

BRONZKORI FÉMTÁRGYAK RONCSOLÁSMENTES NEUTRON ANALITIKAI VIZSGÁLATÁNAK
EREDMÉNYEI

Kiss Viktória^a, P. Fischl Klára^b, Kasztovszky Zsolt^c, Káli György^d, Kis Zoltán^c,
Maróti Boglárka^c, Horváth Eszter^d, Szabó Géza^e

^a MTA BTK Régészeti Intézet

^b Miskolci Egyetem, Történettudományi Intézet

^c MTA Energiatudományi Kutatóközpont

^d MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

^e Wosinsky Mór Múzeum, Szekszárd

Kivonat Tanulmányunkban a középső és késő bronzkorba keltezhető (Kr. e. 2000–1200) bronz tárgyak, egy kincsleletből származó peremes balta, egy hamvasztásos sírból előkerült különleges formájú csákány, és egy áldozati leletként azonosítható, óriási méretű (12 kg tömegű) bronzspirál (kar- vagy lábtekerics imitáció) roncsolásmentes vizsgálatairól számolunk be. A Budapesti Neutron Centrumban különböző neutronos mérés technikákkal végzett archeometallurgiai és metallográfiai elemzések a tárgyak nyersanyagának és készítés-technikai részleteinek megismerését célozták.

Abstract In this study, we present non-destructive investigations of 3 bronze objects that can be dated to the Middle and Late Bronze Age (2000–1200 BC) in Hungary. The flanged axe was discovered in a hoard in Zalasabbar (western Hungary), the special axe type was excavated from a cremation grave in Bonyhád (western Hungary), and the oversized (12 kg) arm/ankle ring with spiral ends, identified as a single find depot, was found in Abaújdevecser (eastern Hungary). Various neutron-based methods were applied at the Budapest Neutron Centre, in order to explore the compositions and the manufacturing techniques of the objects.

Kulcsszavak bronzkor, archeometallurgia, roncsolásmentes vizsgálat, készítéstechnika

Keywords Bronze Age, archaeometallurgy, non-destructive analysis, manufacturing techniques

Bevezetés

A kutatásban részt vevő intézmények együttműködésében a Budapesti Kutatóreaktornál neutronradiográfia (NR) és prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA), valamint repülési idő-neutron diffrakció (TOF-ND) elemzéseket végeztünk olyan réz- és bronztárgyakon, melyek többségénél a különleges forma és funkció miatti örökségvédelmi szempontok roncsolásmentes vizsgálatokat tettek szükségessé. Az együttműködésre az EU FP7-es NMI3 projekt keretén belül került sor, a *Studies on local metal production of the Carpathian Basin from the late Copper Age until the Middle Bronze Age (3500–1500 BC)* c. pályázat segítségével. Tanulmányunkban három bronztárgy vizsgálatának eredményeit mutatjuk be. Egy bonyhádi hamvasztásos sírból előkerült különleges formájú csákány és egy zalasabbari kincsleletből származó peremes balta a középső bronzkorra (Kr. e. 2000–1600/1500) keltezhető. Az abaújdevecseri óriási méretű bronzspirál (kar-

vagy lábtekerics imitáció) a középső bronzkor végétől a késő bronzkor első feléig terjedő időszak (Kr. e. 1600/1500–1200) emléke.

Csákány Bonyhádról

A dunántúli mészbetétes kerámia kultúrája Bonyhád-Biogáz üzemnél újabban feltárt 184 síros temetőjében, a BBQ43. sz. szórthamvasztásos sírból került elő a fokán és hátán gazdagon díszített csákány (1. ábra). A 2008-ban feltárt sír 38 mellékletet tartalmazott: az előkerült edények a temető legfiatalabb fázisába, a mészbetétes kerámia kultúrája kései időszakába (Bonyhád 5. fázis) keltezhetők. A különleges formájú csákány (azonosítója: BB043J37) minden bizonnyal agancsból készült balta fémből öntött utánzata, nyelezési technikája is ehhez igazodik: a tárgyon látható, első pillanatra nyéllyuknak látszó áttörés valójában keresztirányú. A csákány íve, a hátán levő két, a kötözést segítő kis bak egyértelműen mutatja, hogy a behasított fanyélbe erősen bekötözött

fémeszközt még egy oldalirányú facsappal is rögzítették (Szabó 2009; 2012). A különleges formájú csákány készítés-technikai vizsgálatával

arra a kérdésre vártunk választ, hogy azt használati tárgynak vagy presztízs tárgynak szánták-e készítésekor.



1. ábra. Bronz csákány Bonyhád-Biogáz-üzem BBQ43. sírjából.

Peremes balta Zalasabarról

A zalasabari bronzkincs 1998–1999-ben fatelepítés során került elő (2. ábra). A több mint 1,5 kg tömegű kincslet összesen 83 ép és töredékes tárgyat tartalmazott. Közöttük 76 ruhára varrható csüngődísz (11 korongcsüngő, 32 ép, illetve töredékes fecskefarkcsüngő, 2 fésűcsüngő, 12 fordított szív alakú lemezcsüngő, 2 félhold alakú csüngő, 2 szemüvegspirál-csüngő, 14 lemezből és drótból csavart cső-gyöngy, egy lemezből csavart kétagú gyöngy), három lemezesfejű ruhakapcsoló tű, egy kartekercs, egy nyakperec bepödrött végének töredéke, egy peremes balta (lelt. sz. 2010.2.1.82) és egy öntőcsap található (Honti & Kiss 2013).

Hasonló formájú (pl. ún. szász típusú; Kienlin 2010, Fig. 7.2) peremes balták gyakran kerülnek elő a Közép-Európa nyugatabbi részéből ismert rézbányák környezetében megtalált, azonos tárgyak sorozatát tartalmazó kincsletekből (Hänsel & Hänsel 1997, 108). Emiatt a kutatók egy része arra következtet, hogy ezek formaöntött félkész

termékként / standard tömegű nyersanyag-öntvényként („előpénzként”) értelmezhetők (Lerner-de Wilde 1995: 301-310; Müller 2002, Abb. 6; Krause 2003). A zalasabari darab 238 g-os tömege beleillik a hasonló balták általában 170–230 g-os középtartékába, emiatt a Nyugat-Magyarországon előkerült hasonló tárgyak esetében is felmerült, hogy ebben a formában érkeztetett a területre a Közép-Európa nyugatabbi részén kitermelt import réz nyersanyag (Kiss 2009; 2012). Az „előpénz” elmélet ellenzői szerint a standard tömeg pusztán a balták azonos öntőformában való sorozatgyártásának következménye (Butler 2002: 230–235). Emellett számos peremes balta metallográfiai elemzése során az él öntés utáni megmunkálására utaló, elnyújtott szövet-szerkezetet lehetett kimutatni (Kienlin 2006; 2010, Fig. 7.19), ami eszközként való használatukat bizonyítja. A balták funkcióját érintő, évtizedek óta tartó tudománytörténeti vita miatt tárgyunk esetében is fontos a készítőtechnika megismerése.



2. ábra. Peremes balta a zalasabari kincsből.

Bronzspirál Abaújdevecserről

Abaújdevecser-Ortásföldek lelőhelyen, a Békás tó mellett szórvány leletként, szántás közben látott napvilágot egy óriási méretű, 12 kg-os, 43 cm hosszúságú bronzspirál (kar- vagy lábtekeres imitáció) (Hellebrandt 2011). A mindkét végén spirálisban végződő aszimmetrikus kialakítású tárgy (3. ábra; lelt. sz. 2002.20.1.) az ekére akadt és csak a parcella szélén tűnt fel a találónak (Varga József), így pontosabb helye nem ismert. A fém átmetszete középen nyolcszög, a spirálisoknál ovális; mindkét tekeres 2,5 menetes. A tárgy érdekessége, hogy a rövidebb oldalon, a tekeres végén ferde sítot alakítottak ki. A tárgyon több sérülés, feltehetően ekenyom és az egyik spirálkorong élén (véltetően a megtalálást követően keletkezett) friss reszelés- illetve vágásnyom látható. Teljesen megegyező alakú (aszimmetrikus, középen nyolcszög, tekeréseinek kör átmetszetű, kisebb tekerésénél egyenesre eldolgazott), normál méretű (Átm.: 7,3 cm) tárgy került elő a füzesabonyi kultúra tiszafüredi temetőjének B. 79. sírjából viseleti kontextusban, lábtekeresként (Kovács 1977, Taf. 27). Hasonló tárgyat találtak a tiszafüredi temető D305-ös sírjában egy nő – a nemre a fektetésből következtettünk: baloldali fektetés és É-D-i tájolás általában a női sírokra jellemző – jobb bokáján is (Kovács 1992, Abb. 62). A kialakítás itt is azonos, a rajz alapján azonban hiányzik az egyenes záródás a kisebb tekercsnél. Kovács Tibor később a szövegben a D304.

sírból, valamint a D279. sírból említ ilyen típusú bokaperecet (Kovács 1992: 97). Koós Judit a tiszaladányi, koszideri korú – hasonló típusú, kerek átmetszetű drótból készült karperecet tartalmazó – kincs részletes elemzése kapcsán három, a fentiektől részben eltérő sírszámú tiszafüredi sírt említ, melyben hasonló díszet találtak (B79, D283, D306: Koós 1989: 37).

A tárgy típusnak számos változatát lehet elkülöníteni az egyszerű, vékony drótból tekercselt szimmetrikus, azonos méretű spirálokkal rendelkező variációtól az öntött, kör, vagy többszögű átmetszetű – esetenként ezeket kombináló – aszimmetrikus karú darabokig. Gyakori, hogy az itt tárgyalt darabbal ellentétes módon a középrész átmetszete kör alakú, és a spirálisok készültek négyszög átmetszetű anyagból. A középső bronzkori Apa-Hajdúsámson és a korszak végére jellemző koszideri kincsleletek egyik legjellemzőbb tárgy típusa (David 2002: 227–228). W. David (2002) összevontan Hajdúsámson-Apa-Ighiel-Zajta depócsoporthoz tartozó tárgyat a magyar kutatás szerint hagyományosan két kronológiai horizontba sorolható „kincsleleteket”. A füzesabonyi kultúra leletanyaga mellett megtaláljuk ezeket a Dunántúlon is, többféle méretben, sírból gyűrűként és karkercsként (Zmajevac/Vörösmart), valamint a toljánémedi horizont és a koszideri korszak kincseiben (Kőrös, Balatonkiliti, Stomfa/Stupava; Mozsolics 1967, Taf. 30. 4, 6, Taf. 37. 3, 4, Taf. 41. 1). A Regöly-Veravárnál talált, a késő bronzkori kurdi horizonthoz sorolha-

tó kincslelet egyik töredékes tárgyának nyolcszögletű keresztmetszete és átmérője alapján felmerül, hogy talán az is az abaújdevecserihez hasonló nagyságú kartekercshez tartozhatott (Szabó 1993,

11.t.5,7; Kőszegi 1993). Azon a darabon jól látható a darabolás nyoma, ami nyersanyagként való újrafelhasználására utal (Szabó 2013).



3. ábra. Bronzspirál (kar-/láb-tekerces) Abaújdevecser-Ortásföldek (Békás tó) lelőhelyről.

A hosszú ideig használt kar- és lábtekercesek előkerülése gazdag síregyüttesekben és kincsleletekben, továbbá bekarcolt ábrázolásai madár alakú edényeken, csörgőkön és lábas edényeken (P. Fischl 2014) mindenképp alátámasztják a tárgytypus egykori közösségekben betöltött kiemelkedő szerepét. Az óriási méretű abaújdevecseri darabot nyilvánvalóan nem viseletre szánták: a túlméretezett kar- vagy lábtekerces imitáció valószínűleg áldozati tárgynak készült, ahogyan erre a rendkívüli méretű tárgyak esetében a régészeti kutatás következtet („Überdimensionierung”: Krenn-Leeb 2006: 14; 2010).

A tárgytypus gyártásának kezdetét Hellebrandt Magdolna a korszideri korra teszi a párhuzamok alapján, az abaújdevecseri kartekercset azonban a középső bronzkori lelőhelyek abaúji hiánya miatt inkább a késő bronzkor kezdetére, a pilinyi kultúra időszakára datálja (Hellebrandt 2011: 137). A tárgy készítési módját nyolcszög átmetszetű öntött rúd húzásával és feltekerésével képzelel el, amely munkafolyamat során a rúd átmetszete változik és fokozatosan elvékonyodik. Vizsgálataink itt is főként a készítőtechnika megismerésére irányultak.

Vizsgálati módszerek

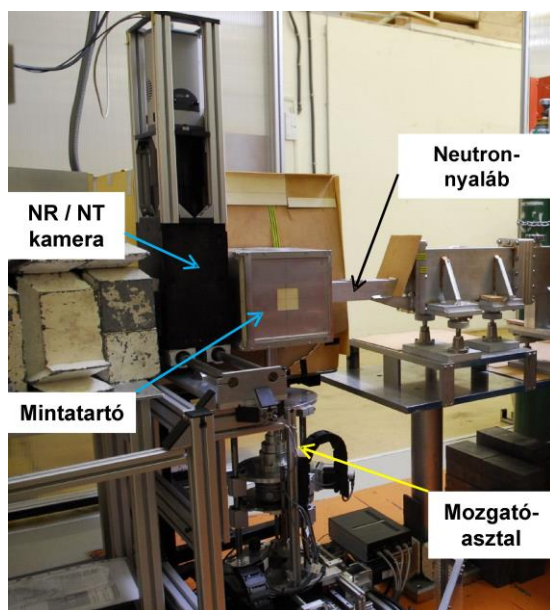
A Budapesti Kutatóreaktornál a Budapesti Neutron Centrum (BNC) archeometriai kutatásokban résztvevő csoportjai (MTA Energiatudományi Kutatóközpont Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont SzFI Neutronspektroszkópiái Osztály) különböző roncsolásmentes méréseket végeztek a bemutatott három bronzkori tárgyon.

Neutronradiográfia

A kutatóreaktorokból kivezetett neutronnyalábok jól használhatók tárgyak radiografikus (NR, 2D), illetve tomografikus (NT, 3D) leképezésére. A minta részeinek eltérő neutrongyengítése miatt a szürkeárnyaltos vetületi képeken a tárgy belsejének eltérő anyagösszetétele megjeleníthető – annak károsítása nélkül.

A NIPS-NORMA (Neutron Induced Prompt Gamma-ray Spectroscopy–Neutron Optics and Radiography for Material Analysis) mérőállomás a Budapesti Kutatóreaktor neutronvezető csarnokában helyezkedik el, az 1. sz. neutronvezető

végén. A mérőhely termikus ekvivalens neutron fluxusa $2,7 \times 10^7$ n/cm²/sec. A NORMA berendezés használatakor a mintán áthaladó nyalábbal neutronradiográfiai és -tomográfiai leképezést (ún. transzmissziós projekciókat) valósíthatunk meg. A NORMA berendezés a vele egybeépített NIPS mérőhellyel együtt, ill. attól függetlenül is működtethető. Az együttes működés során térbeli elemösszetételre prompt-gamma aktivációs leképezés (PGAI) és a belső szerkezet képi megjelenítésére (NR, NT) vonatkozó mérések végezhetők (4. ábra). Az itt bemutatott munka során PGAA és NR vizsgálatokat végeztünk (vö. Kasztovszky & Belgya 2006; Kasztovszky 2007). Az egyes expozíciók után a tárgyak felaktiválódásból származó radioaktivitása nem mérhető. A berendezés részletes ismertetése: a nyaláb 5×5 cm² réssel ellátott repülési csövön éri el a $20 \times 20 \times 20$ cm³-es mintakamrát. Ennek egy vagy több oldalpanelét elmozdítva nagyobb (5 kg-ig) tárgyak (pl. kardok, vázák, kövek) is vizsgálhatók. A mintákat egy mintatartó keretben felülről kézzel, vagy alulról egy XYZ- ω távvezérelt asztal segítségével állítjuk be mérési pozícióba. A mozgatus 200 mm-es tartományon 15 μ m-es pontossággal végezhető.



4. ábra. A budapesti NIPS-NORMA berendezés.

A NORMA berendezés fő része a leképező rendszer. Ez egy fényzáró alumínium házban elhelyezett 100 μ m vastag ⁶Li/⁶ZnS szcintillátorból, Al réteggel ellátott kvarctükrökből és egy hűtött, hátsó megvilágítású, 1024×1024 pixeles,

16-bites szürkeskála-mélységű Andor iKon-M CCD kamerából áll. Az optika 48,6×48,6 mm²-es területet (amelyben a nyaláb maga 40×40 mm²) képez le a 13,3×13,3 mm²-es chipfelületre. A leképező rendszer térbeli felbontása a tárgy szcintillátor ernyőtől mért 1,5-100,5 mm-es távolságának a függvényében 230-660 μ m között lineárisan változik.

A tárgyakról készült egyes projekciós képek jellemző besugárzási ideje a neutronok energiájának függvénye: hidegneutronok esetén 1,8 sec. A felvett képek a neutronnyaláb inhomogenitására (*flat-field*) és a kamera sötétáramának (*dark current*) torzító hatására korrigáltak.

Prompt-gamma aktivációs analízis

A prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) elemösszetétel meghatározására alkalmas, roncsolásmentes nukleáris analitikai módszer (Révay & Belgya 2004). A minta besugárzása hidegneutron-nyalábban történik, és a sugárzásos neutronbefogás során keletkezett karakterisztikus gamma fotonokat detektáljuk. A módszerrel panoráma analízis végezhető, a tárgy összetételét illetően bármilyen előzetes információ nélkül, elvben (a hélium kivételével) minden kémiai elem mennyiségileg is (Révay 2009) meghatározható. A gamma csúcsok energiája és intenzitása független az anyag kémiai állapotától, ugyanakkor jellemző az elemösszetételre. A neutronok és a gamma fotonok nagy áthatoló képességűek, ezért az analízis az egész besugárzott térfogat átlagos összetételéről szolgáltat információt.

A méréseket a NIPS (Szentmiklósi et al. 2013) mérőhelyen végeztük, $2,7 \times 10^7$ n/cm²/sec termikus ekvivalens neutronfluxus mellett. A csákány és a balta esetén 20 mm² keresztmetszetű neutronnyalábot használtunk az adatgyűjtéshez szükséges megfelelő másodpercenkénti beütésszám eléréséhez. A mérési időket 7000-11 500 sec között úgy választottuk, hogy az azonosított elemek csúcsterületének pontossága a statisztikailag megkövetelt szintet érje el.

A sugárzásos neutronbefogásból származó gamma sugárzás detektálását Compton-elnyomások üzem módban használt és ólomvédelemmel felszerelt nagy tisztaságú germánium (HPGe) detektorral végeztük. A jelfeldolgozás sokcsatornás analízátorral történt. A mérőhely részletesebb leírása egy korábbi publikációban megtalálható (Szentmiklósi et al. 2010). A spektrumok kiértékelését a Hypermet-PC gamma

spektroszkópai szoftverrel végeztük. Az elem-azonosítás a prompt-gamma analízis könyvtárt (Révay et al. 2004) tartalmazó ProSpeRo programmal történt. A kiértékelésnél figyelembe vettük a minta nélkül, nyitott nyalábnál mérhető spektrális háttérrel.

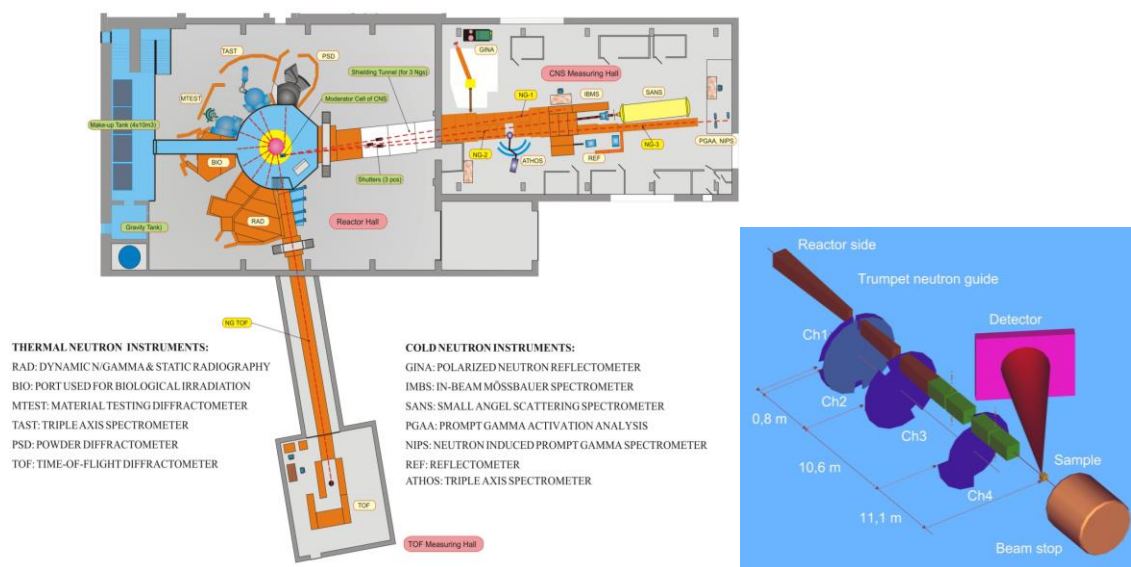
A tárgyak besugárzása során keletkezett radioaktivitás néhány órán belül a mérhető szint alá csökkent.

A vizsgált tárgyak PGAA-val mért összetételét – a 6. és 8. ábrán körökkel jelölt helyeken – az 1. táblázatban adtuk meg. Az azonosított elemek

koncentrációit, azok bizonytalanságát, valamint néhány elemre vonatkozó kimutatási határokat tömeg%-ban adtuk meg.

A repülési-idő neutron-diffrakció

A BNC time-of-flight neutron-diffraktómétere (TOF-ND) a kutatóreaktor 1-es radiális csatornához telepített neutronvezető és nyalábszaggató (chopper) rendszerből áll. A nyaláb egy alagúton keresztül jut el a külön ezen berendezés részére épült mérőcsarnokba (5. ábra).



5. ábra. A BNC repülési idő neutron-diffraktómétere.

A neutron impulzust egy nagysebességű (max. 12000 rpm), szemben vagy párhuzamosan forgatható dupla chopper állítja elő. A legrövidebb előállítható impulzus 10 μ s. A kívánt hullámhossz tartomány két további chopperrel állítható be. A nyaláb teljes hasznos hullámhossztartománya 0,7–4,5 Å, de ez egyszerre csak kis felbontásnál fedhető le. Nagyfelbontású mérésnél a mérési céltól függően kell a szűkebb tartományt kiválasztani.

A neutronok teljes repülési útja 25m, amelyből a minta-detektor távolság 2,2m. Ezekkel a paraméterekkel a diffrakciós spektrum kb. $1,5 \times 10^{-3}$ Å felbontással vehető fel. Ez a felbontás a nyaláb teljes 2,5×10cm-es keresztmetszetén elérhető. A felbontás és a sáv szélesség növelése az intenzitás rovására történik, ezért fontos az optimális beállítás megválasztása.

A berendezés alapvetően a kristályos anyagok szerkezetében jelen lévő finom változások vizsgálá-

latára, illetve roncsolásmentes szerkezet-meghatározásra, fázisanalízisre alkalmas. Az elvégzett mérések célja a tárgyak fázisanalízise, valamint szövetszerkezetük, (textúrájuk) vizsgálata volt.

Fázisanalízis

Bronz tárgyak esetében a fázisanalízis elsősorban a réz-ön szilárd oldat összetételének, valamint a jelenlévő más bronz fázisok (delta esetleg béta), rézben nem oldódó fémek (ólom) és réz, ill. ön vegyületek (főként kuprit) mennyiségének a meghatározását jelenti. Az adott tárgyakban a szilárd oldaton kívül más összetevő nem volt kimutatható, ezért csak az ötvözettség mértékének meghatározására szorítkozunk. Ennek alapja, hogy rendezetlen szilárd oldatban az oldó fém rácsállandója a beépülő idegen atomok hatására megváltozik. Ez

a változás a legtöbb esetben kis koncentrációknál lineáris (Vegard-szabály). A diffrakciós spektrumból a teljes besugárzott térfogatra (mikroszkopikus és makroszkopikus értelemben) átlagolva az ötvözés mértéke és annak eloszlása meghatározható (vö. Mödlinger et al. 2013; Kiss et al. 2015). Az így kapott értékek a beépülő elem ismeretében értelmezhetők, ezért ún. ön-ekvivalens koncentrációt adunk meg, ami akkor jelenti a valós értéket, ha a rácsállandóra más beépülő elemek nincsenek lényeges hatással.

Szövegszerkezet

Elsősorban képlékeny hidegalakítás hatására a fémek alkotó kristallitok eredeti véletlenszerű irányeloszlása megváltozik, rendezettebbé válik, ún. textúra alakul ki. A kristallitok irányítottságának eloszlását teljes mértékben az orientáció eloszlásfüggvénnyel (ODF) lehet jellemezni, amely elegendően széles és elegendően sok irányból felvett diffrakciós spektrumokból meghatározható. Komplikáltsága miatt a gyakorlatban az egyes kristálytani irányokhoz tartozó diffrakciós csúcsok intenzitásának kétdimenziós irányeloszlását szokás megadni ún. pólusábrán. Ez a mérésből közvetlenül meghatározható. A BNC TOF-ND berendezése jelenleg nem rendelkezik automatikus mintamozgató mechanizmussal, szögtartománya pedig szűk. Ezért a textúrát a minta két jellemző, egymásra merőleges tengelye körüli forgatással vettük fel, a lehető legtöbb diffrakciós csúcsot lefedve.

A mérési körülmények ismertetése

A méréseknél olyan beállítást választottunk, hogy a spektrumok az összetétel és a textúra meghatározására is alkalmasak legyenek. A hullámhossztartomány 1,2–2,9 Å, amellyel 8 elegendően intenzív diffrakciós csúcsot lehet lefedni. A textúra

jellemzésére a bizonytalan, olykor félrevezető rekonstruált pólusábrák helyett közvetlenül a korrigált és elméleti értékekre normált csúcshintenzitásokat adjuk meg grafikonon, a rácsállandó függvényében. Az ábrákon az egyes pontokat összekötő vonalak a szem vezetését szolgálják. A hibát az áttekinthetőség érdekében nem jelöljük, de általában a kis rácsávolságnál jelentős. Az intenzitásokat a mérési (nem a teljes) tartományra integrált intenzitásra is normáltuk, ugyanis a tárgyak szabálytalan alakja miatt az abszorpcióval súlyozott effektív térfogat a különböző mérési szögekre nem határozható meg. Ezért az összehasonlításnál egy közös szorzótényező megengedett, információtartalma az intenzitások egymáshoz való viszonyának van.

Eredmények

A roncsolásmentes PGAA elemzés a zalaszabari peremes baltában és a bonyhádi csákányban mérhető kémiai elemek tömegszázalékos összetételét mutatja a tárgyak vizsgált részén (ld. 6. és 8. ábra).

Bonyhádi csákány

Elem- és fázisösszetétel

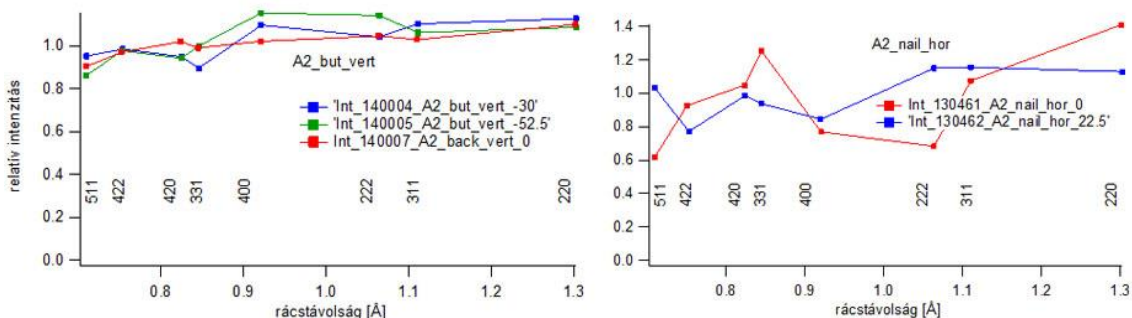
A PGAA mérés eredménye szerinti összetételt a 6. ábrán jelölt kör területén, a minta teljes vastagságában az 1. táblázatban tüntettük fel. A feltüntetett sárga kör az elemanalízis céljából besugárzott területet mutatja, amelynek közepe 18 mm-re van a csákány élétől, és átmérője 5 mm. A besugárzott térfogat összetétele átlagosan 88,0% réz, 12,0±0,6% ón, 0,025 tömeg% H-nel (ld. 1. táblázat). A TOF-ND mérés alapján a csákány (jele „A2”) óntartalmára: 11,07±0,5 tömeg% adódott.

1. táblázat. A zalaszabari peremes baltában és a bonyhádi csákányban mérhető kémiai elemek tömegszázalékos összetétele. A vizsgált térfogatok tárgyakon belüli pozíciója az egyes alpontokban bemutatott ábrákon látható (k.h.a.: kimutatási határ alatt).

spektrum	Peremes balta (Zalaszabar)			Csákány (Bonyhád)	
		639		640	
Elem	kimutatási határ tömeg%	összetétel tömeg%	±	összetétel tömeg%	±
H	0,003	0,056	0,004	0,025	0,003
Cu	0,05	90,2	0,7	88,0	0,6
Ag	0,05	0,18	0,010		
Sn	1,0	9,6	0,7	12,0	0,6
Zn	0,5	k.h.a.		k.h.a.	
As	0,2	k.h.a.		k.h.a.	

Készítéstechnika

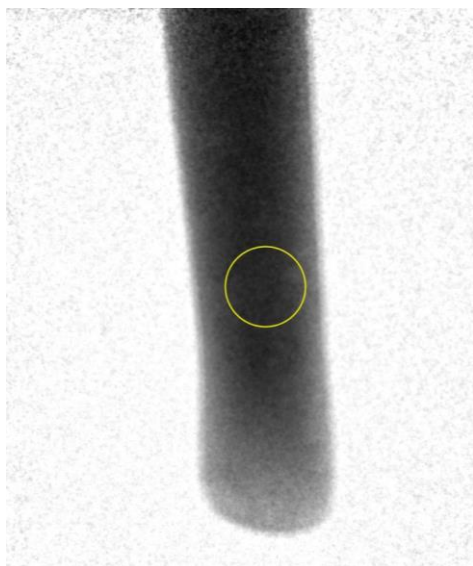
A bronz csákány (azonosítója: BBQ43J37) neutronradiográfiás mérése során pozicionálási nehézségek miatt csak egy nézetből készült projekció a



7. ábra. a bonyhádi csákány TOF-ND vizsgálata során mért textúra, a: tömbi részen, b: a csákány élrészén.

A csákány TOF-ND vizsgálata során három kiemelt területen végeztünk textúra mérést:

- A tömbi részen („back”) a bakokkal átellenes oldalon, függőlegesen a nyalábba helyezve („vert”).
- A csákány hegyén (élén) („nail”).
- A bakokon, két különböző beállításban („but”).



6. ábra. Bronz csákány, Bonyhád-Biogáz üzem, BBQ43. sír.

A tömbi rész teljesen izotróp orientáció eloszlást mutat, ami egyértelműen öntvényre utal (7. ábra).

tárgyról (6. ábra). A képen a szürkeárnyalat változása megfelel egy homogén szerkezetű anyag különböző vastagságú részeinek. Makroszkopikus öntési hiba, ill. egyéb szerkezeti eltérés nem látható.

A hegyről készült mérés a kis térfogat miatt zajos, így is kimutatható azonban a textúra, bár mértéke bizonytalan. A legnehézkesebbnek a bakok vizsgálata bizonyult. A felületükre merőleges irányból a peremes felszíni réteghez képest sokkal nagyobb térfogatú szárrész is részt vesz a szórásban, így ebből az irányból teljes izotrópiát mutat. Ezért a felülettel közel párhuzamos irányból is végeztünk mérést a bakok szárát teljesen kitakarva. A mért intenzitások textúra jelenlétére utalnak, ám a szögfüggés gyenge. Összefoglalóan tehát azt lehet megállapítani, hogy a peremes részt vélhetőleg nem öntéssel, hanem utólagos megmunkálással alakították ki.

Zalaszabari balta

Elem- és fázisösszetétel

A PGAA mérés eredménye szerint a balta anyaga 90,2% réz, 9,6% ón, 0,18% ezüst, 0,056 tömeg% H összetételű. A TOF-ND mérés alapján a balta (jele „A1”) óntartalma $7,5 \pm 0,5$ tömeg%. Az óntartalomra a PGAA és TOF-ND a mérések bizonytalanságát meghaladóan eltérő értéket adott ($9,6 \pm 0,7\%$, ill. $7,5 \pm 0,5\%$). Összehasonlításként egy harmadik módszerrel kapott adatsor is rendelkezésre áll (2. táblázat): a roncsolásos mintavételrel járó EDXRF (enegiadiszperzív röntgenfluoreszcens; vö. Lutz & Pernicka 1996) elemzés 8% ónt mutatott ki. A balta réz- ill. ezüst-tartalmára vonatkozóan a PGAA és EDXRF eredmények jól egyeznek, míg az EDXRF-fel

mért fontos nyomelemek (Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Sb, Te, Au, Pb és Bi) a PGAA kimutatási határai alatt voltak.

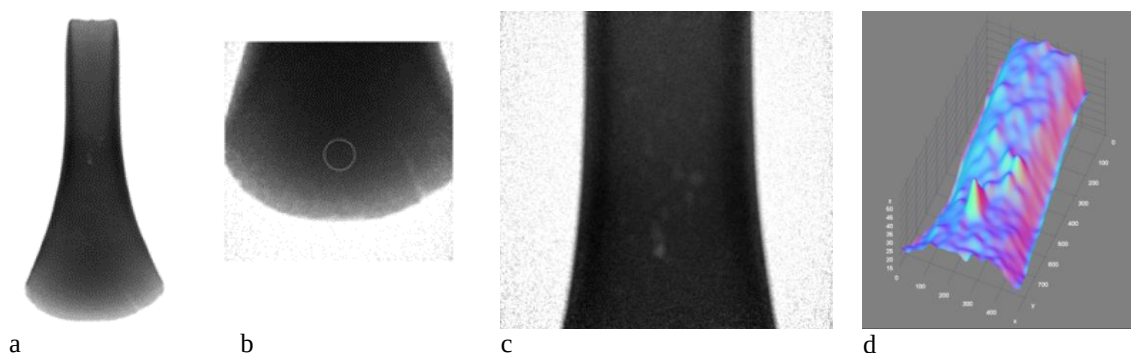
Készítéstechnika

A bronz peremes balta neutronradiográfiás leképezése során a tárgyról nyolc különböző nézetből készült projekció. Az egyes projekciókat egymással átfedésben vettük fel úgy, hogy összességében lefedjék a teljes tárgyat. A FIJI programcsomag MosaicJ összetevője segítségével az egyes projekciók geometriailag helyesen, csempeszerűen egymás mellé rendezhetők, így a teljes tárgyról készíthető transzmissziós kép (8a. ábra). A képen a szürkeárnyalat változása általában megfelel egy homogén szerkezetű anyag különböző vastagságú részeinek. Makroszkopikus szerkezeti eltérés két helyen látható. Az egyik eltérés a balta élénél jelentkező repedés, ami kinagyítva az 8b. ábrán is látható. A feltüntetett kör a PGAA elemanalízis céljából besugárzott területet jelzi, amelynek

közepe 12 mm-re van a balta élétől, átmérője 5 mm. A másik a tárgy középső részén található számos világosabb folt (8c-d. ábra), amelyek korábbi mintavételezés vagy öntési hiba, ill. korrózió miatt keletkező anyaghiánynak feleltethetők meg. A baltát – mint azt a végéről letört öntőcsap helyének törésfelülete is mutatja – élére állított helyzetében öntötték. A radiográfiás képen látható világos foltok tehát a korábbi (EDXRF méréssel összefüggő) mintavételezés helye mellett valószínűleg csak felületi hibákat (korrózió?) jeleznek, és kevésbé valószínű, hogy mégis egy esetleges fekvő öntés során képződött belső buborékok. A radiográfiás felvétel szürke értékeinek különbözőségét a 8d. ábra 3D-ben szemlélteti. A látható „csúcsok” a világosabb foltok helyzetét jelzik, magasabb csúcs kisebb neutrongyengítésre utal. Álló helyzetben való öntésre utalnak más balták esetében a nyélrész végén látható buborékok is (Kienlin 2010, Fig. 7.13), ilyeneket azonban a – minden bizonnyal jól sikerült öntés során készült – zalaszabari baltánál nem lehetett kimutatni.

2. táblázat. A balta elemösszetétele az EDXRF elemzés szerint.

Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sn	Sb	Te	Au	Pb	Bi
0,02	0,01	0,074	91	0,2	0,129	0,005	0,175	8	0,127	0,005	0,023	0,028	0,01



8. ábra. a) A zalaszabari bronz peremes balta neutronradiográfiás felvétele; b) PGAA mérési pont; c) a balta korábbi roncsolásos mintavételi helye, és a környezetében található világos foltok, d. a c. ábra szürkeértékeinek 3D bemutatása.

A balta TOF-ND vizsgálata során két területen végeztünk textúra mérést (9. ábra):

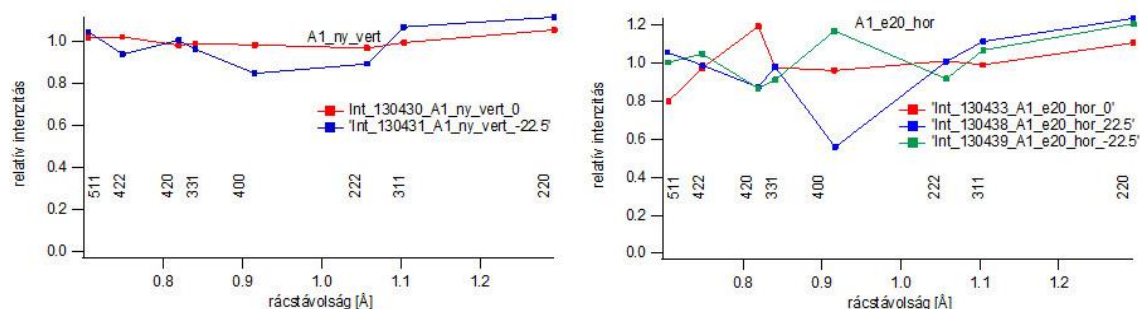
– A tömbi vagy nyél („ny”) részen, a tárgyat függőlegesen a nyalábba helyezve a függőleges („vert”), tehát a hossz tengelye körül forgatva, úgy, hogy a szórási vektor a lapos peremes felü-

letre merőleges legyen. A mérés során a fej egy kis része is bekerült a nyalábba.

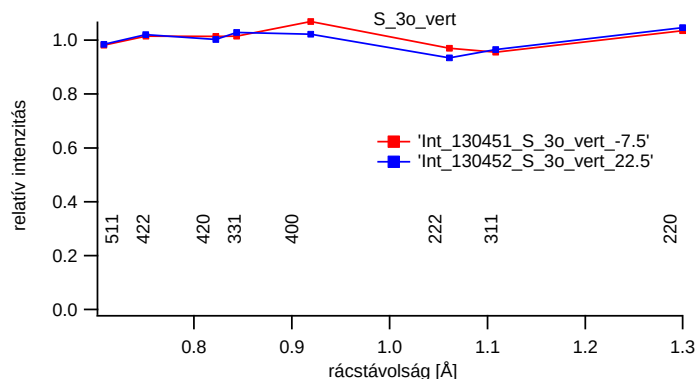
– A tárgy élén 20 mm-es sávban („e20”), a tárgyat vízszintesen (az élet függőlegesen), a lapos oldallal a nyaláb és a detektor felé fordítva, mint a nyél részénél. Erről a területről két mérésorozat készült.

A nyélen a felületre merőleges irányban az eloszlás teljesen egyenletes, izotróp, ami arra utal, hogy a tárgy öntvény. A merőleges iránytól 22,5 fokra mért spektrum azonban gyengén, de határozottan anizotróp. Ennek hátterében állhat, hogy elforgatva a nyél oldala is jobban bekerült a nyálába. Elképzelhető, hogy ez a terület jelenik meg a spektrumban, ebben az esetben a nyél oldala

szükségszerűen erősen orientált. A textúra jellege (csökkenés az 100 és 111 irányokban) vélhetőleg az oldalról való kovácsolás okozta orientáció következtében alakult ki. A balta éle határozottan anizotróp. Az 100 csúcs intenzitása az él irányába fordulva erősen csökken, de összetett textúrára utal. Mindez egyértelművé teszi, hogy a tárgy élet legalább felkeményítés céljából megmunkálták.



9. ábra. A zalaszabari balta TOF-ND vizsgálata során mért textúra a: tömbi részen, b: a balta élén.



10. ábra Az abaújdevecseri spiráldísz TOF-ND vizsgálata során mért textúra a hajlított rúd kör keresztmetszetű végén.

Abaújdevecseri bronzspirál

A tárgyról nem készült neutronradiográfiás és PGAA mérés, mivel nagy mérete miatt nem lehetett a mintatartóba (4. ábra) behelyezni.

Fázisösszetétel

A TOF-ND mérés alapján a tekercs (jele „S”) bronzból készült, a rézötvözet öntartalma: $10,38 \pm 0,5$ tömeg%.

Készítéstechnika

A tekercs TOF-ND vizsgálata során négy területen végeztünk textúra mérést (10. ábra):

- Az egyik spirális rész közbülső menetén („1a”) szemből
- Ugyanezen spirális rész közbülső menetén hátulról („1b”)
- A hajlított rúd nyolcszögű részén („2o”)
- A hajlított rúd kör keresztmetszetű részén („3o”)

A felvett spektrumok, egy kivételtől eltekintve, mind izotróp eloszlást mutatnak, ami a tárgy öntött jellegére utal. Ennek ismeretében az egyes mérési orientációknak nincs jelentősége. Kivételt az első mérés jelent, ahol 40 fokos forgatásnál látszik enyhe anizotrópia, ám a mérés rövidsége és az intenzitás adatok hibája miatt a textúra jelenléte nem egyértelmű. Kialakulhatott az öntés során vagy a felület eldolgozása következtében is. A

tárgy egésze egyértelműen textúra mentes, tehát öntvényként azonosítható.

Következtetések

Elem- és fázisösszetétel

A zalaszabari balta esetében lehetőségünk nyílt különböző mérés technikák összehasonlítására is. A roncsolásos mintavételt igénylő EDXRF elemzéssel (2. táblázat) jól egyező eredményt adott a roncsolásmentes TOF-ND, míg a PGAA mérés önkonzentráció adata ezekről kissé eltért (1–2. táblázat). A bonyhádi csákánynál a PGAA és a TOF-ND mérés öntartalomra vonatkozó eredménye összhangban volt egymással.

Az EDXRF vizsgálat a zalaszabari baltánál az arzén, ezüst és antimon kissé magasabb arányát mutatta ki (részletesebben vö. Kiss et al. 2013). Az ezüsttartalom hasonlóan jól mérhető PGAA-val, az arzén és antimon viszont a PGAA kimutatói határa alatt van.

Készítéstechnika

A vizsgált balta és csákány esetében az éleknél biztosan történt megmunkálás az öntést követően. Számos peremes balta metallográfiai elemzése ezt bizonyítja is: a nyélnél csak az öntött szerkezet látható, míg az éleknél a megmunkálásra utaló, elnyújtott szövetszerkezetet lehetett kimutatni (Kienlin 2010, Fig. 7.19). A TOF-ND vizsgálat lehetővé tette, hogy ugyanezt az eredményt a tárgyak megsértése nélkül megkaphassuk. A zalaszabari balta neutronradiográfiai képe a korábbi roncsolásos anyagvizsgálat mintavételi helyén kívül más világos foltokat is mutatott. A készített projekcióból azonban önmagában nem lehet eldönteni, hogy a foltok öntési hiba vagy korrózió eredményei. A buborékok baltán belüli térbeli pozícióját egy valódi 3D tomográfiai vizsgálat tárná fel, ami eldönthetné a felületi vagy tömbi elhelyezkedés kérdését.

A bonyhádi csákány esetében a vizsgálatok révén megállapítható, hogy öntéssel készítették, élét pedig az öntést követően megmunkálták (kalapálással tömörítették, élezték), ami egyértelműen arra utal, hogy használatra szánták. A nyélbe rögzítést is segítő két kis bak eredetileg öntőcsapként szolgált, aminek törésfelületét kalapálással utólag elegyengették. Erre vezethető vissza azok felületének peremes kiképzése. Az így kialakított felszínt poncvésővel díszítették.

Az abaújdevecseri spiráldísz (kar- vagy lábtekercs) esetében a vizsgálatok megerősítik, hogy készítése során a viaszveszejtési öntési technikát alkalmazták. A tárgy készítésekor először egy hosszú, megfelelő vastagságú viaszrudat készítettek, amelynek középső szakaszát nyolcszögletesre alakították. A végek felé elvékonyodó részét a hasonló formájú, kalapálással alakított kisebb méretű ékszereket utánózva spirálisan visszatekerítették. Az így kialakított, enyhén kúpos korongok előlapját elsimították, gondosan ügyelve arra, hogy az öntés során a bronz a forma minden részébe akadálytalanul folyhasson majd. Ez jól követhető az elő- és hátoldalon eltérő rajzolatú tekerces-nyomokból, a viasz lenyomata által közvetített repedésszerű, azonban csak a felszínen megfigyelhető finom részletekből. A tárgy egészének végső formára alakítása, megcsavarása után a korongok középpontjához újabb viaszdarabokat illesztve kialakították az öntőcsapok helyét. Ez különösen jól látható az egyik korong közepén, ahol az utólag eltávolított engusz nagysága is mérhető a kalapálással csak részben eltüntetett, egyébként jellegzetesen porózus törésfelületen. A beágyazás előtt még kisebb igazításokat végeztek a tárgyon, így például egyik végét levágták, egy ferde síkot alakítottak ki rajta. Az öntéskor a formát vízszintesen, a kúpos korongokkal felfelé helyezték el (3. ábra).

Összegzés

Az elemösszetételt tekintve a korabeli, nem homogén összetételűek tárgyak vizsgálatok a többféle (roncsolásmentes PGAA és TOF-ND, valamint roncsolásos mintavétellel járó EDXRF) mérési módszerrel végzett vizsgálatok összehasonlítása fontos, mivel a roncsolásos mintavétel főleg a tárgy felszínén kiváló ónban gazdag rétegekből nyújt adatot (Szabó 2010: 117, 3. ábra), míg a TOF-ND és a PGAA vizsgálat eredményei a teljes tömbi (átlagos) összetételre utalnak.

A TOF-ND vizsgálat által kimutatott utólagos megmunkálás fontos adalék a különleges formája miatt presztizstárgyként is értelmezhető bonyhádi csákány, valamint a zalaszabari peremes balta használati tárgyként vagy nyersanyagrudként való meghatározása tekintetében. A bonyhádi csákány és a zalaszabari balta edzett éle arra utal, hogy a tárgyat használati eszköznak szánták készítésekor. A neutronradiográfiai felvételek kevés anyaghibára utaló buborékot mutattak ki, bár önmagukban a felvételekről nem lehet eldönteni, hogy a foltok

öntési hiba vagy korrózió eredményeiként értelmezhetők-e. A buborékok baltán belüli térbeli pozícióját egy valódi 3D tomográfiás vizsgálat tárná fel, ami eldönthetné a felületi vagy tömbi elhelyezkedés kérdését. Fontos, hogy – bár hasonló eredményeket roncsolásos metallográfiai vizsgálatok már kimutattak – roncsolásmentes módszerrel végzett vizsgálatokkal sikerült megerősíteni a használati tárgy funkciót. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy továbbra sem zárható ki annak lehetősége, hogy a bányavidékekről érkező ötvözött bronz nyersanyag jól szállítható formájaként is szolgáltak a hasonló balták, s életükben többféle funkciót is betölthettek (vö. Vandkilde 2005, a nyakperek többféle funkcióját illetően).

Az abaújdevecseri tekercs a TOF-ND vizsgálat szerint öntött, ezt követően nem történt utólagos megmunkálás a tárgyon. A készítés-technikai megfigyelések és a roncsolásmentes vizsgálat egyaránt azt bizonyítják, hogy a késő bronzkor elejére keltezhető kartekercs viaszveszejtéses öntéssel készült.

Köszönetnyilvánítás

Az EDXRF vizsgálatot a Tübingeni Egyetem 2006-ban Ernst Pernicka és Tobias L. Kienlin vezetésével elkezdett projektje (*Untersuchungen zur Vermittlung der Zinnbronze nach Mitteleuropa über das Karpatenbecken*) tette lehetővé.

Felhasznált irodalom

- Butler, J. J., 2002. Ingots and insights: reflections on rings and ribs. In: Bartelheim, M.–Pernicka, E.–Krause, R. (Hrsg.): *Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt*. Rahden/Westfalen, 229–243.
- David, W., 2002. Studien zu Ornamentik und Datierung der bronzzeitlichen Depotfundgruppe Hajdúsámson-Apa-Ighiel-Zajta. *Bibliotheca Musei Apulenis XVIII*. Alba Iulia.
- P. Fischl K.: Két? lábon járó bronzkoriak? *Bronzkör blog* 2014.02.10. <http://bronzkor.hu/ket-labon-jaro-bronzkoriak/>
- Hänsel, A., Hänsel, B. 1997. *Gaben an die Götter. Schätze der Bronzezeit Europas*. Berlin.
- Hellebrandt, M., 2011. *Bronztekercs Abaújdevecserről — Bronze spiral of*

- Abaújdevecser. Herman Ottó Múzeum Évkönyve 50, 131–152.
- Honti, Sz., Kiss, V. 2013. Bronze Hoard from Zalasabar. New Data on the Study of the Tolnanémedi Horizon – Part 2. In: Anders, A., Kulcsár, G., with Kalla, G., Kiss, V., V. Szabó, G. (eds): *Moments in Time: Papers Presented to Pál Raczky on His 60th Birthday*. Prehistoric Studies I. Budapest, 521–538.
- Káli, Gy., Sánta, Zs., Bleif, H.J., Mezei, F., Rosta, L., Szalók, M. 2007. Commissioning of the high resolution TOF diffractometer at the Budapest Research Reactor. *Zeitschrift für Kristallographie*; Part 1 Suppl 26, 165–170.
- Kasztovszky, Zs. 2007. Application of Prompt Gamma Activation Analysis to Investigate Archaeological Ceramics. *Archeometriai Műhely* 4, 49–54.
- Kasztovszky, Zs., Belgya, T. 2006. Non-destructive investigations of cultural heritage objects with guided neutrons: the ANCIENT CHARM collaboration. *Archeometriai Műhely* 3, 12–17.
- Kienlin, T. L. 2006. Frühbronzezeitliche Randleistenbeile von Böhringen-Rickelshausen und Hindelwangen: Ergebnisse einer metallographischen Untersuchung. *Prähistorische Zeitschrift* 81, 97–120.
- Kienlin, T. L. 2010. Traditions and transformations: approaches to Eneolithic (Copper age) and Bronze age metalworking and society in eastern Central Europe and the Carpathian basin. *BAR International Series* 2184. Oxford.
- Kiss, V. 2009. The Life Cycle of Middle Bronze Age Bronze Artefacts from the Western Part of the Carpathian Basin. In: Kienlin, T. L. & Roberts, B. (Eds.): *Metals and Societies*. Studies in honour of Barbara S. Ottaway. *Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie* 169. Bonn, 328–335.
- Kiss, V. 2012. Middle Bronze Age Encrusted Pottery in western Hungary. *Varia Archaeologica Hungarica* 27. Budapest.
- Kiss V., Barkóczy P., Vizer Zs. 2013. A zalasabari bronzkincs archeometallurgiai vizsgálatának előzetes eredményei. *Gesta XII*, 72–82.
- Kiss, V., Fischl, K.P., Horváth, E., Káli, Gy., Kasztovszky, Zs., Kis, Z., Maróti, B., Szabó, G. 2015. Non-destructive analyses of bronze artefacts from Bronze Age Hungary using neutron-based methods. *Journal of Analytical*

- Atomic Spectrometry DOI: 10.1039/c4ja00377b
- Koós, J. 1989. Der II. Bronzefund von Tiszaladány. *Communicationes Archaeologicae Hungariae* 1989, 31–43.
- Köszegi F. 1993. A Regöly-Veravár késő bronzkori leletgyűjtes tipológiai és időrendi kérdése. *Wosinsky Mór Múzeum évkönyve* 18, 225–235.
- Kovács T. 1977. A bronzkor Magyarországon. *Hereditas*. Budapest.
- Kovács, T. 1992. Die Bestattungsriten der Füzesabony-Kultur und das Gräberfeld von Tiszafüred-Majoroshalom. *Meier-Arendt, W. (Hrsg.): Bronzezeit in Ungarn. Forschungen in Tellsiedlungen an Donau und Theiss*. Frankfurt a.M., 96–98.
- Krause, R. 2003. Studien zur kupfer- und frühbronzezeitlichen Metallurgie zwischen Karpatenbecken und Ostsee. *Vorgeschichtliche Forschungen* 24. Rahden/Westfalen.
- Krenn-Leeb, A. 2006. Gaben an die Götter? Depotfunde der Frühbronzezeit in Österreich. *Archäologie Österreichs* 17, 4–17.
- Krenn-Leeb, A. 2010. Ressource versus Ritual – Deponierungsstrategien der Frühbronzezeit in Österreich. In: *Meller, H.–Bertemes, F. (Hrsg.), Der Griff nach den Sternen. Internationales Symposium in Halle (Saale) 16.–21. Februar 2005. Tagungen des Landesmuseums für Vorgeschichte Halle 5, Halle/Saale*, 281–315.
- Lenerz-de Wilde, M. 1995. Prämonetäre Zahlungsmittel in der Kupfer- und Bronzezeit Mitteleuropas. *Fundberichte aus Baden-Württemberg* 20, 229–327.
- Lutz, J., Pernicka, E. 1996. Energy dispersive X-ray analysis of ancient copper alloys: empirical values for precision and accuracy. *Archaeometry* 38, 313–323.
- Mozsolics, A. 1967. Bronzefunde des Karpatenbeckens. *Depotfundhorizonte von Hajdúsámson und Kosziderpadlás*. Budapest.
- Mödlinger, M., Piccardo, P., Kasztovszky, Zs., Kovács, Gy., Szőkefalvi-Nagy, Z., Káli, Gy., Szilágyi, V. 2013. Archaeometallurgical characterization of the earliest European metal helmets. *Materials Characterization* 79, 22–36.
- Müller, J. 2002. Modelle zur Einführung der Zinnbronzetechnologie und zur sozialen Differenzierung der mitteleuropäischen Frühbronzezeit. In: *Müller, J. (Hrsg.): Vom Endneolithikum zur Frühbronzezeit: Muster sozialen Wandels? Universitätsforschung zur prähistorischen Archäologie* 90. Bonn, 267–289.
- Révay, Zs. 2009. Determining Elemental Composition Using Prompt Gamma Activation Analysis. *Analytical Chemistry* 81, 6851.
- Révay, Zs., Belgia, T. 2004. Principles of the PGAA method. In: *Molnár, G. L. (Eds.): Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/New York, 1–30.
- Révay, Zs., Firestone, R.B., Belgia, T., Molnár, G. L. 2004. Catalog and Atlas of Prompt Gamma Rays. In: *Molnár, G.L. (Eds.): Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/New York, 173–364.
- Szabó G. 1993. Fémmegmunkálási nyomok a Regöly-Veravár késő bronzkori leletgyűjtes tárgyain. *Wosinsky Mór Múzeum évkönyve* 18, 169–224.
- Szabó G. 2009. Csalog József bonyhádi mészbetétes temetője az újabb kutatási eredmények és két egyedülálló lelet tükrében – The cemetery of the Encrusted Pottery culture at Bonyhád in the light of new research and two unique finds. In: *L. Bende, G. Lőrinczy (szerk.): Medinától Etéig. Tisztelgő írások Csalog József születésének 100. évfordulóján*. Szentes, 283–291.
- Szabó G. 2010. Az archaeometallurgiai kutatások gyakorlati és etikai kérdései – Practical and ethical issues of archaeometallurgical research. *Archeometriai Műhely* 7/2, 111–122.
- Szabó G. 2012. Előmunkálatok Bonyhád, Pannónia Zrt. biogáz üzem megelőző régészeti feltárás anyaga feldolgozásához I. (sírmellékletek, embertan). DVD. Szekszárd.
- Szabó G. 2013. What Archaeometallurgy Tells Us about the Changes of Bronze Craftwork in the Carpathian Basin at the Transition of the Bronze Age into Iron Age. In: *Rezi, B.–Németh, E. R.–Berecki, S. (eds.): Bronze Age Crafts and Craftsmen in the Carpathian Basin. Proceedings of the International Colloquium from Târgu Mureş 5–7 October 2012*. Bibliotheca Mvsei Marisiensis, *Seria Archaeologica* VI. Târgu Mureş, 291–312.
- Szentmiklósi, L., Belgia, T., Révay, Zs., Kis, Z. 2010. Upgrade of the prompt gamma

- activation analysis and the neutron-induced prompt gamma spectroscopy facilities at the Budapest research reactor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 286, 501–505.
- Szentmiklósi, L., Kis, Z., Belgya, T., Berlizov, A. N. 2013. On the design and installation of a Compton-suppressed HPGe spectrometer at the Budapest neutron-induced prompt gamma spectroscopy (NIPS) facility. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 298, 1605–1611.
- Vandkilde, H. 2005. A Biographical Perspective on Ösenringe from the Early Bronze Age. In: Kienlin, T. L. (Hrsg.): *Die Dinge als Zeichen: Kulturelles Wissen und materieller Kultur. Internationale Fachtagung an der Johan Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main 3.-5. April 2003. Universitäts-forschungen zur prähistorischen Archäologie* 125. Bonn, 263–281.