

BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK

# Kohászat

Vaskohászat

Öntészet

Fémkohászat

Anyagtudomány

Hírmondó

154. évfolyam

2021/2. szám



Jó szerencsét!

Az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület lapja.

Alapította Péch Antal 1868-ban.

MOLNÁR DÁNIEL – GYARMATI GÁBOR – BARKÓCZY PÉTER – MARÓTI BOGLÁRKA – KIS ZOLTÁN – BÍRÓ CSABA – TARBAY JÁNOS GÁBOR

## Késő bronzkori tokosbalta komplex öntéstechnikai vizsgálata

*A bemutatott munka egy olyan kutatási program esettanulmánya, mely a kísérleti rekonstrukciós jellegű öntést és a használati nyom elemzését kombinálja anyagvizsgálati módszerekkel és szimulációs eszközökkel. Munkánk során szimulációs eszközökkel vizsgáljuk egy késő bronzkori tokosbalta gyártási körülményeit. A szimuláció kiindulási és peremfeltételeit, valamint az eredmények validálását a prompt-gamma aktivációs analízis, a neutrontomográfia és a metallográfia eredményei szolgáltatják.*

### 1. Bevezetés

A bronzbalták legnagyobb számban és változatosságban a késő bronzkor (Kr. e. 1500–900) időszakában figyelhetők meg a Kárpát-medencei leletanyagban. Legnagyobb mennyiségben az ún. tokosbaltákkal találkozhatunk, melyek elsősorban korabeli rituális bronzkincsekből, szórványleletként, ritka esetben sírok mellékleteiként kerültek elő [1, 2]. A tokosbalta, mint baltatípus, fontos technológiai innovációnak számított ebben az időszakban.

A tokosbalták minden esetben üreges öntvények. A vizsgált változataikra jellemző egy megvastagodó, a köpűt körülölelő perem, továbbá egyes típusoknál a nyelezést segítő öntött fül az egyik keskeny oldalon, és/vagy szegecslyukak mindkét keskeny oldal mentén. A fém baltafejet L alakú fába nyelezték be ragasztóanyagok, kötözés, vagy szegecselés segítségével. A tokosbaltákat fegyverként, famegmunkáló és favágó eszközként, daraboló eszközként és fémműves eszközként is használták [3].

A tokosbalták öntése többféle módon történhet, a Kárpát-medencében túlnyomóan a kétrészes, zárt formába, mag alkalmazásával történő öntésre vannak régészeti bizonyítékok [4]. Ezt a gyártási módszert támasztják alá a feltárt öntőforma- és öntőmagleletek, az öntőformaleletek beömlőjével egyező rávágás típusnyomok, az öntvényeken nagyszámban megjelenő formafél-elmozdulások, a



1. ábra. Az isaszegi tokosbalta [5], ltsz. 1903.58.2

balták bordás díszítései és a mag elmozdulásához köthető hibák.

Különösen a késő bronzkor derekától jellemző, hogy a tokosbalta-leletek jelentős része nem tekinthető hibátlan öntvénynek, számos olyan karakteres hibát figyelhetünk meg, melyek a modern öntészetben is hibának számítanak: pórusképződés, zsugorodási hibák, formafél-elmozdulás, hidegfolyás, hiányos öntvény. A hibák többsége olyan általánosan előforduló öntészeti jelenség, mely kiküszöbölhető lett volna. Mivel ezek a tárgyak azonban jel-

**Molnár Dániel** 2002-ben a Miskolci Egyetemen kohómérnök diplomát, 2010-ben ugyanott PhD-címet szerzett. Jelenleg az ME Öntészeti Intézetében tanszékvezető egyetemi docens. Kutatási területe az öntészeti folyamatok számítógépes szimulációja.

**Gyarmati Gábor** szakmai életrajzát 2020/4. számunkban közöltük.

**Barkóczy Péter** szakmai életrajzát 2020/5-6. számunkban közöltük.

**Maróti Boglárka** az Energiatudományi Kutatóközpont tudományos munkatársa, PhD-fokozatát 2019-ben szerezte a Hevesy György Kémiai Doktori Iskolában. Kutatási területe különféle régészeti korú fémtövezek roncsolásmentes jellemzése képalkotó módszerekkel, valamint felületi és térfogati analitikai technikák segítségével.

**Kis Zoltán** az Energiatudományi Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, PhD-fokozatát 1999-ben szerezte a Veszprémi Egyetemen. Kutatási területe a roncsolásmentes anyagvizsgálatok során alkalmazható digitális képalkotás, pozícióérzékelny prompt-gamma aktivációs analízis és Monte Carlo szimulációk.

**Bíró Csaba** a Tűzvarázs Művészeti Műhely alapítója. A Műhelyben bronzműves tevékenységgel foglalkoznak, kísérleti régészeti módszerekkel rekonstruálják a korabeli technológiákat.

**Tarbay János Gábor** régész, főmuzeológus. PhD-fokozatát 2019-ben szerezte az Eötvös Loránd Tudományegyetem Történelemtudományi Doktori Iskola Régészeti Doktori Programján. 2014-től a Magyar Nemzeti Múzeum Régészeti Tárának munkatársa. Alapvető kutatási területe a Kárpát-medence késő bronzkorának fémművessége, kincsleletei és hadtörténete.

lemzően mindennapi eszközök lehetnek, esztétikai hibáikkal nem foglalkoztak, javításnyomok általában csak azok funkcionális részein figyelhetők meg [5].

A vizsgált tokosbalta a Magyar Nemzeti Múzeum (MNM), Régészeti Tárának Őskori Gyűjteményében található, és a Pest megyei Isaszegről származik a késői bronzkorból (1. ábra) [5–6]. Technológiai nyomai alapján megmunkált késztermék lehetett, öntési hibái az esztétikai hibakategóriába sorolhatóak.

## 2. Alkalmazott vizsgálati módszerek

A tokosbalták gravitációs öntéssel előállított öntvények, vizsgálatukra számítógépes szimulációt alkalmaztunk. A szimuláció első lépése a technológiai probléma mögött álló fizikai jelenségek azonosítása és az ezeket leíró matematikai egyenletek felírása volt. Az egyenletrendszerek analitikusan vagy numerikusan kerültek megoldásra, majd a matematikai eredményeket fordítottuk le a technológiai megoldás nyelvére. Kísérleteink során a NovaFlow&Solid szimulációs szoftver segítségével elemeztük a formatelési és dermedési viszonyokat, vizsgálva a beömlőrendszer kialakítását, a formázóanyagok és az eltérő öntési hőmérsékletek hatását [7].

Prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) módszerrel határoztuk meg a tokosbalta-lelet és a replikaöntvény ötvözetét, mely a számítógépes szimulációk során bemenő paraméterként szolgált. A PGAA módszer alkalmas nagyméretű minták kémiai összetételének roncsolásmentes meghatározására. A módszer a vizsgált tárgy neutronnyalábon történő besugárzásán, valamint a neutronbefogást követően kibocsátott gamma-fotonok detektálásán alapszik. A neutronok és gamma-fotonok nagy áthatóképessége miatt a mérés során a besugárzott térfogat átlagos összetételéről szerezhető információ. A neutronbesugárzás és a mérés egyidejűleg zajlik, melyhez jó energiafelbontása miatt nagy tisztaságú germánium detektort használunk. A gamma-csúcsok energiája a mintát alkotó elemekre jellemző, míg az intenzitásuk a mennyiségükkel arányos.

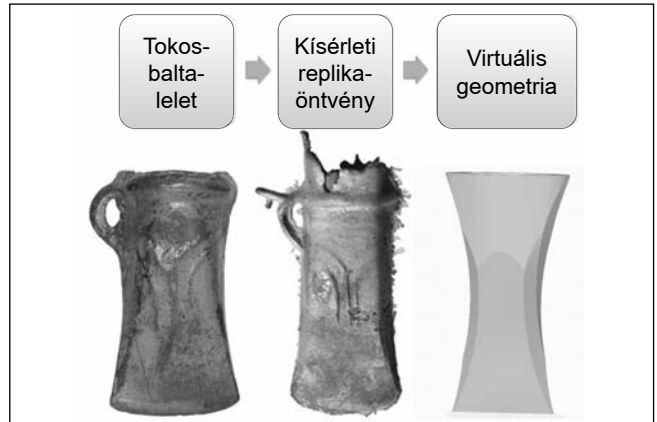
A spektrumkiértékelés HYPERMET-PC szoftverrel történt, az elemazonosítást és a koncentrációsámítást a spektroszkópiai adatkönyvtár segítségével, a ProSpeRo programmal végeztük [8–9]. A PGAA módszert korábban sikeresen alkalmazták késő bronzkori tárgyak roncsolásmentes ötvözetét meghatározására [10].

Neutronos képalkotással vizsgáltuk a tokosbalta-lelet és a replikaöntvény belső szerkezetét és alkottuk meg a vizsgált geometria számítógépes modelljét. A transzmissziós képek alapján a 2D-s neutronradiográfia és a 3D-s neutrontomográfia, az anyagon áthaladó sugárnyaláb gyengülését mérve, információt nyújt a minta belső szerkezetéről. A tomográfia ily módon valójában a radiográfia kiterjesztése. A kis szögekben elforgatott tárgyról készült projekciósorozatból az objektumra jellemző fizikai mennyiség térbeli eloszlása matematikai rekonstrukciós algoritmussal számítható ki. A 3D adathalmaz megjelenítésével, valójában digitális képfeldolgozással, ún. virtuálisvalóság-ábrázolás hozható létre, mely pontról pontra mutatja az anyag neutrongyengítési együtthatóját a behatolás mélységétől füg-

getlenül. A PGAA és a tomográfiai mérések helyszínül a Budapesti Neutron Centrum szolgált [11].

## 3. Elvégzett kísérletek

A vizsgált virtuális geometria reprezentálja a tokosbalta-lelet attribútumait, és segítségével vizsgálhatók a formatelési és dermedési viszonyok. A virtuális geometria a tokosbalta-lelet és a kísérleti replikaöntvény alapján került kialakításra (2. ábra).



■ 2. ábra. Vizsgált geometriák

A virtuális geometria kialakítását indokolta a tokosbalta-lelet korlátozott vizsgálhatósága, valamint, hogy a kísérleti replikaöntvény hordozza azokat az öntési hibákat, amik miatt az azon végzett vizsgálatok eredményei kevésbé tekinthetők reprezentatívnak. A virtuális geometria anyagminőségét a kísérleti replikaöntvény alapján definiáltuk, mely PGAA módszerrel került meghatározásra: 83 m/m% réz (Cu), 11 m/m% ón (Sn) és 6 m/m% antimon (Sb).

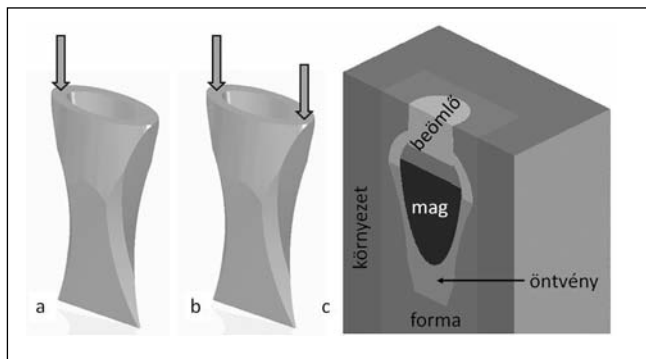
### 3.1. A beömlőrendszer

A virtuális geometria egy kisméretű, ovális keresztmetszetű test, melynek térfogata 43 cm<sup>3</sup>, falvastagsága 4,6-6,2 mm között változik. A szimulációs modell tartalmazza az öntvényt, az annak belső üregeit kiképző magot, a külső felületét kiképző formát és a formát körbevevő környezetet. A vizsgált öntvény gyártásával kapcsolatosan a beömlőrendszer kialakítása volt kérdéses.

A vizsgált tokosbalta- és öntőforma-leletek alapján [4–5] megállapítható, hogy a baltákat jellemzően a perem irányából öntötték, több jellemző beömlőrendszer-típus alkalmazásával. A beömlőrendszer kialakításánál két esetet vizsgáltunk (3. ábra): a) aszimmetrikus és b) szimmetrikus beömlőrendszer-elrendezés. A c) ábrarészen a vizsgált modell középvonalbeli metszete látható.

### 3.2. A forma

A szimulációk során két lehetséges formázási módszert vizsgáltunk, az elvesző és a tartós formába történő öntést. A szakirodalmi források, valamint a MNM gyűjteményében található öntőformák vizsgálata alapján megállapítható, hogy az elvesző formák anyaga döngölt homok vagy agyag volt, míg a tartós formák anyaga jellemzően homokkő,



■ 3. ábra. Vizsgált geometriák

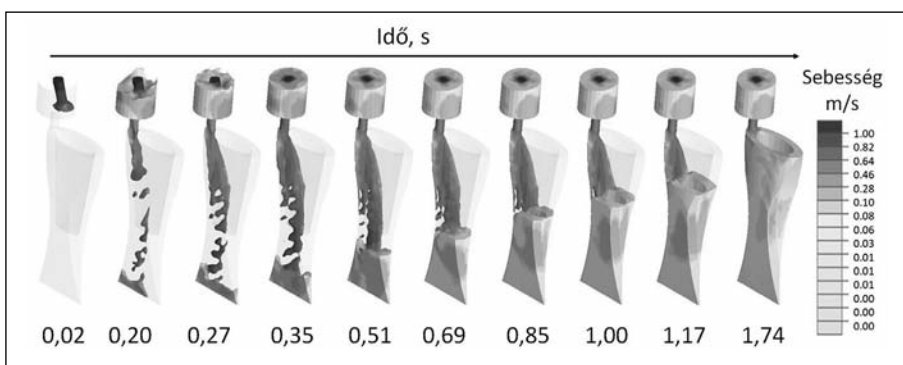
iszapkő, tufa vagy pala [12]. A számítások során az elvesző forma anyagát bentonitos homokformaként definiáltuk, a tartós formába történő öntés esetén egy kőből készült formát vizsgáltunk, melynek anyagtulajdonságait szakirodalmi források alapján határoztuk meg. Feltételeztük továbbá, hogy a formaüreg a talajban került kialakításra, így elvesző forma esetén a forma és a környezet anyaga is homok, míg kőformába történő öntéskor az összezárt formát öntés előtt eltemették a talajba, így a forma anyaga kő, míg a környezet anyaga homok volt. Megjegyzendő, hogy a kísérleti öntések során a formát általában csak félig ássák be a talajba.

## 4. Eredmények

### 4.1. Formatelés

A formatelési vizsgálatok során az olvadékot 1100 °C öntési hőmérsékleten, kanálból öntöttük a formába, 0,5 kg/s térfogatárammal. Mindkét vizsgált beömlőrendszer esetén elvégeztük a formatelési folyamatok vizsgálatát, melyek közül az aszimmetrikus beömlőrendszerrel végzett kísérlet eredményeit mutatjuk be az idő függvényében (4. ábra). Áramlási sebesség skála: 0,00–1,00 m/s.

Mindkét beömlőrendszer esetén az olvadék egy definiált szögben, adott sugárral lép be a beömlőrendszerbe és onnan a rávágáson keresztül a formaüregbe, amit szabadesséssel tölt fel. A kialakuló áramlási sebesség a formaüregben belül magasabb a 0,4 m/s kritikus áramlási sebességnél, ami fölött rézötvözetek esetén turbulencia alakul ki. A turbulencia a szennyezőket és az olvadéksugár felületén kialakult oxidhártyákat bekeveri a térfogatba, ami bifilm



■ 4. ábra. Formatelés aszimmetrikus beömlőrendszerrel

hibákat okoz [13]. A számított formatelési idő szimmetrikus beömlőrendszer esetén 1,40 s, aszimmetrikus beömlőrendszer esetén 1,74 s.

Jó gázáteresztő képességű formák esetén a formaüregben lévő levegő egy része távozik a forma nyitott pórusain keresztül. Ha viszont a formának nincs gázáteresztő képessége, akkor a levegő csak a beömlőrendszeren keresztül tud eltávozni, addig az időpillanatig, míg a beérkező olvadék teljes keresztmetszetében ki nem tölti a rávágást. Az a levegőmennyiség, ami ebben az időpillanatban a formaüregben van, bekeveredik az olvadékba.

A turbulensen mozgó olvadékárammal együtt levegőbuborékok is besodródhatnak a formaüregbe, amiket a felületi turbulencia bekever a fémtérfogatba, ami a kettős oxidhártyák keletkezésének egyik fő oka. A kettős oxidhártyák a bronzötvözetek esetén jellemzően metallurgiai hibákat okoznak, mivel a belsejükben lévő levegő a dermedés során a pórusképződés kiindulópontja [14–15].

### 4.2. Dermedés

A szimulációs kísérletek során 12 különböző kiindulási és peremfeltétellel végeztük el a dermedési viszonyok vizsgálatát, az öntési hőmérséklet értékét változtatva 1015–1100 °C között (1. táblázat). A viszonylag alacsony öntési hőmérsékleteket a bronzkorban rendelkezésre álló olvasztástechnika alapján definiáltuk [16]. A forma és a környezet kiinduló hőmérséklete minden esetben 20 °C volt. Az egyes beállítások alatt a pórusok számított mennyisége (%) látható.

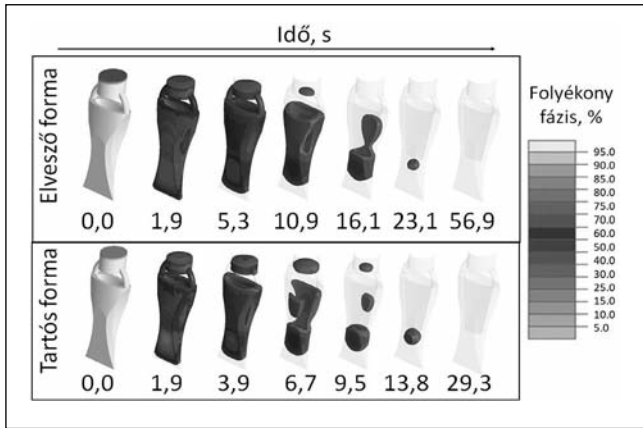
1. táblázat. Kiindulási és peremfeltételek, számított zsugorodás

Elvesző forma						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
T <sub>öntési</sub> , °C	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Forma	homok	homok	homok	homok	homok	homok
Környezet	homok	homok	homok	homok	homok	homok
Zsugorodás, %	2,92	2,977	3,035	3,04	3,069	3,161
Tartós forma						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
T <sub>öntési</sub> , °C	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Forma	kő	kő	kő	kő	kő	kő
Környezet	homok	homok	homok	homok	homok	homok
Zsugorodás, %	3,071	3,128	3,184	3,135	3,244	3,253

nika alapján definiáltuk [16]. A forma és a környezet kiinduló hőmérséklete minden esetben 20 °C volt. Az egyes beállítások alatt a pórusok számított mennyisége (%) látható.

A dermedési folyamatokat szimmetrikus beömlőrendszer esetén az 5. ábrán mutatjuk be az idő függvényében. A felső ábrason az elvesző formában történő dermedés látható az A1 (T<sub>önt</sub>: 1015 °C) esetben, míg az alsó ábrason a tartós formában történő dermedést mutatja a B6 (T<sub>önt</sub>: 1100 °C) esetben. A skálán a folyékony fázis mennyiségét ábrázoltuk (5,00–95,00%). A képeken a már megdermedt öntvényrészeket nem jelenítjük meg.

A dermedési folyamatok jellege a két formázóanyag és a vizsgált öntési hőmérsékletek esetén hasonló. Fő különbség a dermedési idő, mely elvesző forma esetén közel kétszerese a tartós formában kialakulónak. Gravitációs öntészeti esetben a dermedés során kialakuló



■ 5. ábra. A vizsgált öntvény dermedése különböző beállítások esetén

ló zsugorodást jellemzően a tápfejben lévő fémmennyiség kompenzálja. A vizsgált esetben, tápfej hiányában, a beömlőrendszerben lévő fémmennyiség táplálja az öntvényt a rávágáson keresztül. Ez a táplálás addig érvényesül, míg a rávágás el nem fagy, mely a vizsgált elvesző forma esetén a  $t = 6,21$  s időpillanatban (45,2% folyékony fázis), míg tartós formában történő dermedés esetén a  $t = 3,43$  s időpillanatban (52,4% folyékony fázis) történik meg.

Adott öntési hőmérsékleten vizsgálva, a zsugorodások mennyisége a tartós formába öntve mindig magasabb, mint elvesző formába öntve. A zsugorodások eloszlása mindkét formázóanyag esetén hasonló, az egyes eredmények között lokális különbségek vannak. Fő különbség a zsugorodások mértékében van.

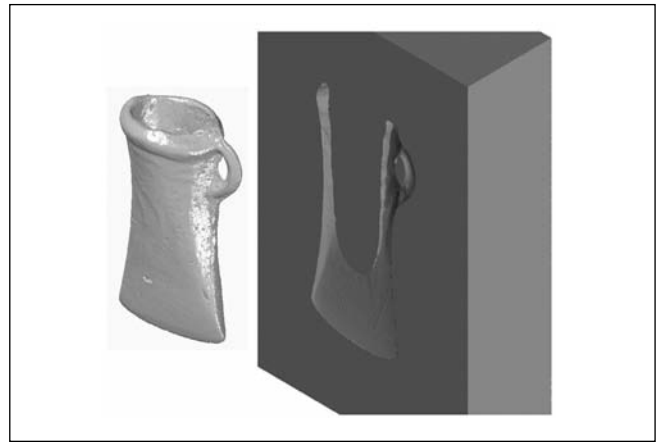
Ha összehasonlítjuk a vizsgált öntési hőmérsékleteket a szakirodalomban fellelhető korabeli olvasztási módszerekkel elérhető hőmérsékletekkel, akkor elmondható, hogy a lehető legalacsonyabb hőmérsékleten történt az öntés [16], amire a tokosbalta-leleteken feltárt öntési hibák is következtetni engednek.

### 4.3. A tokosbalta-lelet geometriájának vizsgálata

A virtuális geometrián elvégzett szimulációk alapján megállapítható, hogy adott anyagminőség esetén a forma anyagának és a túlhevítés mértékének van szignifikáns hatása a zsugorodások kialakulására. Korábban ismertettük, hogy a virtuális geometriát úgy alakítottuk ki, hogy az reprezentálja a tokosbalta-lelet jellemzőit. A virtuális geometrián elvégzett vizsgálatok alapján meghatározhatók azok a fő befolyásoló paraméterek, melyek változtatásának hatását vizsgálni kívánjuk a tokosbalta-lelet további szimulációs vizsgálata esetén. Meghatároztunk egy egyszerűsített kísérleti mátrixot, mely a 2. táblázatban látható. Vizsgálataink célja a legkisebb és a legnagyobb túlhevítéssel történő öntés hatásának vizsgálata elvesző és tartós forma alkalmazása esetén.

2. táblázat. Egyszerűsített kísérleti mátrix

	Elvesző forma		Tartós forma	
	C1	C2	D1	D2
$T_{\text{öntési, } ^\circ\text{C}}$	1015	1100	1015	1100
Forma	homok	homok	kő	kő



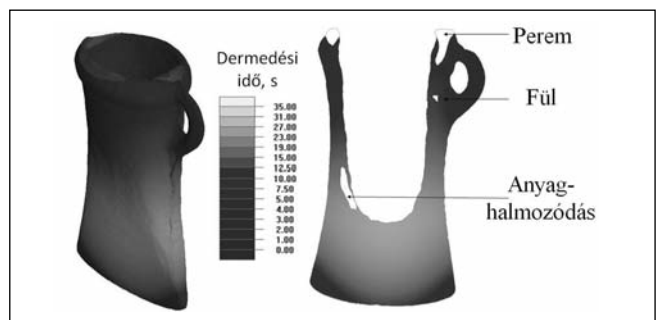
■ 6. ábra. Az öntvény és a forma metszetének geometriája

A lelet számítógépi geometriáját neutrontomográfia segítségével detektáltuk és CAD modellezési eszközökkel javítottuk, előállítva így az eredeti önteni kívánt test közelítő geometriai modelljét ( $V = 20,5 \text{ cm}^3$ ) és azt körbevevő formát, melyek a 6. ábrán láthatóak.

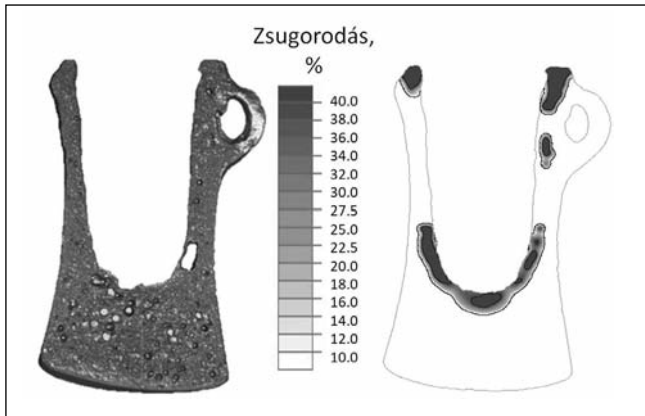
A beömlőrendszert nem hoztuk létre, hanem azokat a geometriai helyeket definiáltuk, ahol az olvadék belép a formaüregbe. A formatelési és a dermedési számításokat csatolt módon végeztük el, ahol első lépésben a formatelést vizsgáltuk, majd a dermedési viszonyokat. A vizsgálatok során a tokosbalta-lelet kémiai összetételét PGAA módszerrel határoztuk meg: 92,0% Cu, 4,8% Sb, 1,1% As, 1,6% Ni, 0,59% Ag, 0,12% Co. Az öntési hőmérséklet 1015 és 1100 °C volt, az olvadékot kanálból öntöttük a homokból és kőből készült szobahőmérsékletű formába, 0,1 kg/s térfogatárammal.

Az olvadék a gravitációnak megfelelően, az öntvény legfelső síkjára merőlegesen lép be a formaüregbe, a szabadon eső olvadék zuhanó jelleggel tölti fel a formaüreget. A formatelés kezdetén az olvadék jelentős turbulenciával fröccsen szét a formaüreg alján, majd ~ 35%-os formakitöltöttségtől kezdve az olvadék mozgása megnyugszik, és egyenletesen emelkedik annak szintje a formaüreg teljes megteléséig. A szabadon eső olvadék sebessége túllépi a kritikus 0,4 m/s értéket, a számított formatelési idő 1,677 s.

A dermedési és lehülési folyamatok vizsgálatát a formatelés után, csatolt módon végeztük, ahol a számítás kezdeti időpillanatában a formaüreg a definiált hőmérsékletű olvadékkal volt kitöltve. A dermedési karakterisztika jellege mindkét formázóanyag esetén közel azonos. Az öntvény számított dermedési idejét az 1100 °C-on, kő formába öntött (D2) esetben mutatjuk be axonometrikus nézetben



■ 7. ábra. Számított dermedési idő, D2



■ 8. ábra. Számított zsugorodások, tomográfias felvétel

és a középvonali metszet vetületén a 7. ábrán. Skála: dermedési idő 0,00–35,00 s.

Mindegyik vizsgált beállítás esetén a geometria először dermedő része a fül és annak környezete, majd sorrendben az él, utána a perem környezete volt. Az utoljára dermedő öntvényrész a maggal kiképzett rész alatti anyaghalmozódás. A 7. ábra metszeti képén látható kitöltetlen, anyaghiányos részek zsugorodási üregeket jeleznek. A dermedés során az öntvény felső részén, a perem környezetében alakul ki anyaghiányos rész, mivel ez a legmagasabb pozícióban lévő öntvényrész az alatta lévő öntvényrészeket táplálja. Az öntvény középső részén, az anyaghalmozódás környezetében alakul ki további anyaghiányos rész, melynek kiterjedése függ a dermedési körülményektől. Tartós formák esetén egy további anyaghiányos rész is kialakul a fül környezetében.

A középvonali metszet vetületén vizsgált zsugorodási üregek az 1100 °C-on, kő formába öntött (D2) esetben a 8. ábrán láthatók, ahol a zsugorodás skála: 0,00–40,00%. Az ábra bal oldalán a tomográfias kép egy mesterséges metszete látható azonos vizsgálati sík esetén.

Az egyes szimulációkra jellemző porozitás értékek a 3. táblázatban láthatóak.

3. táblázat. Számított porozitásértékek

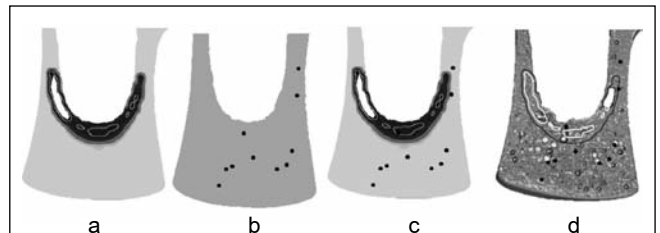
	Elvesző forma		Tartós forma	
	C1	C2	D1	D2
T <sub>öntési</sub> , °C	1015	1100	1015	1100
Forma	homok	homok	kő	kő
Porozitás, %	2,84	3,69	2,80	3,66

A tokosbalta-lelet tomográfiával mért porozitásértéke: 3,4%. A számított porozitásértékek csak a zsugorodási porozításra jellemzők, míg a tomográfias értékek figyelembe veszik a zsugorodási és gázpórusokat is.

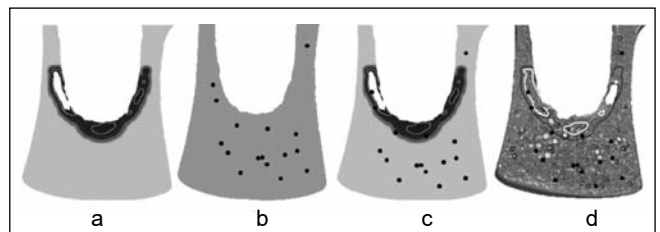
Ahhoz, hogy ne csak a zsugorodási pórusok térfogatának számszerű értékeit, hanem azok eloszlását is össze tudjuk hasonlítani, a szimulációval előállított képeket és a tomográfia eredményeit közösen kell kiértékelni. Ahogy az a 8. ábrán is látható, a szimulációs eredmények megjelenítése során a zsugorodási porozitás egy folytonos skála mentén kerül megjelenítésre, mely azt reprezentálja, hogy mekkora a zsugorodások nagysága egy adott geometriai részen belül. A tomográfiával rögzített képen viszont a zsu-

gorodási és a gázpórusok anyaghiányos helyekként jelentkeznek. A pórusok két eltérő megjelenési formáját grafikai eszközökkel lehet összehasonlíthatóvá tenni.

A számított és a mért értékek közös megjelenítése az anyaghalmozódás környezetében a 9–10. ábrán látható, ahol a) számított zsugorodási pórusok, b) bezárt levegőbuborékok pozíciója, c) számított zsugorodási pórusok és bezárt levegőbuborékok, d) a számított zsugorodási értékek határolóvonalainak és a buborékok pozíciójának közös megjelenítése a tomográfias felvételeken. Az ábrák d) részén a szürke vonalak a  $\geq 10\%$  anyaghiányos helyek határát jelölik, a fehér vonalak a  $\geq 40\%$  anyaghiányos helyek határát jelölik.



■ 9. ábra. A számított és mért eredmények összehasonlítása, C1 eset, T<sub>önt</sub>: 1015 °C

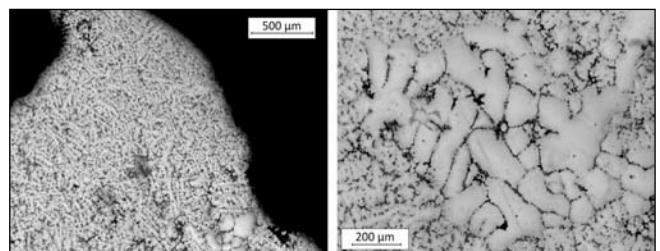


■ 10. ábra. A számított és mért eredmények összehasonlítása, C2 eset, T<sub>önt</sub>: 1100 °C

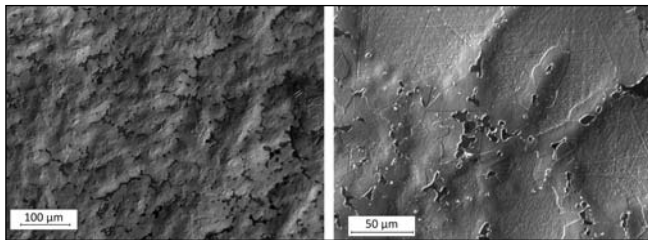
#### 4.4. Mikroszerkezet vizsgálat

Roncsolásos vizsgálat elvégzése csak minimális beavatkozással volt lehetséges. Erre a fül melletti peremrész, a feltételezett beömlőrendszer csonkja adott lehetőséget. A kivett minta beágyazása után mechanikus felületelőkészítést és bemártásos maratást alkalmaztunk, ahol a marószerszám vas-klorid és sósav vizes elegye volt. Az előkészített felületről optikai mikroszkópi felvételeket készítettünk mind világos látótérben, mind interferencia kontraszt alkalmazásával.

A 11. ábrán, a világos látótérben előtűnik az öntött tárgyakra jellemző dendrites szerkezet. A minta nagy részére finom dendrites szerkezet jellemző, kis szekunder dendrit-ágtávolsággal, ami a tárgy gyors hűlésére utal. A dendrit-



■ 11. ábra. Világos látótérű optikai mikroszkópi felvételek



■ 12. ábra. Interferencia kontraszt felvételek

ágak között apró réz-szulfid zárványok láthatóak. A minta közepén, egy viszonylag kis területen, nagyméretű dendritek találhatóak, melyek szekunder dendritágtávolsága jóval nagyobb.

Az interferencia kontraszt felvételeken olyan apró különbségek tűnhetnek elő, amelyek világos látótérben alig látszanak. A 12. ábrán apró újrakristályosodott szemcseszerkezet vehető észre, ahol a szemcsékben a rézötvözetekre jellemző ikerhatárok is láthatóak. Ez az újrakristályosodott szerkezet a nagyméretű dendritok határán igazán szembetűnő. A szemcsék átlagos mérete harmada, negyede a finom dendrites szerkezet szekunder dendritágtávolságának.

A dendrites szerkezeten képlékeny alakváltozás okozta jelentős deformáció nem vehető észre, így kismértékű (50%-nál kisebb redukció) alakváltozás történt. A finom szemcseszerkezet nagy hőmérsékleten bekövetkezett újrakristályosodást mutat, mely hőmérsékleten a tárgy kevés időt töltött, mert a szemcsedurulás hatása nem növelte lényegesen a szemcseméretet. Mivel a tárgyon utólagos megmunkálás nyomai nem figyelhetők meg, így az előző megállapítások mind arra utalnak, hogy a vizsgált terület kristályosodás után, nagy hőmérsékleten deformálódott a tárgy lehűlése közben. Tekintve a szimulációs tanulmány eredményét és a mintavétel helyét, a balta anyaga ebben a térfogatban akkor deformálódhatott, amikor a beömlő rendszert eltávolították, vélhetően letörték, a baltáról. Ez elegendő mértékű képlékenyalakítást jelent a balta ezen területén, hogy az újrakristályosodás meginduljon. A balta hőmérséklete valószínűleg ekkor még olyan nagy volt, közel a szolidusz hőmérséklethez, hogy finom szemcsés szerkezet alakult ki.

## 5. Összefoglalás

A vizsgált bronzkori tokosbalta-lelet esetén az öntési geometria CAD modelljének alapjául a tárgyról készült neutrontomográfias rekonstrukcióból nyert felszíni 3D pontfelhő szolgált, ezen kívül a prompt-gamma aktivációs analízis ötvözetű összetétel eredményei szolgáltatták a szimulációs számítások összetételi bemenő paramétereit. A szimulációs eredmények a tárgy belső szerkezetét feltáró módszerek, a neutrontomográfia és a metalográfia eredményeivel hasonlíthatók össze, illetve validálhatóak.

Az elvégzett vizsgálatok és szimulációs eredmények alapján valószínűsíthető, hogy a tokosbaltát aszimmetrikus beömlőrendszerrel öntötték, melyet az optikai mikroszkópi felvételek is alátámasztanak.

A szimulációs eredmények alapján a tokosbalta öntése tartós formába történt. A kétrészes, zárt formába, mag

alkalmazásával történő öntési módszert a régészeti bizonyítékok is alátámasztják.

A lelet öntése a gyakorlatban a lehető legkisebb mértékű túlhevítéssel történt, melyet a bronzkorban rendelkezésre álló olvasztástechnika is valószínűsít.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik a NovaCast Systems AB cég támogatását, hogy biztosította a NovaFlow&Solid szoftverhez való hozzáférést. *Tarbay János Gábor* hálás a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjért.

## Irodalom

- [1] *A. Mozsolics*: Bronze und Goldfunde des Karpatenbeckens. Depotfundhorizonte von Forró und Ópályi, p. 37–41. Budapest, 1973
- [2] *O. Dietrich*: Vom Meißel zum Beil? Einige Gedanken zu den frühesten Tüllenbeilen im Karpatenbecken ausgehend von den Tüllenmeißeln vom Typ Bullendorf. In: Pop, H. et al. (eds.), Local and Regional Cultural Identities in European Context. Archaeology and historical anthropology. Cluj-Napoca, 2010.
- [3] *B. Roberts, B. S. Ottaway*: The Use and Significance of Socketed Axes during the Late Bronze Age. European Journal of Archaeology vol. 6/2, 2003, 119–140.
- [4] *B. Wanzek*: Die Gußmodel für Tüllenbeile im südöstlichen Europa. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 2, Bonn, 1989.
- [5] *Tarbay J. G.*: A gyermelyi típusú kincsek és koruk, PhD-disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Régészettudományi Intézet, Budapest, 2018.
- [6] *T. Kemenczei*: Unpublished finds in the Prehistoric Collection of the Hungarian National Museum. In: T. Kovács (ed.), Studien zu Metallindustrie im Karpatenbecken und den benachbarten Regionen. Festschrift für Amália Mozsolics zum 85. Geburtstag, Budapest, 1996, 231–247.
- [7] *Jesper Hattel*: Fundamentals of Numerical Modeling of Casting Processes, Polyteknisk, Denmark, 2005
- [8] *Z. Révay et al.*: Prompt gamma-ray spectrum catalog. In: Molnár G. L. (ed) Handbook of prompt gamma activation analysis with neutron beams. Springer, Boston, pp 173–364, 2004
- [9] *Z. Révay*: Determining elemental composition using prompt gamma activation analysis. Analytical Chemistry 81:6851–6859, 2009.
- [10] *J. G. Tarbay et al.*: Non-destructive analysis of a Late Bronze Age hoard from the Velem-Szent Vid hillfort. Journal of Archaeological Science 127, 105320, 2021.
- [11] *Z. Kís et al.*: Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre, Physics Procedia. 69, p. 40–47, 2015.
- [12] *Péterdi Bálint*: Bronzkori és vaskori öntőformák petrográfiai vizsgálata, Óskoros kutatók III. összejevetele, Szombathely, 2004
- [13] *J. Campbell*: Complete Casting Handbook, 2. edn., p. 3–90, Elsevier Ltd. Oxford, 2015
- [14] *H. Song et al.*: Morphology and Fracture of Oxide Bifilm Defects in Nickel-Aluminium Bronze, J. Mater. Res. Technol. 10, p. 926–934., 2020.
- [15] *E. Erzi et al.*: On the Fracture Pressure of Liquid Metals, Mater. Sci. Technol. 35, p. 1656–1659, 2019.
- [16] *R. F. Tylecote*: History of Metallurgy, Maney, London, 1992