén kéntelensége – vagy minimális kéntartalma - a későbbi melegen kovácsolhatóság egyik alapvető feltétele. (A modern acélgártásban a legjelentősebb kénforrás a kocsz kéntartalma.)

Faszénleletek önmagukban aránylag ritkán bukkannak fel a lelőhelyeken, de gyakran lehet találni a megdermedt salakdarabokba tapadt faszénzemcséket.

A vas archeometallurgiájának egyik érdekes kérdése mészkö, illetve magas CaO-tartalmú adalékanyag használata. Elméletileg a bucaeljárásnak a modern vasiparitól alacsonyabb hőmérsékleti viszonyai között a salak bázikusságának növelése rosszabb viszkozitást is okozhat, viszont az érc esetleges nagyobb foszfortartalma esetén a korabeli kohászok empirikus úton megfigyelhették hasznosságát. Minél nagyobb ugyanis a salak bázikussága (CaO-tartalma), annál kisebb a P_2O_5 aktivitási tényezője a salakban - a komplex $3CaO \cdot P_2O_5$ vegyület kialakulása miatt - és így annál kevesebb foszfor oldódik fel a vasban.

Mészködarábok kohósításnál történő kismértékű adagolására utalhat, hogy számos alkalommal található mészköszemcse is salakdarabokba ágyazódva, persze ez származhat a kemence falzatából is.

5.3.3. Ércpörkölő gödrök

Ércpörkölő gödör nyomai előkerültek avar kori kemencéknél, de ugyanúgy fajszi és imolai típusú kemencék műhelygödreiben is. A mintegy 1-1,5 méter széles, 1-3 méter hosszú és 30-40 cm mély – esetleg valamivel mélyebb – ovális, vagy lekerekített sarkú gödrökben, fahasábokra szórva vagy faszén rétegen, esetleg azzal keverve hevítették az ércet, rendszerint szabad ég alatt. A rekonstrukciós kísérletek alkalmával rendszerint fával tüzelnek az ércpörkölő gödrökben. Az ércpörkölő gödrök oldalai – de az alja is - a kemencékhez és a kovácstűzhelyekhez képest kisebb mértékben vannak kiégve [2.22]. Aljuk lehet természetes döngölt talaj, agyaggal vékonyan kitapasztott, de akad példa kővel kirakott oldalú ércpörkölőre is [2.27]. Az 5.29. ábra fényképén Zamárdi avar kohótelepén talált ércpörkölő gödrök láthatók.



(5.29. ábra) Ércpörkölő gödrök – Zamárdi, 7-9. sz. (Gallina Zsolt – közöletlen fotó)

5.3.4. Műhelygödrök, kemencék és tartozékaik

A műhelygödrök vizsgálata, az alapvető régészeti feltárási és rögzítési tevékenységen túl főként a munkaszervezés szempontjából közvetít információkat (lásd 5.9. ábra, illetve a vele kapcsolatos megjegyzések az 5.1.3. alfejezetben). A 10. századi, fajszi típusú kemencék műhelygödreinek például megfigyelhető volt, hogy míg a somogyfajsi és bodrog-alsóbüi nagy méretű műhelyekben több kemence helyezkedett el egymás mellett a műhelygödör oldalába vájva – amelyből 2-4 működhetett egyszerre – addig a soproni Potzmann-dűlő lelőhelyén külön álló, egymás melletti kis műhelygödrökben egy-egy – maximum két - kemencét építettek (5.30. ábra), amely már a későbbi, Árpád-kori, „imolai” típusú kemencék műhelyeit idézi [2.22, 3.6].



(5.30. ábra) Sopron-Potzmann-dűlő egyik 10. sz-i műhelygödreinek két kohója és ércpörkölő gödreinek részlete (saját fotó), amelyek a mellette lévő a lelőhely-alaprajzon [5.28] 1.K. 2.K. és 3.P. jelöléssel vannak feltüntetve.

A műhelygödrök vertikális és horizontális méretei, egymáshoz képesti elhelyezkedései egy-egy nagyobb kohótelep működési periódusairól, szakmai komplexitásáról adhatnak felvilágosítást. Olyan objektumrészletek, mint tűzhely-nyomok, hulladékkal, salakkal feltöltött, illetve korábbi faszén- vagy érc-tárolásra utaló gödrök árulkodhatnak arról, hogy milyen tevékenységeket végeztek a helyszínen – volt-e pl. ércpörkölés, újraizzítás, kovácsolás, stb. – milyen volumenben, körülbelül mennyi ideig működhetett a műhely. Árulkodó lehet, ha korábbi földémszerkezetet tartó oszlopok beépítésének jellegzetes kis, kerek nyomai kerülnek elő. A munkaszervezéssel összefüggő életmódra utalhatnak, ha lakóépület, tároló vagy egyéb kiszolgáló objektum (pl. kenyérsütő kemence, kerámiaégető tűzhely) nyomaira bukkannak.

A somogyfajsi lelőhelyen (5.22. ábra) a műhely-bővítéseknél alkalmazott kemencebontások nyomait is azonosítani lehetett, ezért a feletti nagy telep páratlanul fontos információkat szolgáltatott a termelés időbeni szerkezeti folyamatáról, felvázolható lett egy vasolvasztó telep éveken át tartó működése. A 10. században, annak utolsó negyedében Koppány birtokában lévő területen 40-50 évig működő vasolvasztó helynek két használati

periódusa volt megfigyelhető, egymástól akár évtizednyi idővel is elválasztva. A korábbi műhely kemencéinek elhasználódása után az eredeti műhelygödört kibővítették egy második, hasonló méretű műhelygödörrel – részben az előző műhely vastag humuszába ágyazva - míg a korábbi gödört az újonnan épített kohók melléktermékeivel – vassalakkal, fúvócsó- és kemencefal-darabokkal - fokozatosan feltöltötték [2.22].

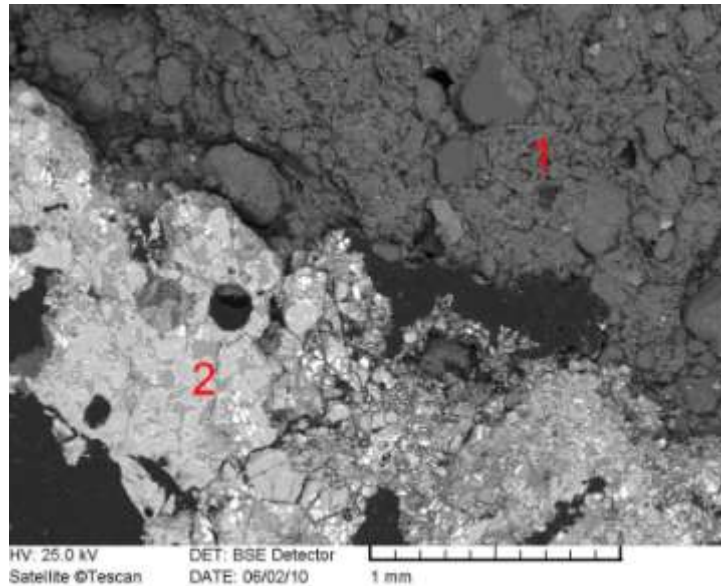
A bucakemencék típusáról az 5.2. fejezetben esett szó. Az ásatásokon a szabadon álló típusok esetében általában csak a medence alja kerül elő, illetve néhány darab a beomlott palástból, falazatból. Ritkaságszámba megy, amikor nagyobb kemencetest is megmarad, amint az 5.31. ábrán bemutatott nemeskéri kohó esetében is történt.



(5.31. ábra) A nemeskéri ásatás kohója és ledőlt palástja [2.22]

Általában a bucakemencék falazatának csak kisebb töredékeit találják meg. Esetenként anyagvizsgálat segítségével lehet egyértelműen meghatározni, hogy bucakemence-faltöredékről, vagy esetleg más, szintén hőhatásnak kitett darabról (salakfogó gödör, kitapasztott kovácstűzhely, sütökemence, stb.) van-e szó. Irányadó lehet a darab hőtágulási együtthatójának mérése, porozitásának vizsgálata higany-porozimetriás eljárással, illetve ásványszerkezetének vizsgálata. Természetesen ezek a vizsgálatok csak arra alkalmas lelet esetén végezhető el. A kemencefalazattal kapcsolatos vizsgálatoknál, kutatásoknál kiemelt szerepet kaphatnak a reprodukált kemencékkel történő próbaolvasztások. A kiegészítő fokok, a falazat ásványszerkezetének változása, illetve az abból a képződő salakba kerülő anyagok, vegyületek hatása mind vizsgálható a különböző összetételű és konzisztenciájú falazatú kemencében elvégzett próbakohósítások utáni összehasonlító elemzésekkel. Vizsgálendő lehet a bucakemence kerámiára égett falazata eredeti összetevőinek – csupán tiszta agyag (szürke, zsíros, sovány, stb.), vagy homokkal valamilyen mértékben soványított agyag – feltételezett aránya, összevetve a lelőhely talajának (korabeli) jellegzetességeivel.

A kemencetöredékek kémiai összetétele mellett fontos információkat közölhet a SEM-EDS-vizsgálat is. A kemencefal tűztér felőli felületének, illetve az ott gyakorta található salaktapadványok vizsgálata rendszerint egyazon vizsgálati körbe tartozik. Az 5.32. ábrán egy avar kori kohó kemencefal-töredékének elektronmikroszkópos képe látható. Az egyébként homogén szerkezetű, egyenletes szemcseméretű, téglaszerűen kiégett agyagot (1 pont - Si:44.40 %, Al:10.34 %, Fe:8.18%) befedi egy ráolvadt vasban dús, fémszemcséket is tartalmazó kéreg (2 pont - Si:16.30 %, Al:5.40 %, Fe:49.95 %).

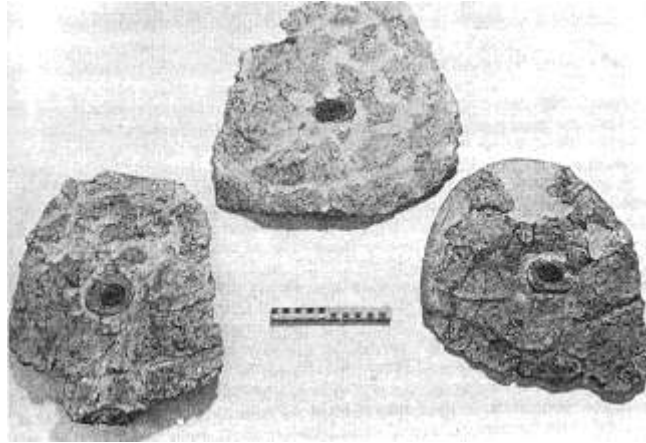


(5.32. ábra) Avar kori bucakemence-töredék SEM-képe [5.5]

A bucakemencék falazat-töredékeinek archeometallurgiai vizsgálataihoz szervesen kapcsolódnak a kemencék kiegészítőinek, a mellfalak és fűvókák maradványainak vizsgálata. Amint arról korábban szó esett, egyes kárpát-medencei kemencetípusoknál a kemence falazatánál vékonyabb, külön kialakított, a kohósítás végeztével kibontandó mellfalat alkalmaztak. Erre Európában máshol is akadt középkori példa. A mintegy 30-40 cm széles és ugyanilyen magas, 3-5 cm vastag mellfalakat valószínűleg már külön előre kialakították és kiégették, majd kohósítás előtt tapasztották a kemence mellnyílásába. A rekonstrukciós kísérletek tanulsága szerint megvalósítható az is, hogy a kemence mellnyílásában alakítjuk ki a nyers agyagból a mellfalazatot és ott történik a kiégetése. A mellfallal működő kárpát-medencei bucakemencék esetében a mellfal közepébe 5-8 cm-es lyukat alakítottak ki, ezen át vezették be a fűvókát. Mindez Zamárdi avar kori kohótelepén talált mellfalazatok (5.33. ábra), illetve a 9. századi, nemeskéri példányok esetében (5.34. ábra) is jól láthatók.

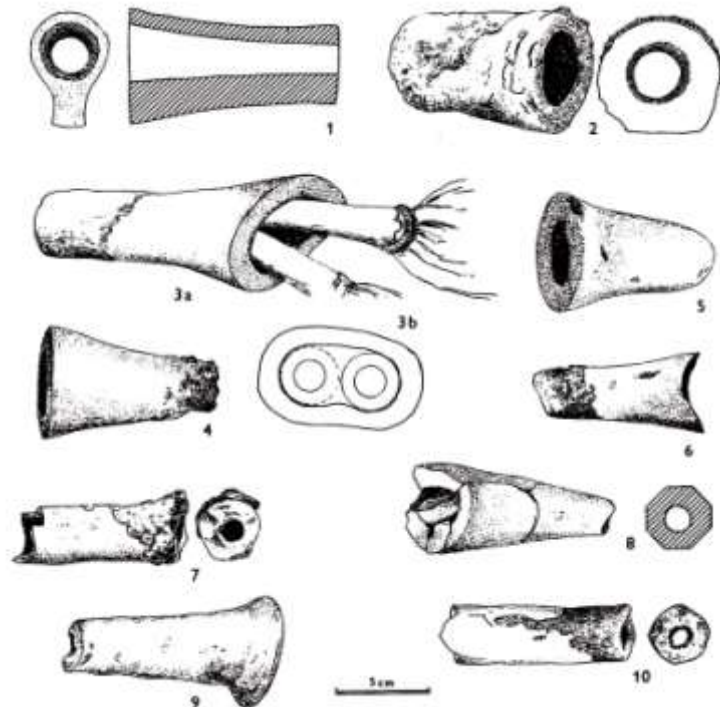


(5.33. ábra) Avar kori mellfalak – Zamárdi (Gallina Zsolt fotója)



(5.34. ábra) Mellfalak a nemeskéri ásatásról – 8-9. sz. [5.11]

Az őskori-óskori-középkori bucakemencék jellegzetes tartozékai az agyagból készített fűvókák, amelyek egyúttal a vaskohászati iparrégészet speciális leletcsoportját alkotják. Lelőhelyenként változó számban kerülhetnek elő, néhány darabtól akár több százas nagyságrendben. Kemencébe lógó végükön gyakorta találni rádermedt, a fűvóka anyagával gyakorlatilag összeolvadt, rendszerint üvegszerű salaktapadványt. A fűvókák méretei, kialakítása többféle lehet. A jellegzetesen csőszerű kiképzés mellett – amely legtöbbször szűkülő keresztmetszetű, vagy esetleg több fűjtatócső számára egyik oldalán enyhén tölcséres bemenetű (5.35. ábra 3, 9) – egyedi kialakítású fűvókapaneleket is találtak. Az 5.35. és 5.36. ábrák a fűvókaleletek és fűvókapanelek számos európai példáját mutatják be.



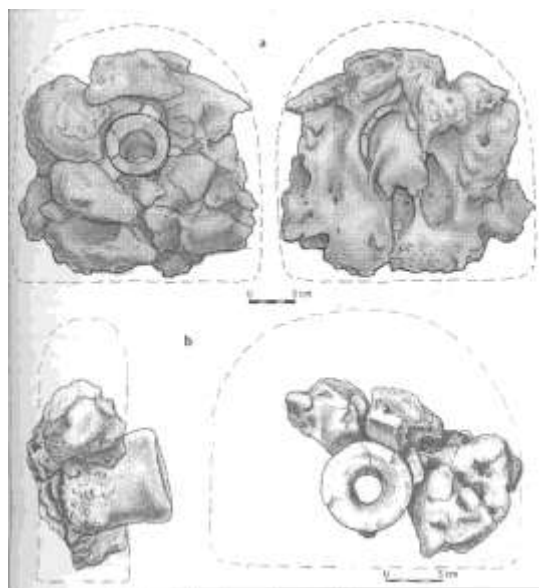
(5.35. ábra) Különböző európai fűvókaleletek (1 – Németország, datálatlan; 2 – Svájc, Kr.u. 5. sz.; 3 – Magyarország /Tarjánpuszta/ 8. sz.; 4 – Magyarország /Imola/, 10-11. sz.; 5 – Skócia, középkori; 6 - Csehország, 9. sz.; 7 – Moldávia, 8-9. sz., 8 – Oroszország, korai középkori; 9 – Csehország, 10. sz.; 10 – Lengyelország, 11-12. sz.) [2.27]



(5.36. ábra) Beépített fűvókapanelek – Németország, La Tène időszak [2.27]

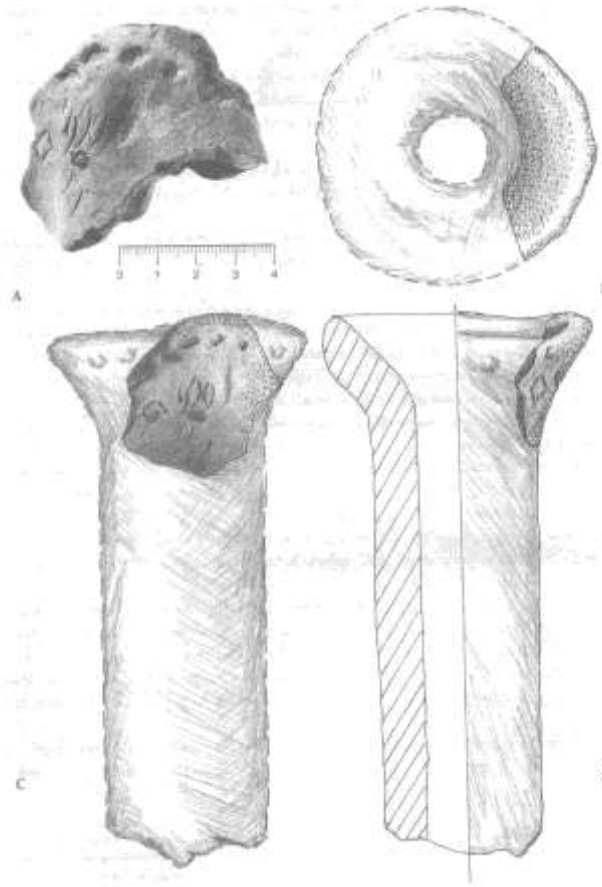
A fűvókák alapvető funkciója, hogy a fűtetés levegőáramát intenzifikálva a kemence tűzterébe juttassák, egyúttal védjék a fűtatók állagát és a kemence falzatát a fűtetés periódikus mozgásának súrlódása által okozható sérülésektől. Elhelyezése, iránya szintén változatos. A fűtetés történhetett előlről, oldalról, hátulról – akár egyszerre több irányból is – a fűvóka iránya lehetett vízszintes vagy enyhén lefelé dőlt. A fűvóka természetesen nem az ősi vaskohászok találmánya, a korai rézkohászatban, bronztechnológiáknál is használták, illetve a vaskohászat területén belül újraizzító és kovácstűzhelyek hevítésénél is alkalmazták. A fűvókák műszaki vizsgálatai a kemence- és mellfal-darabokéhoz hasonló, nagyobb fókusszal a darabok szilárdsági vizsgálatára, amely ez esetben egyértelműen és relatíve könnyen támogatható rekonstruált darabok felhasználásával, laborkísérletekkel.

A Magyarországon talált korai középkori fűvókák 10-15 cm hosszúak, általában enyhén tölcséres kiképzésűek, 1-3 cm falvastagságúak, akad közöttük zömökebb és karcosabb formájú is (lásd 3.4. ábra). Az 5.37. ábra rajzain jól megfigyelhetők a fűvóka és a mellfal kapcsolódása, illetve a fűvókára ráfolyt és megdermedt salak (amely egyébként az olvasztás menetét is veszélyeztette).



(5.37. ábra) Mellfal és fűvókadarabok – Bodrog-Alsóbü, 10. sz. [2.22]

Kuriózusként említendő a somogy-megyei Bodrog-Alsóbú 10. századi kohótelepén talált rovásírásos fúvókatöredék, amely a legkorábbi magyar rovásírásos tárgyi emlék (5.38. ábra). A négy határozott és két bizonytalan rajzolatú rovásjel mellett az író balkezeének hüvelykfenyomata is kivehető. A felirat olvasata: *funak* [5.30].



(5.38. ábra) A bodrog-alsóbú székely-magyar rovásírásos fúvókatöredék [2.22]

5.3.5. Salakok

A vaskohászat archeometallurgiai vizsgálatai körében a korabeli technológia fizikai, kémiai és metallurgiai jellemzőiről a legtöbb és legváltozatosabb információt a salakleletek műszaki vizsgálatai szolgáltatják. A régészeti salakleleteket alapvetően két nagyobb csoportba oszthatók, technológiai és vizsgálati szempontból: bucakemencék salakjai és kovácssalakok.

Számos tanulmány, elemzés szól a bucasalakok archeometallurgiai vizsgálatáról, amelyek különböző, vagy éppen egyazon lelőhelyen talált salakleletek morfológiai jellegét, kémiai összetételét tekintve igencsak változatos képet adnak. Kémiai összetételüket alapvetően a felhasznált érc és a kohósításnál a kemencébe került esetleges adalékanyagok (mészke, hamu, homok, falazatdarab) határozzák meg, illetve az eljárás egyes körülményei (keletkezés helye, ideje, hőmérséklete) módosítják, amely utóbbiak a bucasalakok ásványi összetételét, makro- és mikroszerkezetét befolyásolják elsősorban.

A számtalan formájú, jellegű, bucakemencés kohósításból származó salakleletek mindazonáltal 2+1 csoportba oszthatók:

1.Folyósalakok: A bucakemencék salakjainak jellegzetes képviselői az ún. folyósalakok, rendszerint nehéz, relatíve tömör, teljesen átolvadt, gyakran szőlőfürtszerűalakban megfolyt, tompán csillogó, fekete felszínű darabok, sötétszürke töretükben apró lunkerekkel, egyébként aránylag homogén szerkezettel (5.39. ábra). Amennyiben arra mód van, kifolyik a kemencéből, annak előterében lévő salakfogó gödörbe. Esetenként – például az „imolai” típusú kemencéknél - nem távozik a kohóból. A folyósalakoknak többféle megjelenése is van. Léteznek sima felszínű, kékesen fekete, szinte csillogó, néhány apró lunkerrel tarkított darabok, amelyek széttörve tömör, sugaras szerkezetet mutatnak és láthatóan relatíve könnyen és teljesen átolvadtak. Az ilyen darabok néha egész extrémén megfolyt formában dermedtek meg, előfordul, hogy útban a salakfogó gödör felé. Másrészt egyes darabok vaskosabbak, öklömnyi, esetleg még nagyobb méretűek. Szintén tömörek, de nem annyira fényes felületűek, barnás területek is előfordulnak és valamivel több apró lunkert tartalmaznak.



(5.39. ábra) Folyósalak – Zamárdi 7-9. sz. (saját fotó)

2. Kemencesalakok: A másik csoportot az ún. kemencesalakok jelentik, amelyek nem folynak ki az olvasztás alatt a bucakemence előterében lévő salakfogó gödörbe, hanem mindvégig a kohóban maradnak. Ezek rendszerint nagyméretű, erősen csipkézett, szivacszerű, a folyósalakoktól kisebb sűrűségű, heterogénebb szerkezetű salaktömbök, tele kisebb-nagyobb gázlunkerrel, néha faszén-, kvarc, vagy mészkő-tapadványokkal (5.40. ábra). Színük változatosabb a folyósalakokénál, szürke, feketés és vöröses (rozsdabarna). Utóbbi szín leginkább a fémesedett részek évszázadok folyamán történő reoxidálódásának eredménye. Esetenként találni kemencefal-darabbal összesült salakdarabokat is ebből a típusból, ekkor félig redukált ércszemcsék is beágyazódhatnak a salakba.



(5.40. ábra) Kemencesalakov – Zamárdi 7-9. sz. (saját fotó)

+1. Átmeneti salakov: Léteznek egyfajta átmeneti jellegű salakovdarabok is, amelyek mindkét csoport tulajdonságait hordozzák magukon. Ezek gyakran a kemencesalakovhoz hasonlóan vöröses barna, heterogén összetételű, rátapadt és bezáródott idegen szemcsékkel (faszén, kavics, mészkő, földmaradék) tarkított, de a folyósalakovhoz hasonlóan általában jól átolvadtt, lepényszerű vagy tömbös, tömör darabok (5.41. ábra). Sok esetben a kohó medencéjének íves formáját felvéve dermednek meg (5.42. ábra). Számos, egymástól néha igencsak eltérő változat került elő, formájáról ítélve a kemencében, annak legalsó zónájában marad. Vastagh ezekre a salaktömbökre a „medve” nevet használja [2.2], de ugyanezre vonatkozik Pleiner „slag-pit block” elnevezése is [2.27]. Ebbe a csoportba gyakorlatilag minden egyéb, az előző két csoportba nem illő, vagy a kettő között átmenetet képező salakovlelet besorolható.

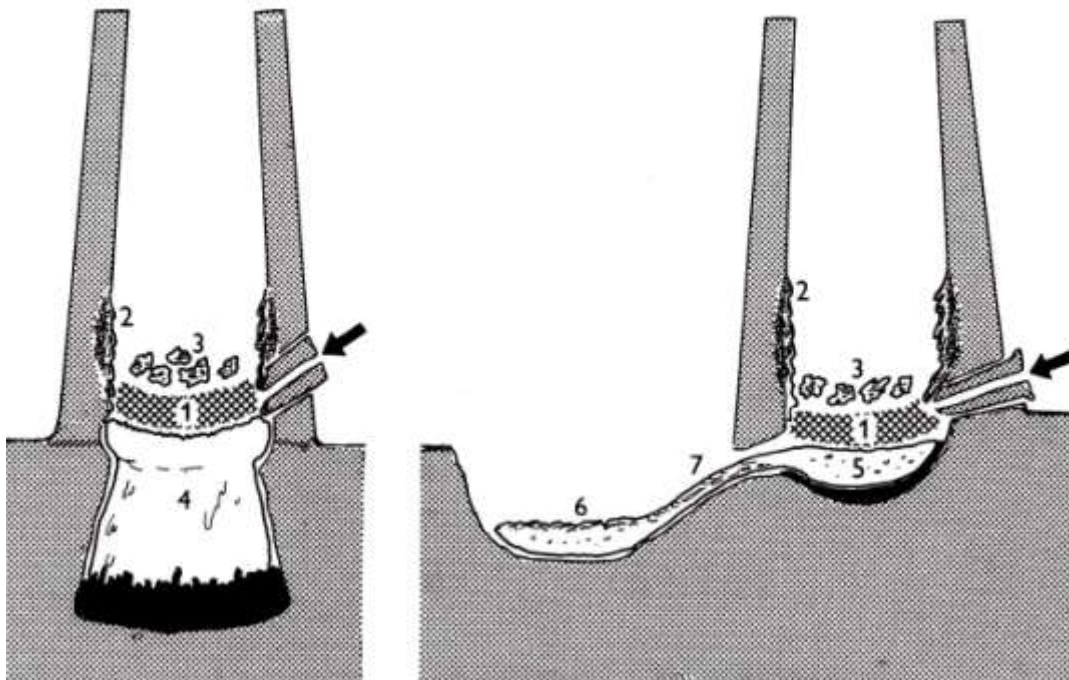


(5.41. ábra) Átmeneti salakov – Kaposvár 7-9. sz. (saját fotó)



(5.42. ábra) A medence alakjában megdermedt salak (medve) – Kaposvár 7-9. sz. (saját fotó)

Az 5.43. ábra sematikus mutatja be az egyes salakfajták elhelyezkedését belső salakgödörös aknáskemence esetén, illetve amikor a salak kifolyik a bucakemencéből.



(5.43. ábra) Különböző salakfajták elhelyezkedése salakgödörös és külső salakfogóval ellátott kemencék esetén – 1 salakkal átszőtt vasbuca, 2 falazathoz tapadt kemencesalak (gyakran faszén és ércbeágyazódásokkal), 3 kemencesalak, 4 salakgödörbe összegyűlt salaktömb (átmeneti salak, medve), 5 medence alján összegyűlt folyósalak-szerű átmeneti salak (nem mindig marad), 6 folyósalak [2.27]

A salakleletek technológiai szempontból külön csoportját képezik az ún. kovácssalakok (5.44. ábra). Ezek megkülönböztetése a bucakemencék salakjaitól gyakran nem egyszerű. Természetesen könnyebb a helyzet, ha kohósításnak, bucakemencének semmilyen nyoma nem bukkan fel a salakok lelőhelyén, de a korai időkben – pl. a Kárpát-medencében az Árpád-kor előtti századokban – a vas kohósítása és kovácsolása jellemzően egyazon munkaterületen történt. Az általában kisebb, kerekded, vagy éppen tenyérnyi

nagyságú, laposabb kovácssalak-daraboknak nincsen annyira tipikus külalaki jellemzőik, mint például a bucakemencéből származó folyósalakoknak. Szerkezetük rendszerint közepesen tömör, néha szivacsos. Komplex műhely esetén beazonosításukat megnehezítheti az is, hogy a buca kemencéből való kiemelésekor tömörítő kalapáláson esik át, amely egyúttal a rátapadt salakdaraboktól való megszabadítást is jelenti, ami még nem a klasszikus kovácstűzhelyen történő újraizzítás utáni kovácsolás. Ez utóbbinál salakképző – homok – adagolása is elképzelhető. A kovácssalakok szürkés-barna színűek, rájuk is jellemző a reoxidáció okozta rozsdaszínű foltok.



(5.44. ábra) Kovácssalakok – Ordacsehi, kelta település Kr.e. 2-3. sz. (saját fotó)

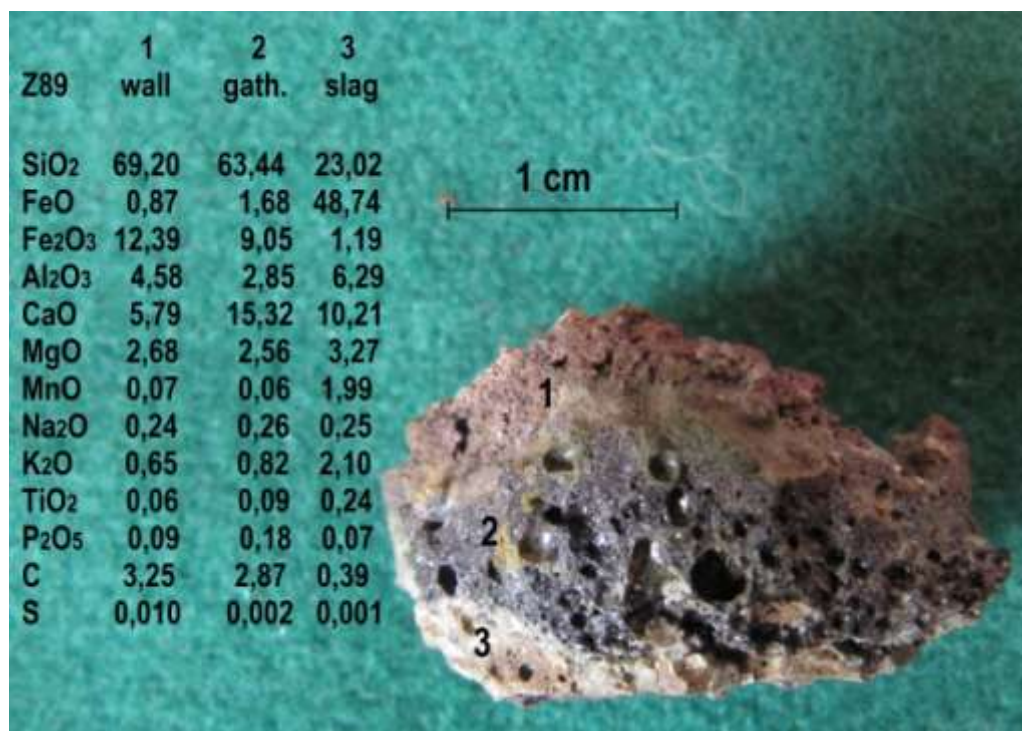
A régészeti vassalak minták műszaki vizsgálata a vas archeometallurgiájához kapcsolódó leletfajták közül a legkomplexebb lehetőséget prezentálja. Mind a kémiai és az ásványi összetételre irányuló analízis, mind a mikroszerkezetet vizsgáló elektronmikroszkópia lényeges információkat szolgáltat a kohósítás fizikai, kémiai és metallurgiai folyamatairól. Az 5.2. táblázatban ugyanazon avar kori lelőhelyekről származó salakminták kémiai összetétele látható, amely lelőhellyel kapcsolatosan az 5.1. táblázat ércösszetételei is szólnak.

No.	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	C	S
Z89/1	27,81	38,67	18,36	3,63	4,97	2,19	2,18	0,20	0,85	0,15	0,05	0,38	0,001
Z89/2	28,58	47,49	5,57	4,97	5,94	2,62	2,38	0,25	1,06	0,23	0,11	0,49	<0,001
Z58B/1	32,03	54,94	0,90	1,24	3,58	1,24	3,58	0,69	0,90	0,24	0,072	0,51	<0,001
K19/1	28,67	46,29	7,89	5,09	1,87	1,43	3,61	2,41	0,67	1,10	0,163	0,26	<0,001
Z58A/1	18,70	23,11	28,24	3,52	13,20	2,86	8,04	0,23	0,91	0,17	0,092	0,16	0,002
Z58A/2	16,30	30,66	27,96	3,19	7,01	3,46	8,35	0,16	0,72	0,12	0,142	1,33	0,003
Z89/3	40,10	24,78	23,51	2,88	3,08	0,94	1,64	0,14	0,88	0,13	0,034	0,21	0,002
Z89/4	20,66	35,15	19,44	3,10	7,98	2,82	8,67	0,15	0,80	0,15	0,06	0,31	0,003
Z89/5	21,00	39,10	13,10	2,59	9,71	1,71	0,22	0,21	1,13	0,15	0,042	0,43	0,001
Z89/6	43,74	18,32	0,65	2,87	30,60	0,52	0,64	0,28	0,23	0,12	0,091	0,25	0,001
Z89/7	29,70	30,16	20,80	3,47	2,49	3,72	6,61	0,21	1,05	0,16	0,048	0,13	0,001
K19/2	15,58	30,34	41,79	1,45	4,74	0,39	2,66	1,14	0,73	0,05	0,153	0,47	<0,001

(5.2. táblázat) Zamárdi (Z) és Kaposvár (K) avar kori lelőhelyein talált salakdarabok kémiai összetétele (wt%) (saját vizsgálatok)

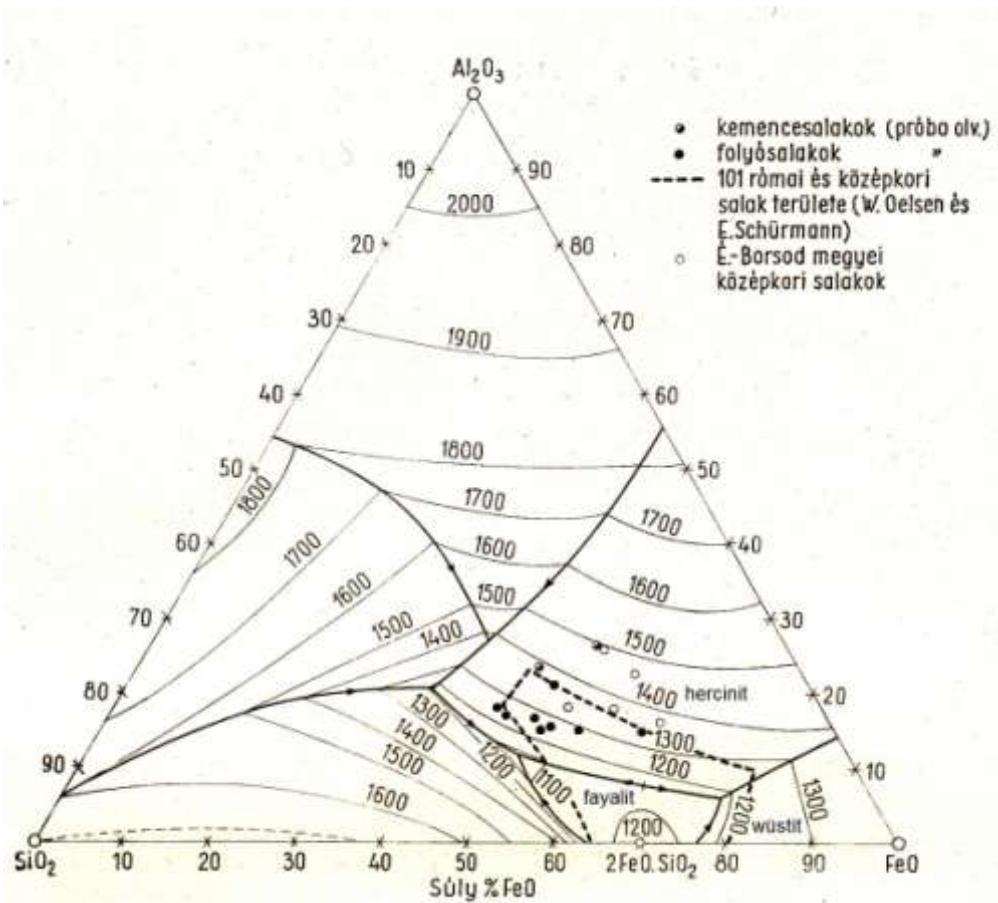
Az első négy sorban lévő salakösszetétel a folyósalakok tipikus összetételét mutatja. A magas SiO₂- és FeO-tartalom zömében az ásványtani vizsgálatoknál is jól kimutatható fayalit (2FeO·SiO₂) összetevői. Az eljárás vasvesztése alapvetően itt jelentkezik. Ez a salakfajta képződhetett leghamarabb a kohósítás folyamán. A következő négy minta a kohókban maradt kemencesalakok jellemző összetételét mutatja. Ennek a csoportnak az alapvető jellegzetessége, hogy a három vegyértékű vas által alkotott oxid (Fe₂O₃) – amely a mért két vegyértékű és összes vasból számított érték - aránya jóval magasabb, mint a folyósalakok esetében. Ez gyakorlatilag onnan ered, hogy a kohósítás folyamán mindvégig a bucavas közelében maradt, csipkézett, relatíve laza szerkezetű salakban már fémcsémák nagyobb része az idő folyamán rozsdásodott és a keletkezett vas-hidroxid aztán vízvesztéssel vöröses barna Fe₂O₃-dá alakult. A kemencesalakok legtöbbször valamivel magasabb CaO-tartalmat lehet tapasztalni, mint a folyósalakoknál. Nagy számban lehet olyan mintára akadni, amely átmeneti salakként aposztrofálható. A táblázat utolsó négy sora erre mutat példákat. Akad köztük olyan, amely alapvetően kalcium-szilikát, a többihez képest alacsonyabb vasoxid-tartalommal (Z89/6), illetve kiemelkedően magas vasoxid-tartalmú minta is (K19/2). Számos kutatás mutatott már rá a bucasalak SiO₂-tartalmának és vastartalmának fordított arányosságára, amely alapvető indoka annak, hogy a bucaeljárásban célszerű volt savanyú érceket feldolgozni [2.2, 5.31].

Érdekes információkat szolgáltat a kemencefal oldalához tapadt salakdarabok vizsgálata. Az egyik ilyen speciális, háromrétegű darab, illetve az egyes rétegek kémiai összetétele látható az 5.45. ábrán. Az első réteg (wall) a kemencefal tüztér felőli anyaga, amely főként alumino-szilikát, a kemence tüztere irányában növekvő Fe-tartalommal. A kohósítás alatt beágyazódott vasszemcsék hosszú idők alatti reoxidációja is közrejátszhat a bemutatott minta első rétegének Fe₂O₃-tartalmában. A minta második, szürke, erősen lunkerés rétege (gath.) gyakorlatilag kalcium-szilikát, a harmadik réteg (slag) magas wüstit-tartalmú, fayalitos, kalcium-szilikátos salak. A némileg magasabb K₂O-tartalom a faszén hamujából származhat, akárcsak a CaO egy része is.



(5.45. ábra) Bucakemence falához tapadt salak rétegei – Zamárdi, 8-9. sz. (saját fotó)

A salakok ásványtani összetételében az 1170 °C-os olvadáspontú fayalit ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) a legmarkánsabb komponens [2.20, 5.32], amely esetenként komplex oxidot alkot magnéziummal, alumíniummal (lásd 3.1. táblázat), viszont a fayalit jelentős hányada röntgenamorf. Az 5.55. ábrán látható $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ rendszerben megfigyelhető a bucaeljárás salakjaira jellemző jelölt terület, ahol a fayalit, wüstit és hercinit az először kristályosodó ásványi összetevő. Az izotermák alapján a legalacsonyabb olvadáspontú salak elméletileg az 50% FeO , 40% SiO_2 , 10% Al_2O_3 összetételnél van, tehát mérsékelt alumínium-oxid tartalom tovább csökkentheti a fayalitos salak olvadáspontját, de 10% utáni növelése jelentősen és nagy ütemben növeli azt. Az ábrán látható, hogy a jelölt folyósalakok olvadáspontja 100-250°C-kal alacsonyabb a kemencesalakokénál, tehát ez is igazolja a folyósalakok primer keletkezését.

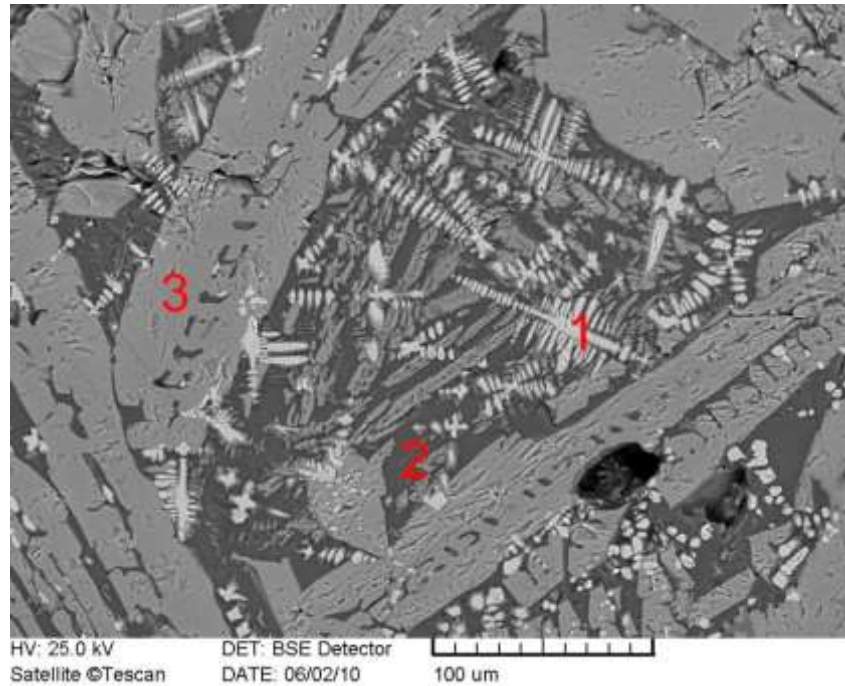


(5.46. ábra) $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ rendszer olvadáspont-izotermái [2.2]

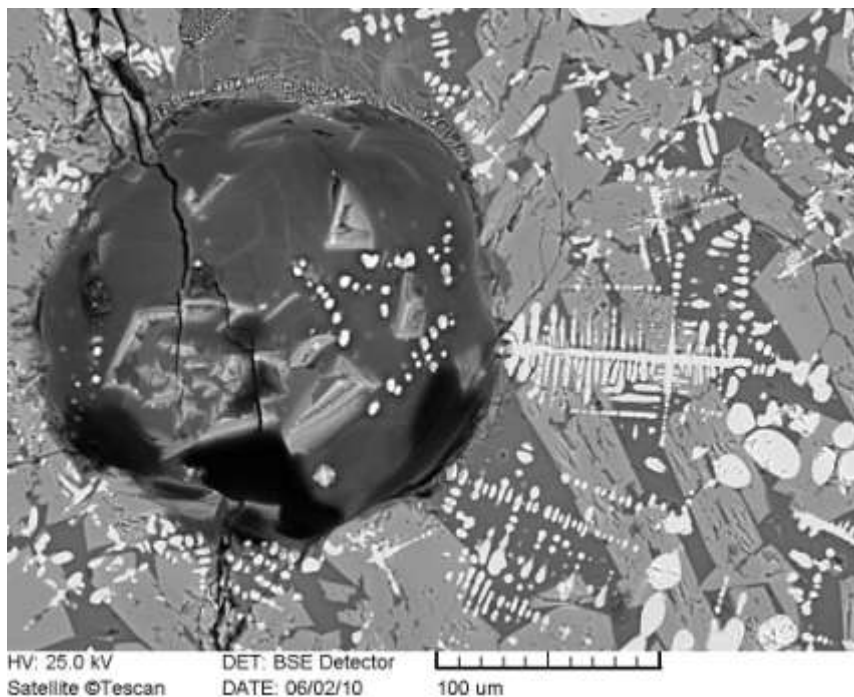
A kovácssalakok esetén nem igazán lehet beszélni tipikus kémiai összetételről. A tevékenység oxidáló atmoszférája, illetve a fémes szemcsék évszázadok alatti reoxidációja következtében Fe_2O_3 -tartalmuk általában magas. A kovácssalakok SiO_2 - és CaO -tartalma helytől és technikától függően széles skálán változhat. A rendszeresen alkalmazott salakképző, folyósító (homok) miatt SiO_2 -tartalma gyakorta a bucakemence salakjaihoz képest is nagy, de akad példa ennek éppen az ellenkezőjére is [5.17].

A jellemzően inhomogén salakok elektronmikroszkópos vizsgálatánál mikroszerkezetek számtalan variációja felbukkan. Mindazonáltal meg lehet figyelni jellemző mikroszerkezeteket. A folyósalak jellemző mikroszerkezete (5.47. ábra) általában látványos

dendrites szerkezetet mutat. A néhol tercier ágakban is kristályosodott, szinte tiszta vasoxid dendriteket (1 pont) Al-Si-Ca-K-oxidos komplex ásványrészletek veszik körül (2 pont), illetve a középszürke nagyobb területek szintén nagy Fe-tartalmú fayalitkristályokból állnak (3 pont). A kisebb fekete foltok gázlunkereket mutatnak. A morfológiai jellegében egészen más kemencesalak elektronmikroszkópos képe is gyakran mutat nagyon hasonló kristályosodást, csak a dendritágak általában nem olyan határozottak, élesek, illetve valamivel több gázlunker figyelhető meg (5.48. ábra).

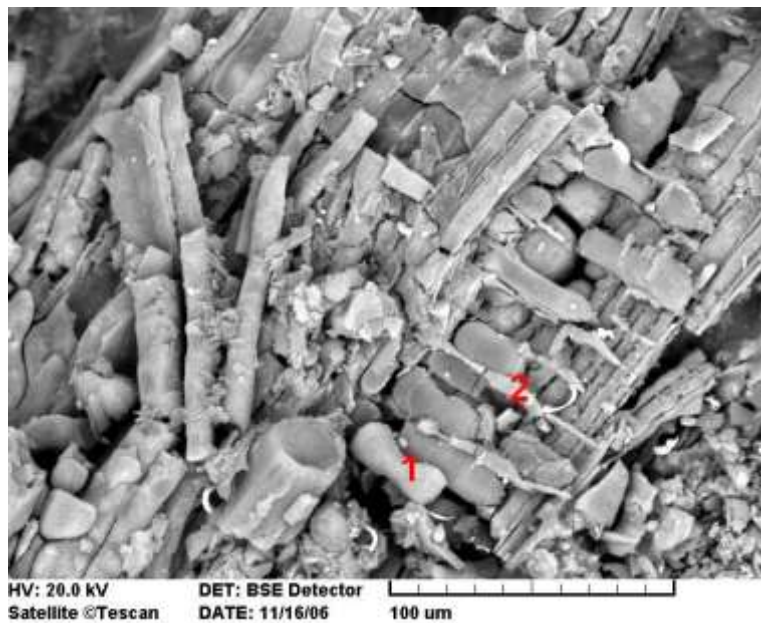


(5.47. ábra) Folyósalak elektronmikroszkópos képe [5.5]

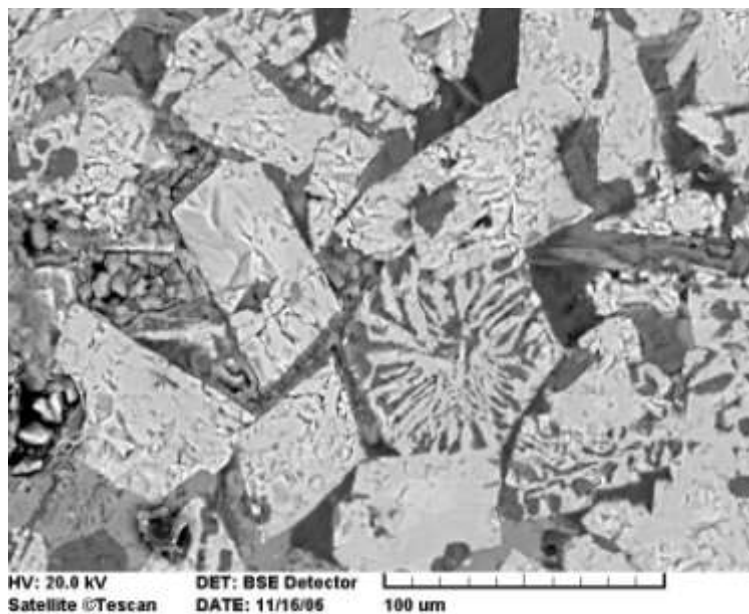


(5.48. ábra) Kemencesalak elektronmikroszkópos képe (publikálatlan)

A kemencesalakok és átmeneti jellegű salakok esetében számos egyéb kristályosodási módot meg lehet figyelni, mint például csöves (5.48. ábra) és táblás (5.49. ábra) szerkezetet



(5.49. ábra) Csöves mikroszerkezetű salak SEM-képe (1 – Mn:43.68%, Fe:3,79% 2 – Mn:18.60%, Fe:30.31%) [5.32]

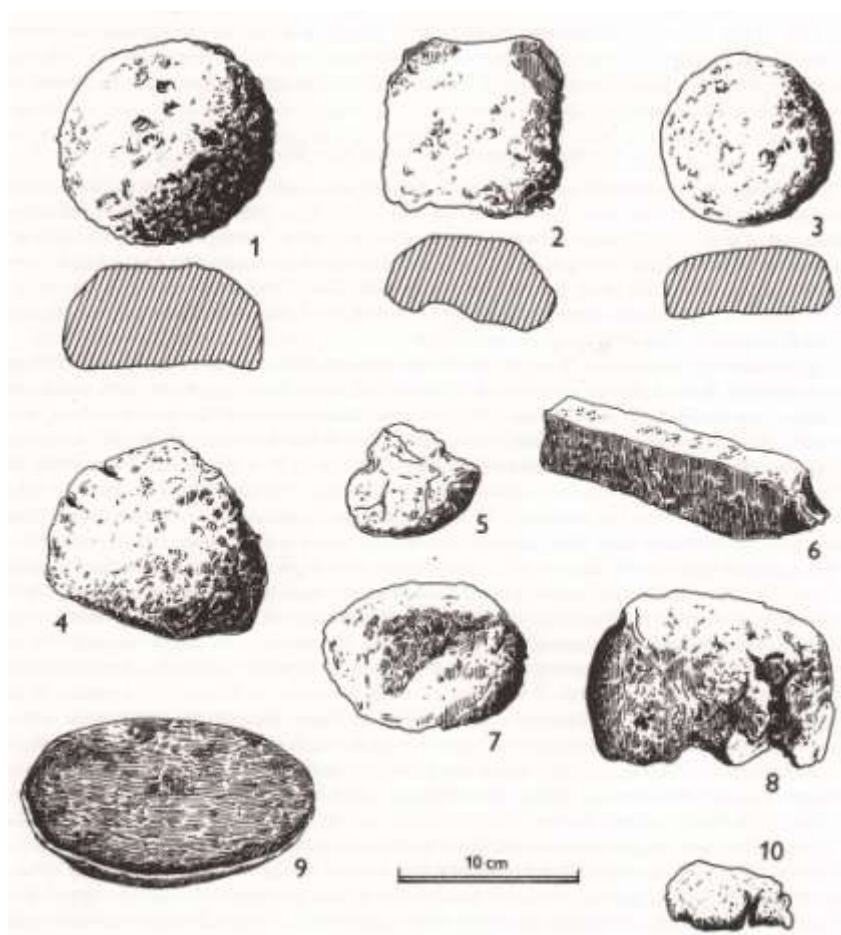


(5.50. ábra) Táblásan kristályosodott salak SEM-képe [5.32]

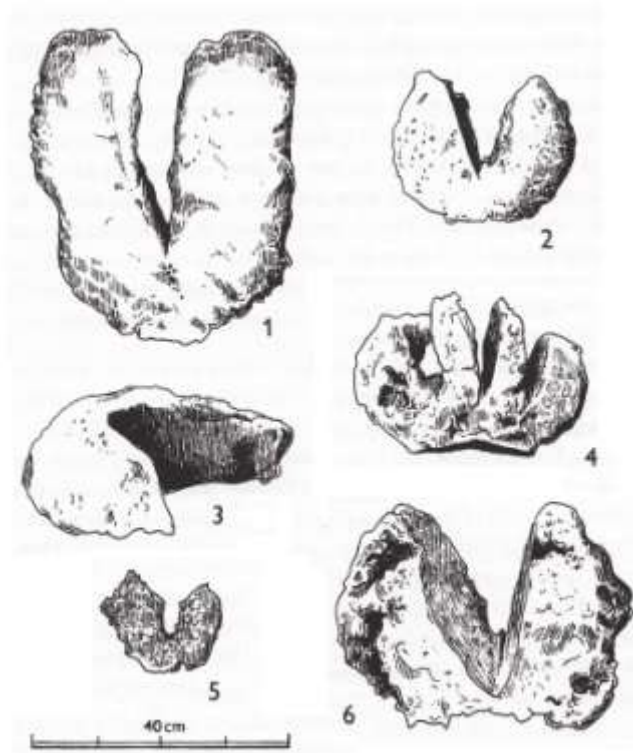
A salakok műszaki vizsgálatának speciális területe a bucában, illetve fémtárgyakban található salakzárványok vizsgálata. Ezek folyamán összefüggést lehet kimutatni a vas szöveteleme, illetve a salakzárvány jellege között. A ferritben általában wüstites, a perlitben fayalitos, vagy akár üvegszerű (SiO_2 -dús) salakzárványt találtak. Ugyanakkor a salakzárványok $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ arányaiból akár következtetni lehet a kohósítás régiójára is [5.33].

5.3.6. Vasbucák

A korabeli vasbucákból – nagy értékük miatt – aránylag kevés maradt meg. Azoknál is felvetődik a kérdés, hogy véletlenül fel nem használt darabról, vagy direkt félredobott, valamilyen oknál fogva elrontottnak definiált bucáról van-e szó. A vasbucákat a kemencéből kivéve általában kocka, vagy hasáb, esetleg rúd alakúra tömörítették, ezzel együtt salaktalanították. A vaskohászati lelőhelyeken talált, már tömörített, salaktalanított vasbucák (lásd 3.7. ábra) általában 1-3 kg tömegű – esetenként nagyobb, 5-20 kg-os - cipó, vagy vastagabb lepény alakú általában rozsdabarna, heterogén felületű tömbök (5.51. ábra). A Dunántúlon (Keszthely, Sopron) találtak néhány 50-60 kg-os késő római kori vasbucát [2.22]. Szerte Európában számos olyan vasbucá leletet találtak, amelyen egy – vagy akár több – mély, ék alakú vágás van. Ezeket a vágásokat a kemencéből kivett bucán, tömörítés, salaktalanítás után, de még meleg állapotában erőteljes fejszecsapással alakították ki, egyfajta minőségellenőrzési célból. A korabeli kohászok kizárólag gyakorlati tapasztalataikra hagyatkozhattak és ezek alapján tudták, hogy az egyes bucák anyagszerkezete között akár markáns különbség is lehet, illetve gyakorta egy bucán belül is jelentős heterogenitás tapasztalható. Ezek az eltérések az egyes részek zárványosságában, illetve karbontartalmában jelentkezhetnek. Az 5.51. ábra több cipó és lepény alakú valamint egy hasáb alakú vasbucát, az 5.52. ábra pedig hasított bucaleleteket mutat be.



(5.51. ábra) Cipó- és lepény alakú vasbucák (1 – Szlovákia, 8. sz., 2.41 kg, 2 – Szlovákia, 7.sz., 3 – Szlovákia, La Tène időszak, 4 – Szlovákia, Hallstatt időszak, 2 kg, 5 – Ukrajna, Kr.e. 6-4. sz., 6 – Anglia, 2 kg. 7 – Ukrajna, korai középkor, 2.05 kg, - 8 – Csehország, 10-11. sz., 3.15 kg, 9 – Ukrajna, korai középkor, 1.75 kg, 10 – Lettország, 13.sz. 0.73 kg [2.27]



(5.52. ábra) Hasított vasbucák (1 – Románia, Kr.u. 1. sz, 9 kg, 2 – Csehország, 9.sz, 2.45 kg, 3 – Ukrajna, korai középkor, 4.9 kg, 4 – Svédország, korai középkor, 5.22 kg, 5 – Norvégia, korai középkor, 10 kg, 6 – Svédország, 14-15. sz, 0.4 kg [2.27])

A vasbuca karbon- és foszfortartalma változó lehetett. A bucák alijában véve alacsony (0.2 – 0.8 %, jellemzően 0.3-0.4%), esetenként igen alacsony (0.05-0.2%) karbon-tartalmú vasdarabok, viszont karbon-tartalmuk nagyon heterogén eloszlású a ferrites, ferrit-perlites, cementites szövetszerkezetben, 0.1-1%-os értéktartományban, de helyenként 1.2-1.4%-os értéket is elérve. A magasabb karbon-tartalom rendszerint a buca felületéhez közeli zónákra jellemző [2.27].

A bucák foszfortartalma alapvetően ércfüggő. A salak és fémleletek alapján a kárpát-medencei bucaeljárásra rendszerint az alacsony foszfortartalom jellemző (0.01-0.1%), kivéve a somogyi régió egyes korai középkori lelőhelyeit [5.34]. Ugyanakkor a foszfor a vas archeometallurgiájában a mai modern vas- és acélméllurgiához képest sokkal fontosabb szerepet tölt be, mivel a korabeli európai bucák foszfortartalma gyakran relatíve magas (0.4%-tól nagyobb) volt, egyes extrém esetben az 1.5-1.7%-ot is elérte [2.27, 2.29]. A nagy foszfortartalmú bucák felhasználása, a kedvezőtlen alakíthatósági és mechanikai tulajdonságok ellenére, a középkorban elterjedt volt. Az archeometallurgiai szakirodalom az ilyen anyagokat ún. „foszfor-vasnak” nevezi [2.29]. A foszfor alapvető hatása a kis karbon-tartalmú acélszerű anyagokra önmagában negatív, mivel a szemcsehatárokon megjelenő, 1050°C olvadáspontú Fe-Fe₃P eutektikum (steadit) a kovácsolás hőmérsékletén törékenységet okoz, de kisebb foszfortartalom esetén az alakíthatósági tulajdonságok romlásához, elridegedéshez, durva szemcse-szerkezetéhez vezet [5.35]. Foszfortartalmú vasat azonban mégis több száz éven át használtak (lásd a következő alfejezetben).

5.3.7. Újraizzító tűzhelyek és kovácműhelyek

A kemencéből kivett, igencsak salakos, faszén-tapadványos bucát többször át kellett kalapálni, tisztítás és tömörítés céljából. Ehhez szükséges volt a vasbucát többször újra felhevíteni olyan hőmérsékletre, amelyen a vas ausztenites állapotban van (900 °C felett), a fayalitos salak viszont megolvad, vagy legalábbis képlékeny annyira, hogy az leválasztható, ütésekkel kiperéselhető legyen (1100-1300 °C). A hevítéseket faszénnel, újraizzító tűzhelyekben végezték. Ezek maradványai a korai középkori Kárpát-medencét illetően általában ovális vagy néha kör alakú, gyengén vagy közepesen kiégett sekély gödrök, 40-80 cm közötti átmérővel, amelyek rendszerint a kohók mellett, vagy közelükben találhatóak meg (5.53. ábra).



(5.53. ábra) Újraizzító tűzhely és kohó maradványa – Zamárdi 7-9. sz. (Gallina Zs.)

Az újraizzító tűzhelyek közötti különbségek főként a gödrök alakjában – megnyújtott, patkó alakú, dobozszerű, stb - nyilvánulnak meg. Gyakorta találni a tűzhely mellett salakos fűvókamaradványt. Európában előfordul újraizzító tűzhelyek némileg speciális kialakítása is, ilyen például a következő fejezethez csatolt V. videóban is bemutatott módszer, ahol a faszenes, fűjtatásos izzítás két lapos, egymástól 20-30 cm-re lévő, élére állított kő között – mintegy szélcsatornában – történt.

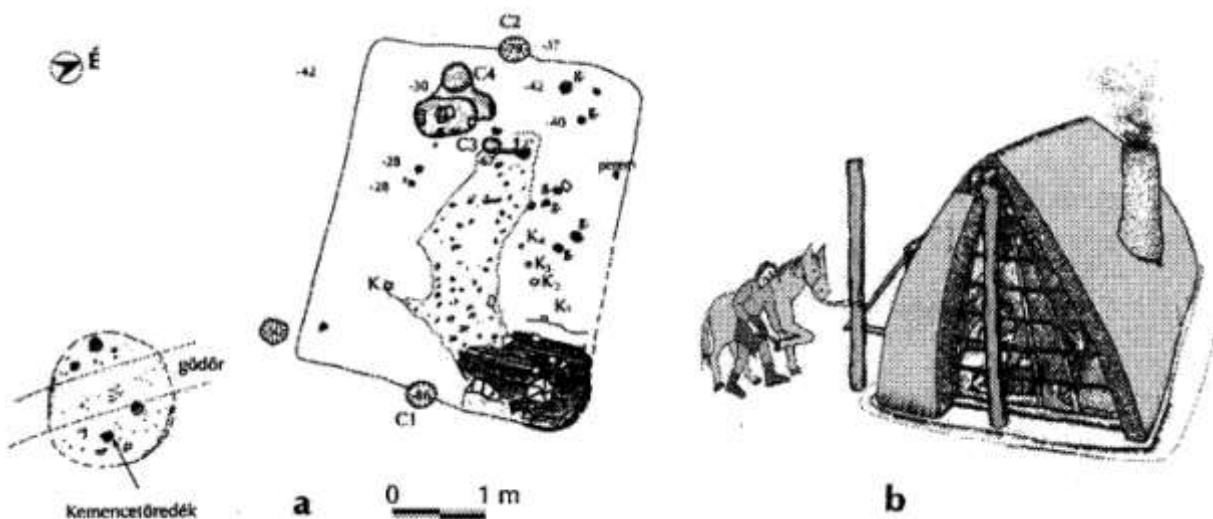
A kovácstűzhelyeknek, kovácműhelyeknek Európában a vaskohászat évezredes, változatos története alatt számos változata kialakult, helytől és időtől függően. Mindezek részletes bemutatása - beleértve a különböző kovácsolási technikákat - méretes szakkönyv kereteit is kitöltené (lásd Pleiner [2.28]). Mindamelllett a kovácstűzhelyek, kovácműhelyek azonosítása nehezebb, mint a bucakemencéké, kohóműhelyké – különösen az antik-barbár és korai középkori időszakban - lévén szabadon álló, általában különösebb jellegzetesség nélküli objektumok. A komplex vaskohászati telephelyek feltárásainál ez a nehézség fokozódhat azzal, hogy gyakran nem könnyű elkülöníteni az újraizzítás és a kovácsolás tűzhelyeit.

Az avar kori és Árpád-kori Kárpát-medencében a kovácműhelyeknek háromféle változatának működésére került elő bizonyíték.

- Felszínen kialakított, gyakran cölöpépítménnyel ellátott kovácműhely, nyílt, csak igen csekély mértékben földbe mélyített tűzhelyekkel (középső-késő avar kor, a honfoglalás koráig). Ezek a műhelyek gyakorlatilag a huzamosabb ideig, több,

egymással párhuzamosan működő bucakemencék alkotta kohótelepek „csatolt részüzemei” és technikailag is jól illeszthetők az ugyancsak szabadon álló nemeskéri típusú bucakemencéhez. A vas előállítása és feldolgozása tehát a teljes vertikum illyformán gyakorlatilag egy helyszínen történt.

- Gödörműhelyek, amelyek szabálytalan alakú, kisebb gödrökből álltak, körülöttük nincs épületre, építményre utaló nyom, mint például házrészlet, cölöp- vagy karólyuk, amely valamiféle felépített szerkezetre utal. Különbözik a nemeskéri kovácsműhely-elrendezéstől az is, hogy ezekben az esetekben a tűzhely(ek) a gödörműhely közepén található(k) és körülöttük, illetve a már nem használt tűzhelyekben a kovácssalakok. Nem lehet egyértelműen bizonyítani, hogy az említett helyszínek által a 9. századtól a 12. század első feléig datálható - a Cegléd melletti, 11-13. századi faluban is előkerültek ehhez hasonló kisebb műhelygödrök - időszakban működő műhelykonstrukciók idején a kovácsok és a kohászok munkája teljesen különvált-e, de az azért valószínűsíthető, hogy ezek a kovácsműhelyek a kohók közvetlen közelében dolgoztak, ugyanakkor más helyről származó alapanyagot is feldolgozhattak. Egyfajta sajátos, átmeneti műhelykonstrukcióról lehet szó, amely egyúttal a szakmai logisztikai átmenetet is jelenthetett a vaselőállítás és kovácsolás helyszíneit illetően.
- Nem egyértelműen megállapítható, hogy az említett átmenet csupán időbeni, vagy egyúttal technikai jellegű is, amely aztán az Árpád-kor lakóház formájú kovácsműhelyeibe, gödörműhelyeibe torkollott. A késő avar korszak nagyon száraz időszakai, majd az azt követő 10. századi csapadékos időjárás, illetve a honfoglalás korának nagyon hideg, fagyos telei nemcsak a lakóházak építésére, hanem a kovácsműhelyek kialakítására is hatással voltak. Az Árpád-kor uradalmi és falusi kovácsműhelyei egyértelműen kialakított építmények voltak, minden bizonnyal rendszerint, vagy legalább is gyakorta korábbi lakóházból kialakítva. Természetesen a méretet, elrendezést illetően helyi eltérések, sajátosságok lehettek, de az 5.54. képen látható hidegségi 12. századi kovácsműhely-rekonstrukciót modellértékűnek vehetjük.



(5.54. ábra) Kovácsműhely alaprajza (a) és rekonstrukciós rajza – Hidegség, 12. sz. [2.22]

5.3.8. Vastárgyak

A vas archeometallurgiájával kapcsolatosan a lelőhelyeken talált vastárgyak közül meg kell különböztetni egy kis csoportot, amelynek igen ritkán előbukkanó darabjai az alkalmazott technológiára vonatkozó információkat adhatnak. Ezek a kohósításnál, bucatömörítésnél, illetve kovácsolásnál használt szerszámok maradványai (lásd 3.8. és 3.11. ábrák). A vizsgálatok döntő többsége azonban az egyes vastárgyak anyagszerkezetére irányul, főként a következő kérdések vonatkozásában:

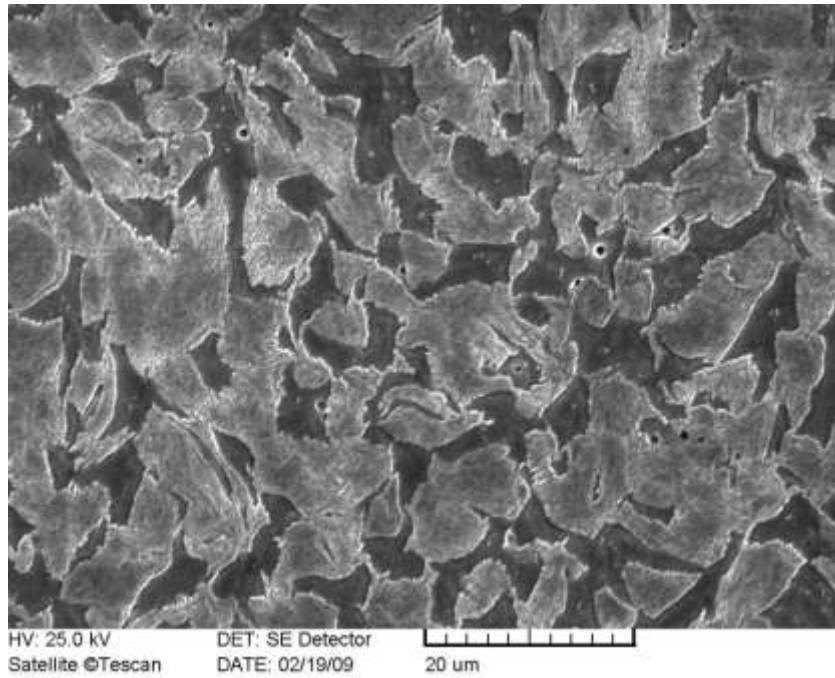
- Milyen alapanyag(ok)ból készült az adott tárgy?
- Milyen jellemző szövetelemek találhatók meg és milyen szerkezetben?
- Hogyan változik a tárgy anyaga a vizsgált metszeten belül?
- Felfedezhető-e készítés-, alakítástechnikára, esetleg hőkezelésre utaló nyomok?
- Azonos jellegű tárgyak esetén (pl. kések, nyílhegyek, stb.) lehet-e a tárgyakat anyaguk, illetve készítési módszerükre utaló mikroszerkezeti jellemzők szerint megkülönböztetni, csoportosítani?

A válaszokat a tárgyak komplex metallográfiai vizsgálatai során lehet kutatni. A miskolci ARGUM kutatócsoport egy-egy vastárgy teljes metallográfiai vizsgálatát röntgenes, optikai és elektronmikroszkópos – illetve az utóbbinál használt mikroszondás – és keménységvizsgálatok által végzi. Speciális esetben kivitelezhető reprodukált tárgyak (pl. kardok) mechanikai, szilárdsági tulajdonságainak vizsgálata is.

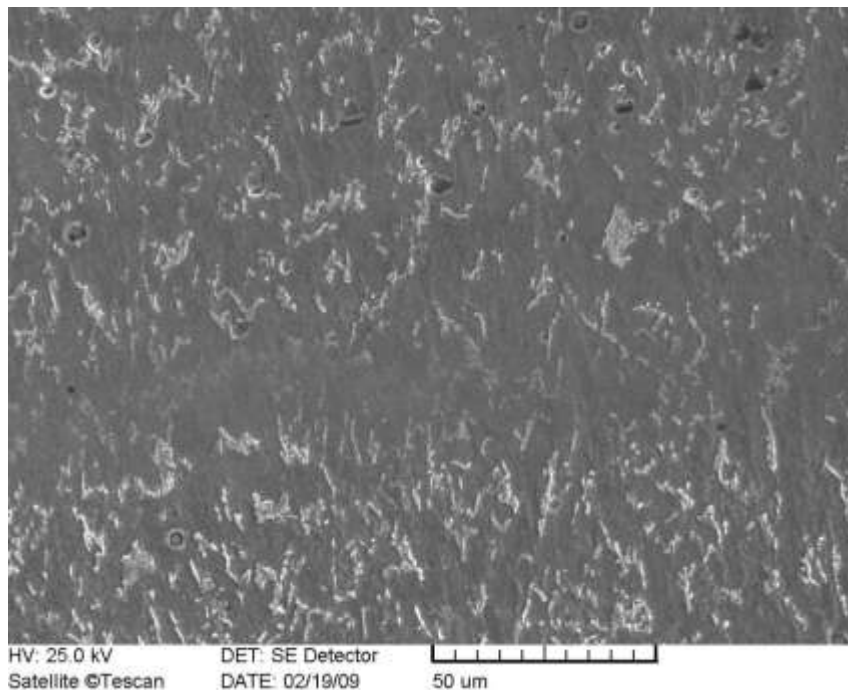
A vastárgyletek mikroszkópos vizsgálata által megfigyelhető mikroszerkezetek sokféleségét bemutatni egy forrásban szinte lehetetlen. A 3.4. fejezetben leírt, illetve a 3.17. – 3.25. ábrákon bemutatott példák jól reprezentálják a vizsgálatokat.

A korabeli vastárgyak általában 0.2%-nál kisebb karbontartalmú ún. lágyvasból, illetve 0.2-0.6% körüli karbontartalmú acélból készültek. A karbontartalom alapvetően a bucából eredt, a nagyobb alakítást elszenvedő, relatíve vékonyabb keresztmetszetű anyagrész könnyebb áthívhetősége miatt elméletileg közrejátszhat a kovácstűzhely faszenéből eredő karbon-diffúzió, de ez igen lassú folyamat, inkább csak kis határfokú elméleti lehetőség, mint gyakorlatilag meghatározó tényező. Sokkal inkább valószínű, hogy a korabeli kohászok meg tudták különböztetni a bucák karbonban (és foszforban) dúsabb, illetve szegényebb részeit, illetve a kovácsolási technikával módosítani tudták a szövetszerkezetben a karboneloszlást a későbbi használati célnak megfelelően, például az élek, hegyek kialakításakor [3.9].

Az elektronmikroszkópos képeken a ferrites és perlites (illetve néha a szekunder cementites) szövetelemek aránya, formája, elhelyezkedése tanúskodik a kovácsolt vas lassú vagy gyorsabb lehűléséről, illetve az alakítási hatásokról. Jó példa erre két, hasonló méretű, gyakorlatilag ugyanarról a helyről származó, avar kori kés esete. A tárgyak SEM-képein az egyiknél a ferritszemcsék között gyors lehűtésről árulkodó bainit-martenzit-elfajult perlites finom szemcseszerkezetet látható, kezdetleges bainit-tűkkel, alakítási nyomok nélkül (5.55. ábra), míg a másikon a lassú lehűlés és az alakítás egyértelmű nyomai figyelhetők meg, a néhol cementitben igen szegény, máshol durva perlites inhomogén szerkezetben (5.56. ábra).

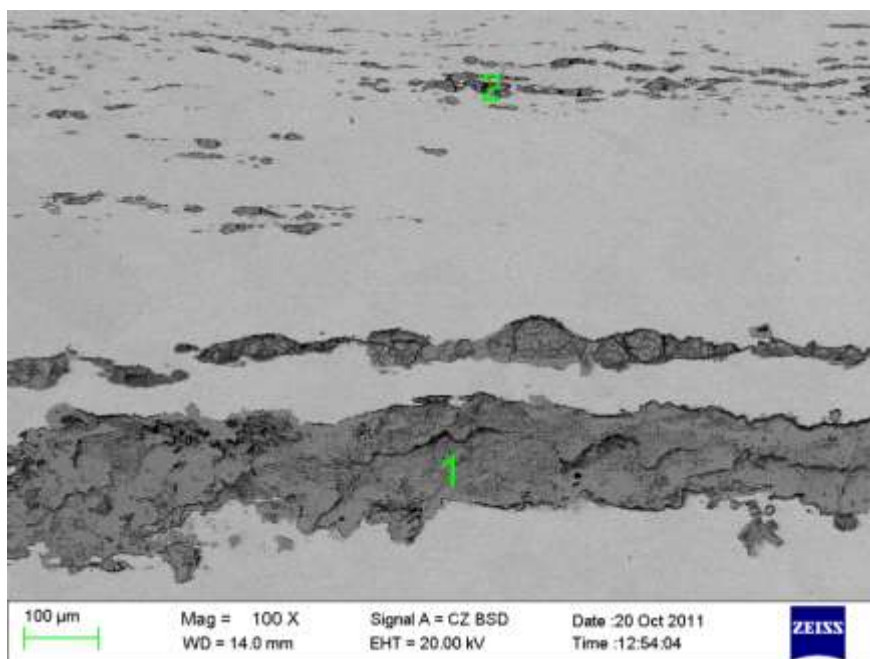


(5.55. ábra) Gyorsan lehűtött vaskés szövetszerkezete alakítási nyomok nélkül [5.5]



(5.56. ábra) Lassan lehűlt szövetszerkezet, alakítási nyomokkal [5.5]

Az alakítás irányával, módjával, illetve az esetleges réteges szerkezet kialakításával kapcsolatosan a salakzárványok alakja, elhelyezkedése, sűrűsége is hordoz információkat. Az 5.57. ábrán látható SEM-képen (a csiszolat a 3.12. ábra I. számú fibula-töredékéből készült) megfigyelhető a vastagabb rétegű, bezáródott reve (1) - gyakorlatilag vasoxid – és több, kisebb, sorbarendeződött szétlapított foyalitos salakzárvány (2).



(5.57. ábra) Zárványok kelta kori fibula SEM-képén [3.9]

A réteges szerkezet kapcsán meg kell különböztetni egyazon alapanyagból készült – csak a kovácsolás során többször hajtogatott – illetve többféle minőségű anyagból, kovácshegesszel készült tárgyakat. Utóbbival kapcsolatosan célszerű tisztázni a különbséget a damaszkuszi acélként ismert anyag és a damaszkolás, mint technológia között. Előző esetében a pengéket állandó karbon tartalmú, hipereutektoidos ($C > 0,8\%$) anyagból készítették, a felületi mintázatot a maratás után megjelenő, töredezett szekunder cementit háló eredményezte, a damaszkolásnál pedig többféle, különböző karbon tartalmú vasat, illetve a korábban említett foszforvasat használtak. A foszforvasakat a kis karbon tartalmú acélhoz képest valamivel nagyobb keménységük, illetve a szénacélhoz képest a képlékeny hidegalakítás hatására nagyobb mértékű felkeményedésük miatt bekovácsolt vágóélként, jó korrózióállóságuk miatt pedig díszítő céllal használták, általában damaszkolt kés- vagy kardpengéknél [5.34, 5.36].

5.4. A középkori bucakemencés eljárás technikája, jellemző folyamatai

A bucakemencés eljárás a vas archeometallurgiájában sarkalatos szerepet tölt be. Az eljárás elmélete és gyakorlata az egyik legintenzívebb kutatási terület az archeometallurgiában. Számos rekonstrukciós kísérlet sorozat történt már a témában Európán szerte, illetve tudományos, ismeretterjesztő, hagyományörző céllal bemutatókkal egybekötött szimpóziumokat, rendszeres szakmai találkozók is szerveznek a kontinensen. A jegyzet zárófejezete az eljárás egyes technológiai lépéseit, fizikai, kémiai, metallurgiai folyamatait mutatja be, alapvetően az ún. „fajszi” típusú bucakemencét – mint a legelső ismert, magyar kohászok által használt kemencét – és a benne történő kohósítás rekonstrukcióját véve példaként. Természetesen az egyes leírt paraméterek „történelmi hűsége” nem garantált, de a minél nagyobb számú, műszeres mérésekkel, műszaki vizsgálatokkal kombinált rekonstrukciós kísérletek egyre közelebb vihetnek az ősi eljárás feltérképezéséhez, megértéséhez.

1. Faszén készítése

Bár a faszénégetés nem tartozik közvetlenül a bucaeljáráshoz, mégis sarkalatos fontosságú, nagy mennyiségben használt alapanyagként készítését rendszerint a kohók helyszínén, vagy közvetlen környezetében végezték. A faszénégető boksák régészeti feltárásokon talált nyomai alig adnak valami támpontot a faszénégetés írásos vagy rajzi emlékei előtti idők technikájáról. Mindazonáltal a módszer alapelve a hosszú évszázadok alatt változatlan maradt. Az avarral (vagy földdel) és agyaggal borított boksák résein távozó füst jellege, színe alapján – a folyamat kezdetének, sűrűbb, fehér füstje idővel átlátszóbbá, halványkékessé változik – illetve a felszínén távozó, meggyújtható gázok lángjának halványulásából tapasztalati úton tudott következtetni a folyamat előrehaladottságáról a korabeli szénégető. A boksában gyakorlatilag a fa száraz lepárlása történik, de a levegő oxigénjétől nem teljesen elzárt térben, hanem a befedett boksán réseket, felül kisebb kürtőt hagynak. Éppen a kis mennyiségben a boksa belsejébe bejutó levegő által tud a folyamatosan képződő faszén elizzása hőt termelni, amely fedezi a fa nedvessége endoterm eltávolításának hőigényét. Az exoterm folyamat kezdetét jelző hőmérsékletnél fokozatosan csökkentendő a bejutó levegő mennyisége. A termikus bomlás alatt képződött CO és szénhidrogének elillannak a boksa felületén keresztül. Amikor ez teljesen lezajlott, a boksa füstölése megszűnik, azt szét lehet bontani, úgyelve az öngyulladás elkerülésére.

A faszénégetés vizsgálatánál a boksa különböző pontján hőmérsékletmérés, annak naplószerű-hőterképszerű adatkezelése, illetve különböző időpontokban és helyen vett gázminták elemzése és kiértékelése történhet.

Természetesen ennél a tevékenységnél fokozottan érvényes volt az empirikus megfigyelések eredményezte szakmai rutin. Az I. videofilm faszénégető boksa építéséről és faszén készítéséről, illetve a boksában lezajló folyamatokról szól.

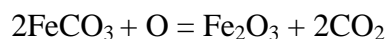
(I. video) Rekonstruált faszénégetés

2. Gyepvasérc gyűjtése, érc előpörkölés

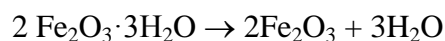
A gyepvasércek jellegéről korábban már esett szó. Az általában nagyobb méretű érckoloncokat pörkölés előtt zúzni, aprítani, erősebb földszennyeződés esetén tisztítani érdemes.

A korai középkori bucakemencék műhelyében rendszerint megtalálhatók voltak az ércpörkölő gödrök nyomai, tehát bevett korabeli technológiai lépésről van szó. Az érc 400-800 °C-os hőmérsékleten történő előpörkölése során – amelyet az értékes faszén helyett rendszerint fával végeztek – az érc fizikailag, majd kémiaiilag kötött víztartalma távozott, illetve előredukció is történhetett.

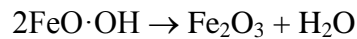
Karbonátos ércек esetén az előpörkölés elkerülhetetlen volt a



reakció alapján. A kémiaiilag kötött víz a limonitból 550 °C körüli hőmérsékleten



a goethit pedig



reakció alapján bomlik fel. Az ércpörkölő gödörben keletkezett hematit fizikai átalakuláson megy át, porózusabb szerkezetű lesz és reakciókinetikailag mód van kéesszürke magnetit Fe_3O_4 keletkezésére is, amely gyakorlatilag a vasoxid redukciójának első lépése. A pörkölés után a rekonstrukciós tapasztalat és a leletek tanúsága szerint az ércet 1-2 cm-es darabokra kell törni a hatékony kohósításhoz.

Az ércgyűjtésről, illetve az ércpörkölés rekonstrukciójáról a II. video számol be. Ebben a munkafázisban az érc ásványi és kémiai összetételének mérése – pörkölés előtti és utáni – illetve a pörkölés okozta szilárdsági változások vizsgálata történhet.

(II. video) Gyepvasérc gyűjtése és előpörkölése

3. Kohóépítés

Rekonstruált bucakemence építéskor néhány tényezőt a kísérleti tapasztalat befolyásol. Ilyen például a kemencefalazat anyaga; a helyi – vagy a környéken általában vízmosások mentén kiásható – agyag minőségétől, „zsírosságától” függően kell azt homokkal keverni, „soványítani”, ha erre szükség van. A keveréknek jól formázhatónak, de ugyanakkor nem túl lágynak kell lennie. Tapasztalat szerint egy-egy maréknyi adagot vízzel csak annyira kell megnedvesíteni, amennyire a hozzátapadás még éppen biztosítva van. A túlságosan vizes agyagkeverék nem tud olyan gyorsan száradni, hogy megfelelő tartása legyen a falnak. A kohót a medence kitapasztásával érdemes kezdeni és felfelé haladni. A falvastagság lentől felfelé haladva fokozatosan, enyhén csökken 3-4 cm-ről 2-2.5 cm-re. A homlokfal kialakításánál ügyelni kell, hogy az akna csonkakúp formája, nagyjából kör keresztmetszete ne törjön meg, mert a kiálló részek, belső üregek kohósításkor a betétanyag süllyedését akadályozhatják. A mellnyílást beillesztett fatuskóval, illetve annak körbetapasztásával lehet kialakítani. A fajszi típusú kemence tipikus méreteiről, formájától az 5.2.1. fejezetben esett szó.

Építéstechnikailag mind a szabadon álló, mind a műhelyfal oldalába mélyített bucakemence építésének megvannak a nehézségei. Előző esetben a formálódó és szikkadó kemencetestnek meg kell tartani saját súlyát, formáját, míg utóbbinál ebben segíthet a támfal, de lazább föld esetén a hozzátapasztott kemencefal könnyen elválhat a kiégetés alatt. A készre formált kemence kiégetése fokozatosan, fával való tüzeléssel történik, ügyelve a teljes, de lehetőleg repedésmentes kiszáradásra. A kemence teljes kiégetése 10-12 órán át tart. A kiszáritáskor keletkező kisebb repedéseket érdemes rögtön betapasztani, a kohósításkor jóval melegebb falazaton keletkező repedések már nehezebben javíthatók friss agyaggal.

Külön kérdés a mellfal kialakítása. A régészeti leletek inkább azt sugallják, hogy „előregyártott”, előre kiégetett panelekkel dolgoztak - amelyek közepén kiégetés előtt lyukat formáztak a fűvókának - majd illesztették és tapasztották be a mellnyílásba. A rekonstrukciós kohósítások alkalmával a mellfalat egyszerűbbnek mutatkozott eleve a már tartós falú kemence mellnyílásába felépíteni alulról felfelé, vagy körkörös befelé haladva, a kemencefaltól vékonyabb falvastagsággal, ügyelve a fűvókának szánt lyukra.

A fúvókák formázási technikájára a régészeti leletek adnak útmutatást, belső felületükön ugyanis gyakran felfedezni a formázáshoz használt bot, vastagabb nád nyomait. Lehet úgy is készíteni, hogy kiégetés előtt a formázóbotot kihúzzuk belőle, amely ügyességet igényel, de így biztos, hogy a kiégetés után nem szorul bele annak nehezen eltávolítható, szenes maradványa. A fúvóka formázásakor ügyelni kell annak egyenességére, enyhén tölcséres kiképzése pedig némi védelmet nyújthat a fűjtató folyamatos ütődése ellen, illetve könnyebb csatlakozása érdekében. Egyes ásatás (pl. Somogyfajsz) tanúsága szerint jóval több fúvókát készítettek, mint amennyit felhasználtak. A rekonstrukciós kohósítások alkalmával rendszerint egy olvasztás alatt egy fúvókát használunk el – amely a kohósítás alatt gyakorlatilag összesül a mellfallal – ügyelve, hogy a keletkező folyósalak ne tömje el.

A fajszi típusú bucakemence építésének, fúvóka és mellfal készítésének technikáját a III. video mutatja be.

(III. video) Kohóépítés, fúvóka és mellfal készítése

4. Kohósítás

A bucakemencével történő kohósítás technológiai lépéseinek megfogalmazásánál egyfajta interdiszciplináris gondolkodásmódot érdemes követni, amely – a nagyszámú, sikertelen próbaolvasztás tükrében – koránt sem egyszerű feladat. A régészeti leletek, illetve azok komplex archeometallurgiai vizsgálatai által szolgáltatott, mai modern műszaki és természettudományos ismereteink által feldolgozott információk a jelek szerint kezdetben nem feltétlenül elegendőek ahhoz, hogy biztonsággal állíthassuk, részleteiben is tudjuk és reprodukálhatjuk a régi idők vaskohászati technológiáját. Ne felejtjük el, hogy a korabeli kohások gyakorlatilag nem rendelkeztek az említett, újkori ismeretanyaggal, viszont rendelkezettek olyan – empirikus alapú – életmódból is eredő, természet közeli tapasztalattal, rutinnal, amely viszont a ma szakemberének tűnik elérhetetlennek, már-már misztikusnak. Hazánkban, európai mércével mérve, igen kevesen végeztek rekonstruált korai középkori kemencében próbaolvasztásokat tudományos vizsgálati jelleggel [2.2, 2.22, 5.37, 5.38].

A kohósítás technológiai lépései (hangsúlyozandó, hogy az egyes rekonstrukciós kohósítás alatt a paraméterek lényegesen eltérhetnek):

- A kemence felfűtése: a fával történő kiégetés után 1-3 cm-esre tört faszénnel töltik fel és közepes intenzitású fűjtetés mellett tüzelnek mindaddig, amíg a faszénoszlop átizzik, illetve kialakul a megfelelő redukáló atmoszféra. A teljes felfűtéshez mintegy 8-10 kg faszén szükséges, amelyből 1-2 kg az első ércadag előtti pótlás. Az indirekt redukcióhoz szükséges CO (reakciókat lásd később) megjelenését jelzi, ha a torokgáz begyűjthető.
- Érc és faszén adagolása: a felfűtött kemencébe felváltva adagolnak előpörkölt gyepvasércet és faszenet. Egy kohósítás alkalmával összesen 8-15 kg érc adagolása történik, 0.4-0.6 kg-os adagokban. Az ércadagokat lehet közvetlenül kevés faszénnel keverni, de egy-egy ércadag után mindig faszén következik. A kohósítás fajlagos faszénfelhasználása aránylag széles skálán mozog: 0.5-2.5 kg/kg pörkölt vasérc. Az adagolás alatt mindvégig közepes intenzitású fűjtetés történik. Az elegyoszlop süllyedésével az egyes adagok között mintegy 8-12 perc telik el, kezdetben valamivel kevesebb, majd a salakképződés beindulása okozta nehezebb levegő-átjárhatóság miatt

valamivel több. Régóta kérdés a korhú eljárás szempontjából az adalékanyagok használata. Bizonyos érceknél fahamu és homok keverékéből álló salakképző kedvező hatású, illetve nagy foszfortartalmú vasércnek kohósításakor apróra tört mészkő adagolása alacsonyabb foszfortartalmú bucát eredményez. A teljes kohósítandó ércmennyiség általában 4-5 óra alatt kerül a kemencébe.

- Salak-kezelés: az első ércadag beadagolását követően, általában 2-4 óra elteltével a megolvadt és a medencében összegyűlő salak szintje elérheti a fúvóka magasságát, amit a fújtatás mélyebb hangjának magasabbá, sivítőbbá válása, illetve az elegyoszlop - a fújtatás ütemében pulzáló toroktűz intenzitás csökkenése által észlelhető - nehezebb átjárhatósága jelez. Ekkor a mellfal aljának közepén kialakított – általában vékony vasrúddal ütött – nyíláson át a keletkezett folyósalakot le kell csapolni a kemence előtti sekély salakfogó gödörbe, különben a fúvókába jutva és ott megdermedve könnyen megakaszthatja a fújtatást. A betétanyagtól és a technikától függően akár 15-20 percenkénti salakcsapolás is szükséges lehet. A csapolás után a salakcsapoló nyílást kevés friss agyaggal újra betömik. Mindehhez gyakorlati tapasztalat sem árt, egyrészt a salakcsapolás szükségessége, másrészt a gyors végrehajtás miatt, ugyanis a csapolás alatt a fújtatás szünetel.
- Az elegyoszlop tömörödése a fúvósíkban: általában mintegy 3-4 órával az első ércadag behelyezése után már bucakezdemény formálódik a fúvósíkban, amelyet a fúvókán át benyújtott vékony vasrúddal ki is lehet tapintani, illetve célszerű a lehetőségekhez képest tömöríteni. Az utolsó adag érc beszórása után a fújtatás intenzitása fokozandó, hogy magasabb hőmérsékleten minél nagyobb mennyiségű salak elválasztódhasson a bucától. A régészeti leletek nem szolgáltatnak információt arról, hogy hány fújtatóval történt egyszerre a fújtatás. Tapasztalatok szerint a kétfújtatós megoldás (5.58. ábra) önmagában nem jelent magasabb kemencehőmérsékletet az egyfújtatóséhoz képest, sokkal inkább a fújtatás gyorsasága mérvadó. A kohósítás teljes időtartama 5-7 óra, de bizonyos esetekben akár 8-10 óra is. Előfordul, hogy a salakolvadék okozta problémák miatt – gátolja a fújtatást – az elegyoszlop ideális tömörödése előtt kell abbahagyni a kohósítást.



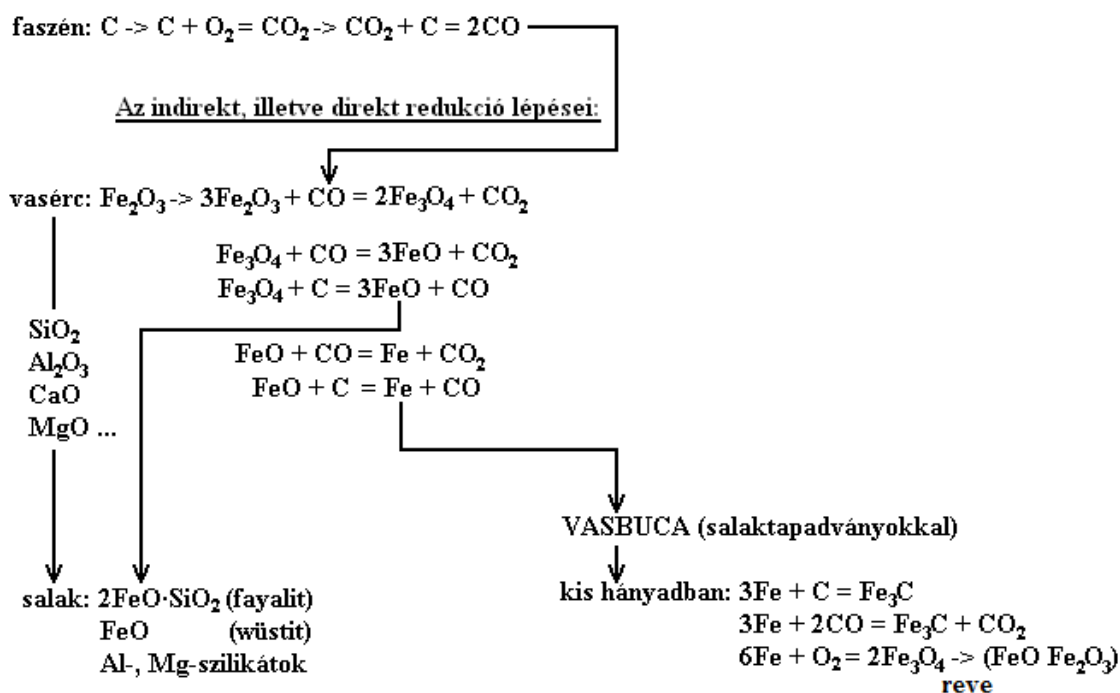
(5.58. ábra) Kettős fújtatás nemeskéri típusú, reprodukált bucakemencével elvégzett próbaolvasztáson – Sopron 1992. [5.37]

- A mellfal kibontása, a vasbuca kiemelése: a ráutaló jelek alapján (a fújtatás hangja, a toroktűz intenzitásának csökkenése, a buca kitapinthatósága), vagy esetleg az előbb említett kényszerűség által vezérelve, a kohósítás leglátványosabb mozzanata a mellfalazat kitörése és a buca fogóval történő kiemelése a kemencéből, az utolsó, vékony rétegnyi izzó faszén alól, illetve a kemencesalak darabok közül. Az salaktapadványoktól erősen csipkézett, izzó bucát lehetőleg minél gyorsabban kell a kemencéből kiszabadítani és a tömörítő tuskóra helyezni.

A IV. video a kohósítás mozzanatait mutatja be. A korai középkori fújtatók fa és bőr konstrukcióiból természetesen semmi nem maradt meg az évszázadok során, korabeli ábrázolás, utalás sem áll rendelkezésre. A filmen látható fújtató és az azt mozgató faszerkezet a legkorábról rendelkezésre álló – késő középkori, kora újkori - metszetek alapján készült. Elképzelhető, hogy a korai középkorban bőrből készült egyszerű hólyagfújtatókat (is) használtak [2.27].

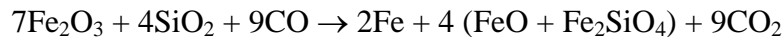
(IV. video) Kohósítás rekonstruált bucakemencében

A bucakemencében lejárló folyamatokat az 5.59. ábra foglalja össze. A bucakemence metallurgiája valójában igen összetett, bonyolult, mindemellett természetesen nem áll rendelkezésre a modern nyersvas- és acélmetszetek berendezéseinek szokásos műszeres felszereltség. Ugyanakkor a korhűségre törekvő rekonstrukciós kísérletek rapszódikussága is gátló tényező a részletek kiderítésében. Az alapvető folyamatok megértését laboratóriumi modell-kísérletek segíthetik.

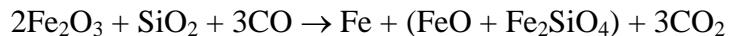


(5.59. ábra) A bucaeljárás alapvető folyamatai, reakciói [5.39]

Az ábra szemlélteti az érc vastartalmának megoszlását a kohósítás folyamán; egyik része fémmé redukálódik, a másik része (FeO formájában) a salakba kerül, ahol nagyrészt a SiO₂ köti meg. Ezt az alapvető körülményt – a SiO₂ meghatározó szerepét - figyelembe véve összevont reakcióegyenlet is felírható, az érc 57%-os vastartalma és 17.6%-os SiO₂-tartalma mellett Buchwald szerint



58.9% vastartalmú és 15.8% SiO₂-tartalmú érc esetén pedig



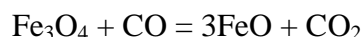
formában, előzőnél 14.3%-os utóbbinál 25%-os elméleti vaskihozattal [2.29].

A kemencébe fújtatott levegő elegendő oxigént biztosít, hogy a faszén karbonjának teljes égésekor a medence hőmérsékleti viszonyai (1200-1350 °C) közepette nem stabil CO₂ keletkezzen. A CO₂ felfelé áramolva oxigénszegényebb atmoszférában, az izzó faszén karbontartalmával CO-ot képez a Boudouard-reakció értelmében. Bár a C-O egyensúlyi rendszer szerint a relatív CO-arány

$$(\text{CO}\%)' = ((\text{CO}\%) / (\text{CO}\% + \text{CO}_2\%)) \cdot 100\%$$

értéke a bucakemence aknájának felső, 500-600 °C hőmérsékletű zónájában mindössze 10-15% lenne, a valóságban a kemence fűvósíkjának közelében kialakuló CO-dús atmoszféra gyors felfelé áramlása – a kemence jó átjárhatósága – miatt is 80% körül van.

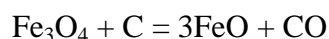
A torokban (t_≈300 °C) és az akna felső zónájában történik meg a hematit (Fe₂O₃) redukciója, magnetitté (Fe₃O₄) majd az akna 700-900 °C-os középső zónájában a magnetit redukciója wüsztté (FeO). Az elegy süllyedésével a 700 °C feletti hőmérsékletű zónában a CO-dal végbemenő indirekt redukciónál termodinamikailag előnye van a C-os direkt redukciónak. A magnetit direkt redukciójának nagy része azonban a faszén és a gypvasérc szilárd felületeinek érintkezési korlátai miatt nem közvetlenül, hanem a CO közvetítésével mennek végbe az



indirekt reakció és a belőle keletkező, nem stabil CO₂-nak és a faszén karbonjának az említett Boudouard-reakció alapján történő



folyamat bruttó reakciójaként, az



reakcióegyenlet szerint [5.40].

A direkt redukció aránya adott hőmérsékleten attól függ, hogy mennyire stabil a CO₂ a Boudouard reakció szerint. Elméletileg ez azt jelenti, hogy 1000°C felett, az akna alsó részében, kizárólag direkt redukció mehet végbe, de az akna annak középső zónájában

mindkét redukciós folyamat lépései lejátszódhatnak egymás mellett. Az akna alsó részében ($t=900-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) az érc wüstitjének termodinamikailag és reakciókinetikailag redukálható hányadának zöme fémes vassá alakul. A maradék – még mindig jelentős hányadú – FeO az érc többi oxidjával salakot képez, amely csaknem teljesen lecsökkenti az ércszemcséken a redukció reakciófelületét. A medence $1100-1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletű zónájában azonban a zömében fayalitos salak viszkozitása annyira lecsökken, hogy elfolyva a kialakult vasszemcsék érintkezhetnek és összehegedhetnek. A salakban relatíve nagy mennyiségben lévő FeO direkt redukciója elméletileg lehetséges a folyékony salak és a faszén határfelületén, de a gyakorlatban ennek nincs lényeges jelentősége a formálódó buca szempontjából, ugyanis a kis reakciófelületen esetleg képződött vasszemcséket az salak elsodorja a buca közeléből.

A bucakemencében végbemenő metallurgiai folyamatokat az 5.1. animáción lehet követni. Mindezen a folyamatok ideális végbemenetelére relatíve hosszú időre volna szükség, amely viszont a folyamatos fűjtetés közben intenzíven süllyedő elegyszlop miatt nem áll rendelkezésre. Erre elvileg megoldás lehet a kohómagasság növelése, de az egyúttal intenzívebb fűjtatást is igényel. Viszont a túl intenzív fűjtatás okozta hőmérsékletnövekedés hatására megnő a salakba kerülő FeO aránya így romlik a vaskihozatal.

(5.1. animáció) Metallurgiai folyamatok a bucakemencében

Rekonstrukciós kohósítás alkalmával számos vizsgálati lehetőség adódik. A kemence hőmérsékletprofiljának felvázolása mellett gázösszetétel méréseket érdemes végezni, illetve anyagmérlegeket felállítani. A laboratóriumi kísérletek alkalmával a redukciós folyamatok reakciókinetikai jellemzői tanulmányozhatók.

5. A vasbuca tömörítése és előkovácsolása

A bucakemencéből kiemelt, salakos tömböt fatuskón megtartva, fakalapácsokkal tömörítik, illetve salaktalanítják. Ez a gyors, zárófolyamat igen fontos a jó minőségű végeredmény szempontjából, mivel a szilárd, de néhány percig még képlékeny fémes vas részek közül lehetőleg minél több salakot kell kiszorítani úgy, hogy az anyag tömörebb legyen, ugyanakkor közben az esetleges túl erős ütések hatására ne törjön darabokra. A bucat újraizzító tűzhelyen történő többszöri hevítés után tovább lehet tömöríteni, ezúttal már vaskalapácsokkal. Ez már gyakorlatilag a vasbuca előkovácsolása is, amelynek terméke $1-2\text{ kg}$ -os kocka vagy hasáb alakú tömör, alacsony karbontartalmú, revés (oxidos) felületű vasdaráb, amely egyáltalán nem mentes a belső salakzárványoktól. Mivel mindez $8-15\text{ kg}$ érc kohósításából származik, látható, hogy a bucaeljárás igen alacsony termelékenységű, általában $10-15\%$ -os érckihozatalú. Az említett folyamatokat az V. video mutatja be.

(V. video) A vasbuca tömörítése és előkovácsolása

Az 5.3. táblázat összegzi a direkt úton történő vaskohászat (bucaeljárás) alapvető tevékenységeinek jellemzőit.

Tevékenység	Elsődleges cél	Építmény, felszerelés,	Alapanyag	Termék	Melléktermék	Atmoszféra
Előpörkölés	Az érc fizikailag és kémiailag kötött víztartalmának eltávolítása, állagának lazábbá tétele	ércpörkölő gödör	gyepvasérc, fa	pörkölt érc	fahamu, meddő darabok	alapvetően oxidáló
Kohósítás	Az érc vasoxid tartalmából fém vas előállítása	bucakemence, fűvóka, fűjtató	előpörkölt vasérc, fa, faszén, esetleg homok, fahamu és/vagy mészke	salakos vasbuca	salak (nagy mennyiségben)	redukáló
Tömörítés	A buca salaktalanítása és kovácsolásra alkalmas alapanyaggá tömörítése	újraizzító tűzhely	salakos vasbuca, faszén, homok	tömör vaskocka, vashasáb	salak (kisebb mennyiségben), reve	oxidáló
Kovácsolás	Félkész termék és késztermékek kialakítása	kovácstűzhely	tömör vaskocka, vashasáb, faszén, homok	vaseszközök, vastárgyak	salak (még kisebb mennyiségben), reve	oxidáló (esetleg enyhén redukáló)

(5.3. táblázat) A bucaeljárás tevékenységeinek jellemzői

6. IRODALOM

- [2.1] Lósy-Schmidt E.: Az Országos Magyar Műszaki Múzeum és a műszaki muzeális gyűjteményügy fejlődése hazánkban. Budapest, 1941. p. 19.
- [2.2] Heckenast G. – Nováki Gy. – Vastagh G. – Zoltay E.: A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968.
- [2.3] Kubinyi F.: Magyar- és Erdélyország képekben. Pest, 1854. III. kötet. p. 114.
- [2.4] Kubinyi F.: Magyarországon talált kő- és bronzkori régiségek. Archeologiai Közlemények 2, 1861. p. 81-113.
- [2.5] Majláth B.: A bronz korszak. Archaeologiai Értesítő 5, 1871. p. 153-157.
- [2.6] Nyári J.: A pilini régiségekről. Archaeologiai Értesítő 3, 1870. p. 125-129.
- [2.7] Nyári J.: A bronzcultura Magyarországon. Archaeologiai Értesítő 5, 1871. p. 281-282.
- [2.8] Hampel J.: A bronzkor emlékei Magyarhonban I-III. Budapest, 1886-1896.

- [2.9] Szabó G.: A Kárpát-medencei archaeometallurgiai kutatások eredményei, aktuális kérdései a 21. század elején, különös tekintettel a bronz- és vasgyártás társadalmi hátterének változásaira. *Archeometriai Műhely* 2012/2, p. 75-96.
- [2.10] Kubinyi M. ifj.: Krasznahorkai bronz-lelet. *Archaeologiai Értesítő* 12, 1892. p. 151-161.
- [2.11] Latinák Gy.: A vajdahunyadi m. kir. vasgyár és tartozékai I-IV. *Bányászati és Kohászati Lapok* 39, II. köt. 1906. p. 3, 7.
- [2.12] Papp K.: A magyar birodalom vasérc és kőszénkészlete. Budapest, 1915. p. 392-393.
- [2.13] Miske K.: A velem-szentvidi őstelep; Konegen Kiadó, Wien, 1907.
- [2.14] Miske K.: Bergbau, Verhüttung und Metallbearbeitungswerkzeuge aus Velem – St. Veit (Westungarn). *Wiener Prähistorische Zeitschrift* 18, 1929. p. 81-94
- [2.15] Miske K.: Bronzkori typologia I. *Múzeumi és Könyvári Értesítő* 6, 1912. p. 77-97.
- [2.16] Miske K.: Bronzkori typologia II. *Múzeumi és Könyvári Értesítő* 7, 1913. p. 8-24.
- [2.17] Rempert Z. – L. Kiss K.: A Kohászati Történeti Bizottság alapítása és tevékenysége. *Öntödei Múzeumi Füzetek* 20, Budapest, 2011.
- [2.18] Ilon G.: A tudományok együttműködése a góri feltáráson – Interdisciplinary collaboration of sciences at the Górány excavations. *Iparrégészeti és Archeometriai Tájékoztató*, 9, 1991. p. 12.
- [2.19] Szabó G.: Evaluation of late Bronze Age Carpathian tinbronzes based on the alloying content. In: Költő, László – Bartosiewicz, László (eds): *Archaeometrical research in Hungary II*. Budapest 1998. p. 159–173.
- [2.20] Gömöri J. - Török B.: Technical Examination of the Early Medieval Ferrous Metallurgical Finds from Hungarian Sites; In: Jerem E., T. Biró K. (Eds.) *Archaeometry 98, Proceedings of the 31st Symposium, Budapest (1998)*, *Archaeolingua, British Archaeological Reports (BAR) International Series 1043 (II)*, Oxford, 2002. p. 375-381.
- [2.21] Heckenast G.: A magyarországi vaskohászat története a feudalizmus korában; Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- [2.22] Gömöri J.: Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannoniában (Magyarország iparrégészeti lelőhelykatasztere I. Vasművesség); Sopron, 2000.
- [2.23] Szabó G.: A dunántúli urnamezős kultúra fémművessége az archaeometallurgiai vizsgálatok tükrében. *Specimina Electronica Antiquitatis – Libri*, 1., Pécs, 2013.
- [2.24] R. F. Tylecote.: *A History of Metallurgy*. Second Edition, The Institute of Materials, London, 1992.
- [2.25] C. Renfrew – P. Bahn: *Régészet – elmélet, módszer, gyakorlat*. Osiris Kiadó, Budapest, 2005.
- [2.26] J. Bayley – D. Crossley – M. Ponting: *Metals and Metalworking – A research framework for archaeometallurgy*. Historical Metallurgy Society. Occasional Publications No 6, 2008.
- [2.27] R. Pleiner: *Iron In Archaeology – The European Bloomery Smelters*. Archeologický ústav AV ČR, Praha, 2000.
- [2.28] R. Pleiner: *Iron In Archaeology – Early European Blacksmith*. Archeologický ústav AV ČR, Praha, 2006.

- [2.29] V. F. Buchwald: Iron and steel in ancient times. *Historisk-filosofiske Skrifter* 29, The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen, 2005.
- [2.30] V. F. Buchwald: Iron, steel and cast iron before Bessemer. *Historisk-filosofiske Skrifter* 32, The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen, 2008.
- [2.31] C. A. Papalas: Bronze Age Metallurgy of the Eastern Carpathian Basin: A Holistic Exploration. PhD. Dissertation, Arizona State University, 2008.
- [2.32] P. T. Craddock: Early metal mining and production. Edinburgh University Press; Smithsonian University Press, Edinburgh, Washington, DC, 1995.
- [2.33] M. Pollard - C. Heron: *Archaeological Chemistry*. Cambridge, 1996.
- [2.34] S.L. Olsen: *Scanning Electron Microscopy in Archaeology*. British Archaeological Reports International Series 452. 1988.
- [3.1] S. Macready – F. H. Thompson: *Archaeological field survey in Britain and abroad*. London, 1985.
- [3.2] S. Gerrard: The early south-western tin industry. in P. Newman (ed): *Mining and Metallurgy in South-West Britain*. Historical Metallurgy Society. 1996. p. 67-83.
- [3.3] A. Mills – J. McDonnell: The Identification and Analysis of the Hammer Scale from Burton Dassett, Warwickshire. *Ancient Monuments Lab Rep 47/92*. English Heritage, London, 1992.
- [3.4] J. Bayley – D. Dungworth – S. Paynter (eds.): *Archaeometallurgy*. Centre for Archaeology Guidelines. English Heritage, London, 2001/1.
- [3.5] M. J. Aitken: *Science-based Dating in Archaeology*. Longman, Harlow, 1990.
- [3.6] Gömöri J.: A 9-10. századi vaskohászat. In Kovács L. (szerk.): *Honfoglalás és régészet*. Balassi Kiadó, Budapest, 1994. p. 259-269. XV-XVI. tábla
- [3.7] Török B.: A Cegléd 4/14.; 4/17. és 4/19. számú Árpád-kori lelőhelyekről származó vassalakok és vastöredékek műszaki vizsgálata; *Studia Comitatus* 31., Régészeti Tanulmányok (Szerk.: Rajna András), Pest Megyei Múzeumok Igazgatósága, Szentendre, 2011. p. 444-450.
- [3.8] Kalácska R.: A vasművesség emlékei Cegléd határában; *Studia Comitatus* 31., Régészeti Tanulmányok (Szerk.: Rajna András), Pest Megyei Múzeumok Igazgatósága, Szentendre, 2011. p. 410-430.
- [3.9] Török B. – Kovács Á - Barkóczy P. – Kristály F.: Ordacsehi-Csereföld kelta településéről származó vassalak és vastárgyak anyagvizsgálata és készítés-technológiai vonatkozásai. *Materials testing and production technology investigation of iron tools and slag from a Celtic settlement of Ordacsehi-Csereföld*. *Archeometriai Műhely* 2013/X./1. Budapest, p. 23-32.
- [3.10] Török B. – Kovács Á: Kora középkori gepida kard archeometallurgiai vizsgálata. *Archaeometallurgical investigations of an Early Medieval Gepidic sword*; *Archeometriai Műhely* 2011/VIII./4. Budapest, p. 337-343.
- [4.1] C. Renfrew: *A civilizáció előtt*. Osiris Kiadó, Budapest, 2006. p. 21.
- [4.2] Horváth L. A. – M. Virág Zs.: A rézkor. In: Visy Zsolt et al.: *Magyar régészet az ezredfordulón*. Budapest. 2003. p. 124.

- [4.3] Hésiodos: Erga kai hémerai. Munkák és napok. Ford.: Trencsényi-Waldapfel Imre, Akadémiai Kiadó, Budapest 1955.
- [4.4] H. H. Coghlan: Notes on the prehistoric metallurgy of copper and bronze in Old World. Pitt Rivers Museum. Occ. Paper No. 4. Oxford, 1975.
- [4.5] D. L. Schroeder – K. C. Ruhl: American Antiquity, 1968. 33. p. 162.
- [4.6] B. Rothenberg – J. Merkel: Chalcolithic, 5th Millenium BC, Copper Smelting at Timna. Institute of Archaeo-Metallurgical Studies, Univ. College London, 20. 1998. p. 1-3.
- [4.7] I. Iliev – K. Dimitrov – I. Kuleff – E. Pernicka: Archaeometallurgical Studies on Eneolithic Copper Artifacts from Notheast Bulgaria. In: Proceedings of 2nd International Conference of Archaeometallurgy in Europe, Aquileia, 2007.
- [4.8] T. L. Kienlin: Results of Metallographic Examination of Copper Age Flat Axes from Eastern Central Europe and the Carpathian Basin. In: Proceedings of 2nd International Conference of Archaeometallurgy in Europe, Aquileia, 2007.
- [4.9] T. A. Wertime - A. D. Franklin - J. S. Olin: The Search for Ancient Tin, Washington, D.C., 1978.
- [4.10] Miske K.: Die Bedeutung Velem Szent Vid als Prehistorischen Guss-Statte mit Berücksichtigung der Antimon-Bronzfrage. Archiv für Anthropologie, Neue Folge, Braunschweig, II. könyv. 2. 1904.
- [4.11] A. Lupu - B. Rothenberg: The Extractive Metallurgy of the. Early Iron Age Copper Industry in the Arabah, Israel. Archeologica Austriaca 47 (1970) p. 91-130.
- [4.12] M. Gimbutas: Bronze Age cultures in Central and Eastern Europe. Mouton, London, 1965.
- [4.13] J. Perrot: The Excavation of Tell Abu Matar, near Beersheva. Israel Exploration Journal, 1955, Volume 5, p. 167-189.
- [4.14] J. L. Caskey: Excavations in Keos, 1960-1961. Hesperia 31, 1962. p. 263.
- [4.15] D. Dungworth: Caley's „zinc decline” reconsidered. Numismatic Chronicle 156. 1996. p. 228-234.
- [4.16] Theophilus Presbyter: A különféle művességekről. Ford. Takács Vilmos. Budapest 1986, p. 115-118.
- [4.17] G. Agricola: De re metallica Libri XII (Tizenkét könyv a bányászatról és kohászatról, 1556); az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület kiadványa, Műszaki Könyvkiadó, Franklin Nyomda, Budapest, é.n.
- [4.18] P. E. Newberry: The life of Rekhama. Pl. XVIII. Constable, London, 1900.
- [4.19] Berta A.: Középkori harangöntő műhelyek maradványainak archaeometriai vizsgálata. SZTE Régészeti Tanszék, Szeged, 2012.
- [4.20] Erhard Brepohl: Theophilus Presbyter und die Mittelalterliche Goldschmiedekinst. Wien-Köln-Graz, 1987. p. 266-267.
- [4.21] Török B. – Barkóczy P. – Kovács Á. – Ferenczi T – P. Fischl K.: Examination of surface layer of Bronze Pick of Hajdúsámson type; Surface Engineering, Vol. 29. No.2, Institute of Materials, Minerals and Mining, 2013. p. 164-168.
- [4.22] S. Ratnagar: Encounters: the westerly trade of Harappa Civilization. Oxford University Press, Delhi, 1981.

- [4.23] R. D. Penhallurick: Tin in Antiquity: its Mining and Trade Throughout the Ancient World with Particular Reference to Cornwall, London: The Institute of Metals, 1986.
- [4.24] S. Gerrard: The Early British Tin Industry, Tempus Pub. Ltd. London, 2000.
- [4.25] R. F. Tylecote: The Prehistory of Metallurgy in the British Isles. Institute of Metals, London, 1986.
- [4.26] S. P. Needham – D. R. Hook: Lead and lead alloys in the Bronze Age. In: Science and Archeology (eds.: E. A. Slater – J. O. Tate), Glasgow, 1987, British Archaeological Reports (BAR), British Series No. 196., 1988. p. 259-274.
- [4.27] A. Raistrick: Notes on Lead-Mining and Smelting in West Yorkshire. Trans. Newcomen Society, Vol. VII, 1927. p. 81.
- [4.28] P. Claughton: Medieval silver-lead smelting in Devon. In: Boles and smelting (eds.: I. Willies – D. Cranstone) Matlock Bath. Historical Metallurgy Society, 1992. p. 12-15.
- [4.29] J. Bayley – K. Erckstein: Roman and medieval litharge cakes: structure and composition. In: Proceedings of 34th International Symposium of Archaeometry (ed.: J. Pérez-Arantegui). Institución Fernando el Católico, CsIC, Zaragoza, 2006. P. 145-153.
- [4.30] F. Habashi: A History of Metallurgy. Métallurgie Extractive Québec, 1994.
- [5.1] H.H. Coghlan: Notes on prehistoric and early iron in the Old World. Pitt Rivers Museum, Oxford University Press, 1956.
- [5.2] T. A. Wertime: The beginnings of metallurgy: A new look. Science, 182, 1973, p. 875-887.
- [5.3] B. A. Sramko: Die ältesten Eisenfundstücke in Osteuropa. In: Frühes Eisen in Europa. Schaffhausen, 1981. p. 109.
- [5.4] Patek E: Magyarország legkorábbi vastárgyai és ezek régészeti környezete. The earliest iron articles in Hungary and their archaeological entourage. Iparrégészet. Industrial Archaeology II. (szerk.: Gömöri J.) Veszprém, 1984. p. 179-186.
- [5.5] Török B. – Kovács Á.: Materials Characterization of Iron and Slag Finds of the Early Medieval Avar Metallurgists; Proceedings of the 15th International Metallurgy & Materials Congress (11-13 November 2010), Istanbul, 2011. p. 386-397.
- [5.6] Gallina Zs.: 2002 Avar kori kohótelep Kaposvár-Fészerlakon. Somogy Megyei Múzeumok Közleményei, 15, 75-84.
- [5.7] Gallina, Zs., Hornok, P., Somogyi, K.: 2007 Előzetes jelentés a Zamárdi elkerülő 65101. sz út Zamárdi 89., 58/a., 58/b., 56. lelőhelyeinek feltárásáról. Somogy Megyei Múzeumok Közleményei, 17, 153-168.
- [5.8] GÖMÖRI J.: Jelentés az 1986. évi zamárdi vaskohó-ásatásról; Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat 120/5., Budapest 1987.
- [5.9] Cs. Sós Á.: Zalavár az újabb ásatások tükrében; A honfoglalásról sok szemmel I., Honfoglalás és régészet, Balassi Kiadó, Budapest, 1994.
- [5.10] Szőke B. M.: A Kárpát-medence a 9. században; A honfoglalásról sok szemmel I., Honfoglalás és régészet, Balassi Kiadó, Budapest, 1994. p. 77-84.
- [5.11] Gömöri J. – Kisházi P.: Iron Ore Utilization in the Carpathian Basin up to the Middle Ages with Special Regard to Bloomeries in Western Transdanubia; Neogene Mineral Resources in the Carpathian Basin, VIIIth RCMNS Congress, Budapest, 1985. p. 346.

- [5.12] Nedopako, D.: Development of Iron-working in the Ukraine in the 1st Milleninum AD. A vassfeldolgozás fejlődése Ukrajna területén a Kr. u. I. évezredben; Hagyományok és újítások a korai középkori vaskohászatban, DSAA – MTA VEAB IAM nemzetközi kiadvány, Sopron-Somogyfajs, (1997) 1999.
- [5.13] Vásáry I.: A régi Belső-Ázsia története; Magyar Őstörténeti Könyvtár 7, JATE Magyar Őstörténeti Kutatócsoport, Szeged, 1993.
- [5.14] Fodor I.: Verecke híres útján; Gondolat Kiadó, Budapest, 1975.
- [5.15] Róna-Tas A.: A magyarság korai története; Magyar Őstörténeti Könyvtár 9, JATE Magyar Őstörténeti Kutatócsoport, Szeged, 1993.
- [5.16] Kalácska R.: A vasművesség emlékei Cegléd határában; Studia Comitansia 31., Régészeti Tanulmányok (Szerk.: Rajna András), Pest Megyei Múzeumok Igazgatósága, Szentendre, 2011. p. 410-430.
- [5.17] Török B.: A Cegléd 4/14.; 4/17. és 4/19. számú Árpád-kori lelőhelyekről származó vassalakok és vastörredékek műszaki vizsgálata; Studia Comitansia 31., Régészeti Tanulmányok (Szerk.: Rajna András), Pest Megyei Múzeumok Igazgatósága, Szentendre, 2011. p. 444-450.
- [5.18] F. Klemm: Kurze Geschichte der Technik. Freiburg i. B. (Herder-Bücherei 106.)
- [5.19] R. Sprandel: Das Eisengewerbe im Mittelalter. Stuttgart, 1968.
- [5.20] R. Sprandel: Die oberitalienische Eisenproduktion im Mittelalter. Vierteljahrschrift für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte 52 (1965) p. 315-321.
- [5.21] I. Serning – H. Hagfeldt – P. Kresten: Vinarhyttan. En medeltide hyttanliggning vid sjön Haggen, Norrbärka Socken, dalarna, Stockholm, 1981.
- [5.22] E. J. Wynne – R. F. Tylecote: An experimental investigation into primitive iron smelting technique. Journal of the Iron and Steel Institute 190. 1958, p. 339.
- [5.23] Gömöri J.: A korai középkori vasolvasztó kemencék és az ékelt vasbucák kérdése; Iparrégészet, Industrial Archaeology I., Veszprém, 1981.
- [5.24] Gömöri J.: Jelentés a nyugat-magyarországi vasvidék régészeti kutatásairól I. Arrabona 19-20., Győr, 1977-78. p. 109-158.
- [5.25] Benkő L.: A kányaszurdoki leletek keletkezése; Arrabona 21, Győr, 1979. p. 107-108.
- [5.26] Györffy Gy. – Zólyomi B.: A kárpát-medence és Etelköz képe egy évezred előtt; Honfoglalás és régészet, Balassi Kiadó, Budapest, 1994. p. 16-32.
- [5.27] Gömöri J.; 10. századi vasolvasztó műhely Somogyfajszon; Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat 129/7, Budapest, 1996. p. 270-279.
- [5.28] Gömöri J.: Preliminary report on the Excavations of 10th Century AD Iron Smelting. Előzetes jelentés a somogyfajsi és a soproni X. századi vasolvasztó műhelyek ásatásáról; Traditions and innovations in the early medieval iron production. Hagyományok és újítások a korai középkori vaskohászatban, DSAA – MTA VEAB IAM nemzetközi kiadvány, Sopron-Somogyfajs, (1997) 1999.
- [5.29] Thiele Á. - Török B.: Vastermelés, vaskihozatal és a kohósított gyepvasércek minimálisan szükséges vastartalma az avar és Árpád-kori vasbucakohászatban. Iron production, iron yield and the minimal iron content of bog iron ores regarding Avar and Árpád-age bloomery iron smelting; Archeometriai Műhely 2011/VIII./4. p. 345-350.

- [5.30] Vékony G.: Székely írás legrégebb emléke Bodrog-Alsóbü vaskohászati műhelyéből. The Oldest Inscription in Szekel Runiform Script; Traditions and innovations in the early medieval iron production. Hagymányok és újítások a korai középkori vaskohászatban, DSAA – MTA VEAB IAM nemzetközi kiadvány, Sopron-Somogyfajs, (1997) 1999.
- [5.31] W. Oelsen – E. Schürmann: Untersuchungsergebnisse alter Rennfeuerschlacken. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 25, 1954 p. 507.
- [5.32] Török B. - Kovács Á.: Crystallization of Iron Slags Found in Early Medieval Bloomery Furnaces, Materials Science Forum 649, 2010. p. 455-460.
- [5.33] V.F. Buchwald – H. Wivel: Slag analysis as a method for the characterization and provenancing of ancient iron objects. Materials Characterization 40, 1998. p. 73-96.
- [5.34] Thiele Á. – Török B. – Költő L.: A foszfor szerepe a vas somogyi archeometallurgiájában – avar és Árpád-kori vaskohászatból származó somogyi salakok SEM-EDS vizsgálata. The role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron: SEM-EDS analysis on slag samples from Avar and Árpád-age bloomery workshops of Somogy county. Archeometriai Műhely 2013/X./1. Budapest, p. 13-22.
- [5.35] Török B. – Thiele Á.: Extracting phosphoric iron under laboratorial conditions smelting bog iron ores. 2nd International Conference on Competitive Materials and Technological Processes IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 47 (2013)
- [5.36] R. F. Tylecote – B. Gilmour: The metallography of early ferrous edge tools and edged weapons British Archaeological Reports (BAR), Oxford 1986. p, 155.
- [5.37] Török B.: A direkt acélgyártási eljárások; Diplomaterv, Miskolci Egyetem, Vaskohászattani Tanszék, Miskolc, 1993.
- [5.38] Thiele Á.: Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery furnace and the metallurgy of iron smelting, Periodica Politechnica – Mech. Eng. vol 54:(2), 2012. p. 99-104.
- [5.39] Török B.: Latest Technical Examinations (1995-1997) of Medieval Iron Slags Found in Hungary – Metallurgical Processes in the Medieval Bloomery; Východoslovenský Pravek, Special Issue, Archaeometallurgy in the Central Europe, Archeologický ústav Slovenskej Akadémie Vied Nitra, Košice & Hutnícka fakulta TU Košice, 1999. p.213-218.
- [5.40] Farkas O.: Nyervasmetallurgia, Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.