

Elmélet és gyakorlat
Régészeti tömörített vasdarabokon végzett kísérleti
kovácsolás a 10. századi Kárpát-medencei
kétélű egyenes kardpengék készítésének tükrében

TÓTH BOGLÁRKA

Bevezetés

Az elmúlt években egy nagy volumenű kutatássorozatnak köszönhetően fellendült a Kárpát-medencében előkerült, 10. századi kétélű egyenes kardok interdiszciplináris vizsgálata. A kutatássorozat két alappillére a kardleletek régészeti, illetve archeometriai–archeometallurgiai (elsősorban metallográfiai) vizsgálata. Ez utóbbi keretében összesen 23 kardpenge elemzése történt meg.¹ A vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy sikerült feltérképezni az egyes pengék mikroszerkezeti jellegzetességeit, megvizsgálni szerkezeti felépítésüket (például hányféle alapanyag felhasználásával kovácsolták a pengét, illetve van-e köztés réteg a pengemag és az él között).² Ezen túl lehetőség nyílt elméleti szinten feltárni a készítés feltételezett lépéseit, valamint a kovácsolás során alkalmazott technikákat. A megfigyelt készítési technikák közül az egyik leggyakoribb az úgynevezett hajtogatásos technika volt, amely során a kovácsolandó anyagot – elsősorban az alapanyag homogenizálása céljából – többször egymásra hajtják és összekovácsolják.³ A folyamat szerves része a kovácshegesztés, hiszen az egymásra hajtott rétegek a kovácsolás hatására hegednek össze.⁴ Ehhez azonban nélkülözhetetlen a megfelelő hőmérséklet és a tiszta felület.⁵ Sikerült továbbá rekonstruálni a kardpengék készítésének lehetséges lépéseit is, ugyanakkor eddig kizárólag csak elméleti szinten foglalkoztam a témával. Úgy vélem azonban, hogy az említett techni-

¹ TÓTH 2023. 5-10.

² TÓTH – TÖRÖK 2023. 31-51.

³ PLEINER 2006. 55.

⁴ PLEINER 2006. 58-60.

⁵ HALMÁGYI – RIEDEL 1986. 37.

ka gyakorlati alkalmazása olyan többletinformációval szolgálhat, amely pusztán a régészeti objektumok archeometriai–archeometallurgiai vizsgálatával nem nyerhető ki. Éppen ezért egy kísérleti kovácsolás keretében arra voltam kíváncsi, hogyan nézhet ki a gyakorlatban a kétélű kardpengéknél oly gyakran megfigyelhető hajtogatás, illetve milyen eredményekre vezethet egy kifejezetten a kovácsolás technikájára összpontosító kísérlet. A hajtogatásos technika részletesebb megértése nem csupán a korabeli vaskohászati gyakorlat rekonstruálása szempontjából bír relevanciával, hanem jelentős mértékben hozzájárul a régészeti leleteken végzett mikroszerkezeti vizsgálatok értelmezéséhez is.

Az ilyen típusú kovácsolási eljárások gyakorlati kipróbálása lehetőséget teremt a mikroszkópos felvételeken megfigyelhető rétegek, hegedési vonalak és inhomogenitások technikai hátterének pontosabb azonosítására. Ebből következően a hajtogatás kísérleti úton történő rekonstruálása elengedhetetlen eszköze a vaskohászati és kovácsolási eljárások történeti-technológiai szintű értelmezésének.

Jelen tanulmányban bemutatom a kísérlet során gyűjtött tapasztalatokat és a kísérlet menetét; a próbatest mikroszkópos vizsgálati eredményeit pedig összevetem a 10. századi, Kárpát-medencei kétélű egyenes kardpengék archeometriai vizsgálatának eredményeivel.

A kísérlet a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-4 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíjprogramjának, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított szakmai támogatásával valósult meg.

A kísérleti kovácsolás alapanyaga: a vasbuca

A régészeti feltárások során előkerülő vasbucák, valamint a különböző vastárgyak a korai vaskohászat és fémmegmunkálás tárgyi emlékei, amelyek kulcsszerepet játszanak a vaskohászati technológiai rekonstrukciójában. A bucavas-eljárás a vaskortól egészen a 14. század első feléig Európában kizárólagosan alkalmazott, technológiailag viszonylag állandó vaskohászati eljárás, amelynek lényege, hogy felszínközeli vasoxid-tartalmú ércből – agyag és homok keverékéből épített bucakemencékben, faszén tüzelőanyag használatával – direkt módon, redukciós eljárással az ércből közvetlenül alacsony karbontartalmú, jól alakítható bucavasat állítottak elő.⁶ Ezek a primer fémes termékek, alakítási nyersanyagként használt alapanyagok közvetlenül őrzik a korabeli kohósítás technológiai sajátosságait, így mikroszerkezeti és kémiai

⁶ TÖRÖK 2011. 14.

elemzésük révén fontos információt nyújtanak a fémes vas előállításának (kohósításának) és felhasználásának (kovácsolásának) rekonstruálásához.⁷ A történeti vasbucák vizsgálata nem csupán a kohósítási technológiáról, hanem az anyag belső szerkezetéről és ezzel együtt annak felhasználhatóságáról is képet ad⁸, ezért alkalmazásuk kísérleti archeometallurgiai kontextusban különösen indokolt.

Az elmúlt évtizedekben a történeti vasbucák vizsgálata több tudományterület határán mozgó kutatások középpontjába került, különösen a leletek technológiai hátterének feltárása, valamint a korabeli vafeldolgozási eljárások kísérleti úton történő rekonstruálása kapcsán. A hazai és nemzetközi kutatások egyaránt arra törekedtek, hogy bucák anyagszerkezeti jellemzőinek feltérképezésével következtetéseket vonjanak le a kohósítás⁹ és az azt követő kovácsolás során alkalmazott technikákra.¹⁰

Az elmúlt évtizedekben Magyarországon is egyre nagyobb figyelem irányult a vasbucák, a belőlük készült köztes termékek és a kész vastárgyak archeometriai-archeometallurgiai vizsgálatára. A kutatások egyik fontos irányát a vasbucák mikroszerkezeti vizsgálata jelentette, amelynek célja a bucák anyagi tulajdonságainak, salakzárványainak, illetve az előállítási folyamathoz kapcsolható metallurgiai jellemzők vizsgálata volt.¹¹ A témában számos tanulmány született, amelyek közül érdemes kiemelni a *Zalavár–Vársziget* és *Lábod–Petesmalom* lelőhelyeken előkerült, 8-9. századi vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálatát. A vizsgálatokból kiderült, hogy a zalavári buca karbontartalma a felülete felé növekszik, szerkezete tömör, és valószínűleg újraizzításon, illetve tömörítésen is átesett¹². Ezzel szemben a petesalmi bucán tömörítésre utaló nyomokat nem találtak. A vizsgált vasbucák súlya megközelíti a 10 kg-ot, ugyanakkor a korai vaskortól a korai középkorig leginkább az 1–3 kg-os súlyú bucák a jellemzőek.¹³ A somogyfajszon feltárt 10. századi vaskohászati műhelycentrumban 1.6 és 3.6 kg közötti tömegű vasbucákat találtak.¹⁴

Hasonlóan érdekes leletnek számítanak a *Keszthely-Fenekpuszta* késő római kori erődítmény lelőhelyén előkerült extrém nagy súlyú (kb. 60 kg), öt

⁷ TÖRÖK 2014. 123-124.

⁸ GÖMÖRI 2000. 257-286.

⁹ TÖRÖK – KOVÁCS 2010. 455-456.

¹⁰ THIELE et al. 2019. 195-196.

¹¹ TÖRÖK et al. 2018. 418.

¹² TÖRÖK et al. 2018. 2.

¹³ PLEINER 2000. 230.

¹⁴ GÖMÖRI 2007. 190.

darab ékelt vasbuca, melyből kettőn archeometriai vizsgálatokat végeztek. A vizsgálat eredményei alapján arra következtettek, hogy a vasbuca a kohósítást követően nem esett át utólagos alakításon. A mintákban nagyszámú gázpórus volt megfigyelhető, a széntartalom pedig rendkívül magasnak bizonyult. A salakzárványok száma feltűnően alacsony volt, kizárólag olvasztási eredetű zárványokat azonosítottak. A vizsgálat eredményei alapján azt feltételezték, hogy kisebb vasbucákat vagy korábbi kohósítások során keletkezett salaktartalmú bucadarabokat adagoltak vissza a kemencébe és ezek összeolvasztásával állították elő az adott darabot.¹⁵

A vasbucák vizsgálata önmagában is fontos információkkal szolgál a korabeli kohósítási technológiákról, azonban a bucavasból készült tárgyak archeometriai és archeometallurgiai elemzése révén a nyersanyagok feldolgozási módjaira is fény derülhet. A vasbucák és a belőlük készült tárgyak technológiai vizsgálata tehát nem választható el élesen egymástól, hiszen az elsődleges kohósítás jellemzői – például a salaktartalom, karbontartalom vagy a szennyeződések jelenléte – közvetlen hatással vannak a végtermék szerkezetére és minőségére. Éppen ezért a különböző korszakokhoz köthető vastárgyak archeometriai vizsgálata – különösen, ha ismert vagy valószínűsíthető, hogy bucavasból készültek – kiegészíti és árnyalja a vasbucákra vonatkozó ismereteinket is.

Jó példát szolgáltatnak erre az *Ordacsehi–Csereföld* lelőhelyen, a *Balaton* déli partvidékén feltárt közép- és késő-La Tène kori településről származó leleteken végzett archeometallurgiai vizsgálatok, melyek során tíz salakminitát, kilenc vaseszközt és egy vasbucát elemeztek.¹⁶ A salakok többsége a bucavas újraizzítását követő salaktalanító kalapálás oxidáló körülményei között keletkezett. A tárgyak jellemzően ferrites vagy ferrit–perlitese, inhomogén szerkezetű vasból készültek, de előfordult martenzites szövetelemet tartalmazó darab is. A szemcseméret, a zárványok elrendeződése és a perlitben gazdag rétegek alapján kimutatták, hogy a tárgyak ugyanabból a vasbucából készültek, a kovácsok azonban a bucavas heterogenitását kihasználva a szövet szerkezet célzott módosításával igazították a karboneloszlást az eszköz funkciójához (pl. élek, hegyek kialakításánál).¹⁷ Szintén a La Tène korhoz köthető a *Szilvásvár–Lovaspálya* lelőhelyen feltárt településrészlet, ahol a kerámia-töredékek mellett jelentős mennyiségű vassalak és a vas feldolgozásához kapcsolódó lelet került elő. A kiválasztott leletek archeometriai vizsgálatából az

¹⁵ TÖRÖK – BARKÓCZY 2023. 177-190.

¹⁶ TÖRÖK et al. 2013. 24.

¹⁷ TÖRÖK et al. 2013. 31.

derült ki, hogy a településhez egy kovácsműhely is tartozott (Kr.e. III. század), amely a magyarországi régészeti leletanyagban kiemelkedő ritkaságnak számít.¹⁸

A vizsgálat szempontjából kiemelt jelentőségűek azok a Kárpát-medencei szűrő- és vágófegyverek, amelyeket vasbucákból kovácsoltak, és amelyeken korábban már archeometriai-archeometallurgiai elemzéseket is végeztek. Nyilván ezek közé tartozik a 10. századi kétélű egyenes kardok archeometriai vizsgálata is, de érdemes kiemelni néhány korábbi kutatási eredményt is. Jó példaként mutatható be a kora középkori vasfegyverek komplex archeometallurgiai vizsgálatára a *Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportjának* (ARGUM) tagjai által elemzett 6. századi, *Pusztataskony–Ledence* 1. sz. lelőhelyén előkerült gepida kard. A vizsgált kardpenge minden valószínűség szerint helyben készült és inkább közepes minőségűnek tekinthető. A jelentősen korrodált, de feltehetően használt fegyvert viszonylag lágy, zárványos, heterogén vasból kovácsolták. A szövetszerkezeti jellemzők inkább gyors, rendszertelen kovácsolási ciklusokra, mintsem tudatosan megtervezett technológiai eljárásra utalnak.¹⁹

A témakörben jelentős *Haramza Márk* kutatása is, aki a Kárpát-medencei szabványok technológiai jellemzőit vizsgálta interdiszciplináris megközelítésben. Kutatásai során megállapította, hogy az általa vizsgált szabványok egynemű alapanyagból, díszítő kovácshegesztés nélkül, hőkezelés alkalmazásával készültek. Eredményei jól illeszkednek a kor fegyverkészítési gyakorlatáról alkotott eddigi képhez, és fontos támpontot jelentenek a hasonló technológiai háttérű leletek értelmezéséhez.²⁰

A 10. századi Kárpát-medencei kétélű egyenes kardok archeometriai-archeometallurgiai vizsgálatáról is publikálásra került néhány esettanulmány, melyekben egy-egy különleges darab vizsgálati eredményei kerültek bemutatásra. Ezek közé tartozik például a *Kunágotán* előkerült, vélhetően bizánci eredetű kétélű kard is, amelyen komplex archeometriai és metallográfiai vizsgálatokat végeztek. A markolatszerelék ólomtartalmú rézötövetből, míg a penge martenzites zónákat is tartalmazó nagy karbontartalmú alapanyagból készült. A lelet technikai sajátosságai új adatokkal szolgálnak a bizánci eredetű kardok készítőtechnikájára vonatkozóan.²¹

¹⁸ TANKÓ et al. 2019. 389-392.

¹⁹ TÖRÖK – KOVÁCS 2011. 342.

²⁰ HARAMZA 2019. 158-171.

²¹ TÖRÖK et al. 2022. 282-284

A korábbi példák jól mutatják, milyen következtetések vonhatók le komplex archeometriai-archeometallurgiai elemzések révén, függetlenül attól, hogy ezeket a vizsgálatokat vasbucákon vagy tárgyakon végezték el. Jelen kutatás fókuszában azonban nem a késztermékek, hanem a vassfeldolgozás korai fázisát képviselő vasbuca, pontosabban annak egyik továbbdolgozott változata (tömörített vastuskó) áll. Ennek megfelelően a következőkben a kísérlethez felhasznált tömörített vasdarab előkerülésének körülményeit mutatom be. A *Dédestapolcsány–Verebce-bérc* lelőhelyen az *Eötvös Loránd Tudományegyetem Régészeti Intézetének* kutatói 2008²² óta végeznek régészeti feltárást.²³ Az *Északkelet-Magyarországon* található, kora vaskori erődített település a Kr. e. 7. század végén pusztult el, feltehetően ostrom következtében, amit a feltárt leégett épületek, valamint a több száz szkíta típusú nyílhegy egyértelműen alátámaszt. A kerámia- és fémtárgyak, valamint a gazdag fémleletanyag tanúsága szerint a település a korai vaskor idején (Kr. e. 7. század vége – 6. század eleje) élte virágkorát.²⁴

A feltárást során kiemelkedő mennyiségű vas- és bronztárgy, illetve fémmyersanyag került elő. Több mint harminc olyan objektumot dokumentáltak, a teljes területen összesen több mint 600 vaskohászati eredetű leletet gyűjtöttek össze. A Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportja három kiválasztott darabon végzett részletes archeometriai vizsgálatot, amelyek célja az anyagszerkezeti jellemzők feltárása, valamint a leletek feldolgozottsági szintjének, technológiai hátterének meghatározása volt.²⁵ A vizsgálatok alapján a vasdarabok enyhén heterogén, pórusos szerkezetűek, tömörített buca-vasból származnak, de nem több darab egybeolvasztásával, hanem egyetlen buca részeként jöttek létre. A vizsgálathoz kiválasztott darabok hasonlóságot mutatnak, mégis eltérések figyelhetők meg a karbon tartalom és az alakítás mértéke alapján. Ezek a darabok nem sorolhatók egyértelműen sem a nyers vasbuca, sem a kész tuskó kategóriájába – átmeneti állapotot képviselnek a vassfeldolgozás technológiai sorában.²⁶

A kovácspróba-hoz egy olyan tömörített darabot választottam ki, ami az előbbiekben említett dédestapolcsányi lelőhelyen folyt kutatás keretein belül, *Kovács András* által felfedezett nagy vasbuca-depóból származik, és amelyen előzetesen archeometriai vizsgálatokat is végeztek. A vizsgálati eredmények alapján lehetőség nyílt arra, hogy tudatosan, a szerkezeti sajátosságokat figye-

²² V. SZABÓ et al. 2014. 1-2.

²³ V. SZABÓ et al. 2022. 296-297.

²⁴ V. SZABÓ et al. 2023. 614-617.

²⁵ TÖRÖK et al. 2024. 287.

²⁶ TÖRÖK et al. 2024. 292-293.

lembe véve válasszam ki a megmunkálásra legalkalmasabb darabot. Ez a körülmény különösen értékessé teszi a kísérletet, mivel lehetőséget biztosított egy már ismert szerkezetű alapanyag gyakorlati megmunkálására. A következő fejezetben a kovácsolás menetét, körülményeit, valamint az így kialakított próbatestek mikroszerkezeti vizsgálatának eredményeit ismertetem.

A próbakovácsolás

Az előzetes archeometriai vizsgálatok eredményeit figyelembe véve a dédestapolcsányi lelőhely 9. számú depójából származó, 27-es leltári számú bucavasat választottam ki a kovácsolási kísérlet alapanyagául (**1. ábra**). A darabról korábban végzett vizsgálatok részletes információt nyújtottak a szövetszerkezetről és a karboneloszlásról, ami lehetőséget biztosított arra, hogy a kovácsolás utáni eredményeket összevethessük az eredeti állapottal. Mivel a vizsgálatok céljából a bucát korábban kettévágták, a kovácspróbaához annak csak nagyobbik felét használtam fel.



1. ábra. Dédestapolcsány – Verebce-bérc lelőhely 9. számú depójából származó 27-es leltári számú tömörített vastuskó, amit a kísérlethez használtam fel alapanyagként

A próbakovácsolás Tóth Zoltán Henrik segítségével került kivitelezésre, az ő saját, hagyományos eszközökkel felszerelt kovácsműhelyében. A kivá-

lasztott darabot faszenes kemencében hevítettük, és amikor az anyag hőmérséklete elérte a hozzávetőlegesen 950–1000 °C-ot, megkezdtuk annak tömörítését. Ezt a műveletet körülbelül 15 percenként megismételtük. Mintegy két óra hevítés után került sor az első hajtásra: a darabot kézi kovácsolással elnyújtottuk és félbehajtottuk, miközben gondosan ügyeltünk arra, hogy a kontaktfelületek kellően tiszták legyenek. A felületek tisztántartásához folyatóként egyszerű kvarchomokot használtunk.

A hajtást és kovácshegesztést követően további tömörítést és nyújtást végeztünk, majd a bucadarabot ismételten félbehajtottuk. A különféle kovácsolási lépések – beleértve az előkészítést, a tömörítést, a hajtásokat, valamint a végső formázást – összesen mintegy hat órát vettek igénybe, ez idő alatt négyszer hajtottuk meg az anyagot (**2. ábra**). A teljes alapanyag eredeti tömege 1535 gramm volt, amelyből a kísérlethez 846 grammos darabot használtunk fel. A második hajtást követően a munkadarab súlya 486 grammra csökkent, míg a kovácsolási folyamat végén készült próbatest tömege mindössze 207 gramm volt.



2. ábra. A próbakovácsolás során az első lépés az alapanyag hevítése és tömörítése (1.) volt, ezt a formázás és nyújtás követte (2.), majd a hajtás (3.), végül pedig a hajtást követő kovácshegesztés (4.). A teljes folyamatot összesen négyszer ismételtük meg.

A kísérlet során egy rétegzett szerkezetű félkész próbadarab készült, amely jól vizsgálhatóvá teszi a hajtogatás anyagszerkezetre gyakorolt hatásait (**3. ábra**). A következőkben a próbatest archeometriai vizsgálatának eredményeit mutatom be.

A próbatest archeometriai vizsgálata

A kovácsműhelyben kialakított próbatestből összesen három minta került kimetszésre archeometriai vizsgálatok elvégzésének céljából. A mintákat a *Miskolci Egyetem Anyag- és Vegyészmérnöki Karának* egyik műhelyében vágták ki úgy, hogy a próbatestből a lehető legtöbb információ nyerhető legyen. A próbatest kialakítása során egy elvékonyított, elnyújtott oldal, valamint egy tömörebb, masszívabb, szögletes oldal jött létre. Mind az elvékonyított, mind a tömörebb oldalból egy-egy mintát vágtak ki, utóbbit pedig a műhelyben még egyszer kettévágták (**3. ábra**). A vágást követően a mintákat hidegen szilárduló műgyantába ágyazták, majd csiszolás, polírozás és maratás után (a maratáshoz 2%-os nitalt használtak) a Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportjának munkatársai (ARGUM) elvégezték a mikroszkópos vizsgálatokat.



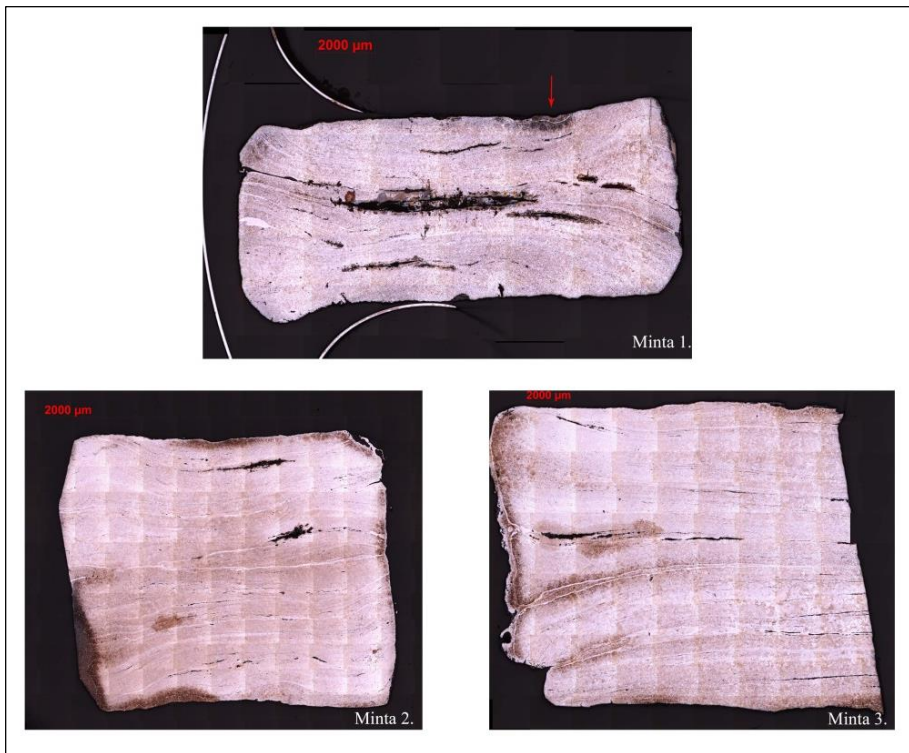
3. ábra. A kísérlet során kialakított próbatest, amelyből három minta került kimetszésre

Az optikai mikroszkópos (OM) vizsgálatokat mozgatható tárgyasztallal rendelkező Zeiss Stereo AxioImager készülékkel végeztük, melynek segítségével a penge szövetelemeinek jellegzetességeit, eloszlását és a fázisok alakját tanulmányoztuk, így átfogó képet kaptunk a szövetszerkezetről. Ezt követően pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek is készültek, amelyek jóval nagyobb felbontásuk révén részletgazdagabb információt nyújtanak, mint az OM-képek. A Zeiss EVO MA10 elektronmikroszkóp EDAX típusú energiadiszperzív mikroszondával volt felszerelve, amely lehetővé tette EDS-összetételmérések elvégzését.

A SEM-felvételek egy része visszaszórt (back-scatter) elektronokkal készült (BSD jelöléssel), ahol a nagyobb rendszámú elemek területei világosabb, a kisebb rendszámúaké pedig sötétebb árnyalatban jelennek meg. Ezáltal nemcsak a minta szövetszerkezetéről nyerhető értékes információ, hanem

az anyagban található zárványokról is. A szekunder elektronokkal készített felvételek (SEI jelöléssel) az egyes szövetelemek azonosítására, valamint arányuk és alakjuk vizsgálatára alkalmasak.²⁷ Az EDS-módszerrel a mintában előforduló zárványok kémiai összetétele is meghatározható; a mérések vizsgálati pontjait az adott SEM-felvételeken számmal jelöltem, míg az egyes zárványok tömegszázalékos összetétele az ábrák alatt szerepel.

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok során jól kirajzolódtak a kovácsolás és hajtogatás folyamata során kialakult rétegződések, illetve a kovácshegesztési vonalak részletes szerkezeti jellemzői. A többszöri tömörítés és hajtogatás eredményeként a próbatest anyagszerkezete jelentősen egységesebbé vált, ugyanakkor bizonyos területeken továbbra is kimutatható volt a heterogenitás (4. ábra). Szövetszerkezetében egyaránt jelen van a ferrit és a perlit is.



4. ábra. A minták optikai mikroszkópos mozaikfelvételei. A felvételeken jól kivehető a kovácshegesztés jellegzetességei, köztük a kisebb-nagyobb karbontartalmú rétegek is

²⁷ POZSGAI 2016. 7.

A tanulmányban szereplő mikroszkópos felvételeken jól megfigyelhető a hajtogatott alapanyag réteges szerkezete. A párhuzamosan futó vonalak a kovácsolási rétegződés jellegzetes nyomai, amelyek a többszöri hajtogatás és tömörítés eredményeként alakultak ki. A metszet közepén látható nagyméretű vízszintes zárványok olyan szennyeződések, amelyek a kovácsolási vagy még a kohósítási folyamat során az anyagba záródtak.

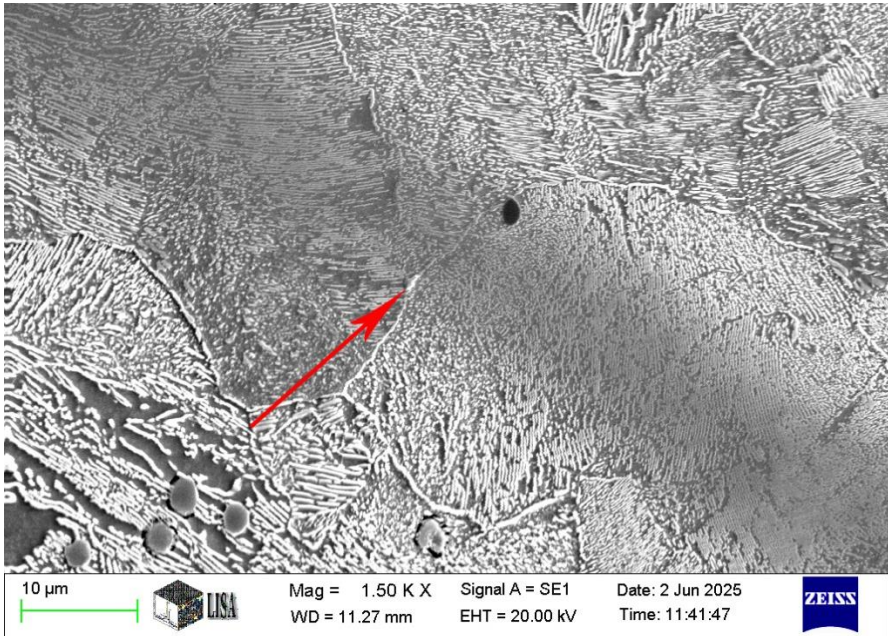
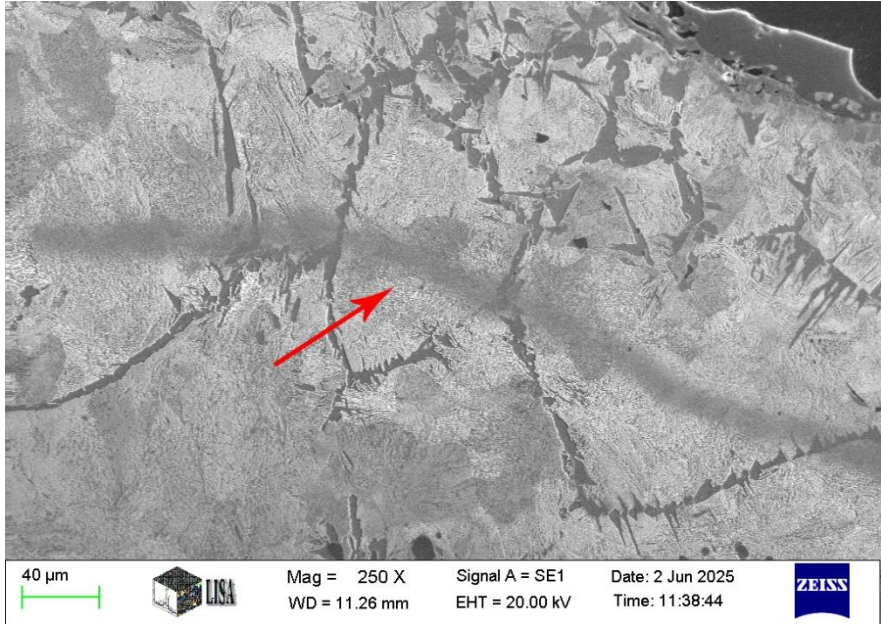
A vizsgált metszet optikai mikroszkópos felvételein világosabb, fehéres sávok figyelhetők meg, amely első ránézésre kovácsolási-hajtogatási vonalnak tűnhetnek (4. ábra nyíllal jelölt része). Az elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján viszont arra lehet következtetni, hogy az említett sávok nem feltétlenül a hajtogatás során keletkezettek. A zónában a perlit jelentősen finomabb, miközben a szemcsék, illetve a lemezes perlit folyamatosan követhetők, ami ellentmond a hajtogatott szerkezet egyik legtipikusabb jellegzetességének. A jelenség értelmezése szerint a területen magasabb széntartalmú zóna alakult ki, amely a bucavas tömörítéséből és a nyersanyag eredeti inhomogenitásából származhat, vagy bizonyos maradványelemek magasabb koncentrációjára utalnak, amik az előkészítéshez használt marószerre másképpen reagálnak. A lassabb hűlés következtében a perlit részben kilágyult (**5. ábra**).

A vizsgált jelenség egyértelműen megkülönböztethető attól az esettől, amikor a kovácsolási folyamat eredményeként alakulnak ki az anyagban a különböző rétegek. Amikor a hajtogatás egyértelmű nyomáról van szó, a réteghatárok mentén a szemcsék erőteljes alakváltozása, szemcseméret-különbségek figyelhetők meg. Az ilyen hegesztési zónákban nagyméretű, de erősen deformálódott szemcsék jelennek meg, amelyek ellentétben állnak az előbbi bekezdésben leírt szövetszerkezettel (**6. ábra**).

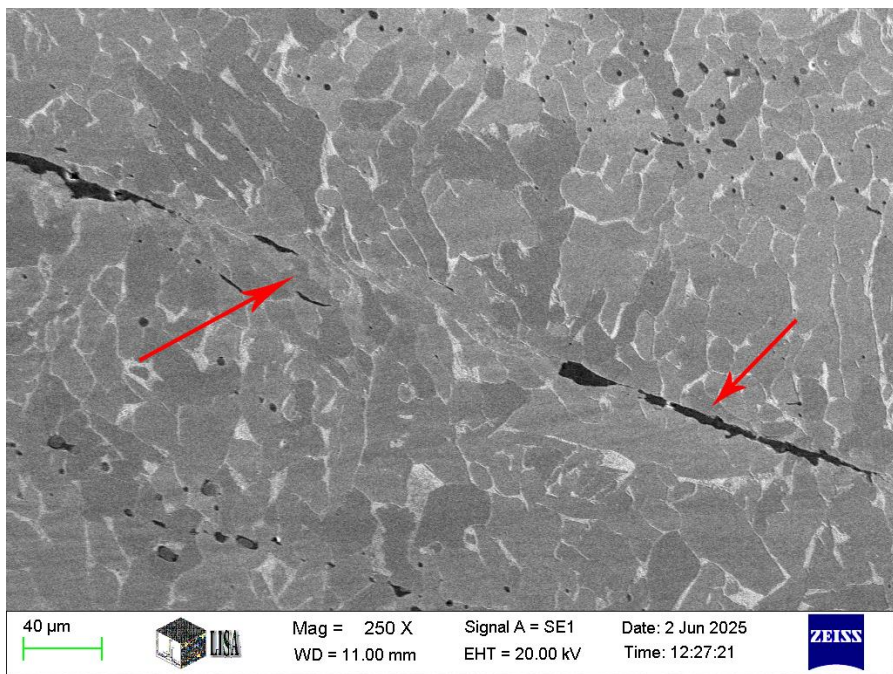
A vizsgálat során a zárványok összetételében is különbségek mutatkoztak: a felső zónában főként kalciumos salakzárványok, az alsóban nagyobb foszfortartalmú zárványok fordultak elő. A felső részben jelentősen nagyobb volt a salakzárványok mennyisége, ami visszamaradhatott a bucadarabból, de egyaránt keletkezhetett a kovácsolás során is. Ugyanakkor a salakzárványok mérete, töredezettsége, illetve elhelyezkedése alapján az is elmondható, hogy ezeket a szennyeződések kézi kovácsolással nagyon nehezen lehet tökéletesen eltávolítani az anyagból.

Összehasonlítás és konklúzió

A 9–11. századi kétélű kardpengék technológiai vizsgálata nem csupán a korszak fegyverzetének jobb megértését teszi lehetővé, hanem a kovácsmesterségben alkalmazott anyagismeret és technikai tudás szintjére is rávilágít.



5. ábra (a-b): Elektronmikroszkópos felvétel a penge egyik fehér sávjáról, ahol a finomabb perlites szerkezet inkább a bucavas inhomogenitására vagy maradványelemek feldúsulására utal, mint hajtogásra.



6. ábra: Mikroszerkezet a hajtogatás és kovácshegesztés egyértelmű nyomaival: a réteghatárok mentén erősen deformált, nagy szemcsék és szemcseméret-különbségek figyelhetők meg.

A korszakban készült kardok a legmagasabb presztízsű fegyverek közé tartoztak, amelyek előállítására igen nagy szakértelmet igényelt. A Kárpát-medencei 10. századi kétélű egyenes kardokon elvégzett archeometriai vizsgálatok alapján sikerült rendszerezni a kardpengékhez kapcsolódó különböző készítésestechnikai jellegzetességeket. Ahogy a bevezetésben is említésre került, a pengék esetében a leggyakrabban megfigyelt készítésestechnika az úgynevezett hajtogatás volt. A megvizsgált 23 kardpenge több mint a felénél találtam erre utaló nyomokat, különösen azoknál a pengéknél, amelyeket több darabból kovácsoltak. A hajtogatást elsősorban a penge magjánál volt megfigyelhető, egy esetben pedig a penge élében is azonosítottunk ilyen nyomokat.

A nemzetközi szakirodalom alapján kiderül, hogy a kétélű kardpengék mikroszkópos vizsgálata során a kovácshegesztési vonalak gyakran világosabb maradási sávként jelennek meg, amelyekben a környező mátrixhoz képest magasabb koncentrációban fordulnak elő bizonyos maradványelemek (pl. Ni, Co, As).²⁸ Ezeknek az elemeknek a feldúsulása a bucavas- és acélda-

²⁸ HOŠEK et al. 2021. 11.

rabok rétegeiben, az ismételt hevítések során, a tűzben lezajló oxidáció következményeként jöhet létre. A kovácshegesztési vonalak maratás után azért válnak különösen jól láthatóvá, mert az ilyen, maradványelemekben gazdag zónák ellenállóbbnak bizonyulnak a maratással szemben, mint a pengét alkotó általában ferrites–perlites mátrix.²⁹

A kísérleti kovácsolás során megfigyelt jelenségek több ponton is párhuzamba állíthatók a 10. századi kardpengék hegesztési zónáinak mikroszkópos felvételeivel. A hajtogatás, valamint az ezt követő kovácshegesztés nyomai és a fent említett világos maratási vonalak mind a kísérleti próbatest, mind a kardpengék mikroszkópos felvételein markánsan megjelennek. A próbatest mintájának EDS-vizsgálata során azonban az egyik feltételezett hegesztési vonalnál 1,49 tömeg% arzént³⁰ detektált a műszer, ami inkább elemdúsulásként értelmezhető, semmint tényleges hegedési határként (**5. ábra**). Ezt a megfigyelést alátámasztja az is, hogy az elektronmikroszkópos felvételeken látható finom perlites szövetszerkezetben nem azonosítható réteghatár, és nincs szövetszerkezeti deformáció sem. A hajtogatás következtében mind a próbadarab, mind a pengék felvételein jól elkülöníthetők a különböző karbontartalmú zónák rétegződései, a szemcseméretbeli eltérések, valamint a réteghatárok mentén megfigyelhető összetört, deformált szemcsék. Emellett mindkét esetben azonosíthatók voltak a bucavas alapvető inhomogenitásai, a különböző típusú és formájú salakzárványok és a karbontartalom változásai, amelyek a hajtogatás sajátosságaira utalnak; ezekre a jelenségekre a **7. ábra** is szemléletes példákat mutat a kétélű egyenes kardpengék vizsgálati eredményei közül.

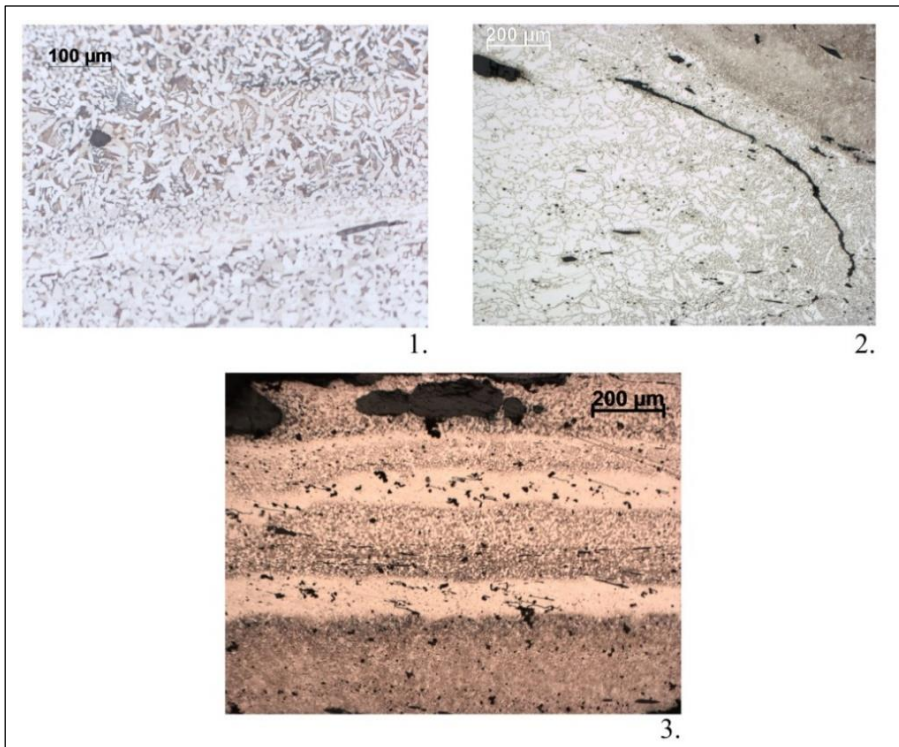
A kísérleti kovácsolás és a régészeti leletek vizsgálata közötti párhuzamok nemcsak az egyes technikai megoldások hiteles rekonstrukcióját tették lehetővé, hanem a korszak technikai-technológiai szintjének szélesebb körű értelmezését is. A hajtogatás, újrakovácsolás és az ezzel együtt járó tömörítés célja mindenekelőtt az alapanyag belső szerkezetének homogenizálása volt, különösen a heterogén, salakzárványokban és üregekben gazdag bucavas ese-

²⁹ HOŠEK et al. 2021. 12.

³⁰ A kora középkori angolszász és viking kések vizsgálata során kétféle hegesztési vonalat sikerült azonosítani: az éles, fehér és a halványabb, sárgás típusokat, amelyek korábban nem kerültek leírásra. A kémiai elemzések ugyan nem mutattak egyértelmű mintázatot, de általában a fehér vonalak több arzént, míg a sárgások inkább nikkelt tartalmaztak, bizonyos esetekben pedig réz- és foszfordúsulás is megfigyelhető volt. A vizsgálatok rávilágítottak arra, hogy ezek a jelenségek a felhasznált fémek és ércnyersanyagok összetételével állhatnak kapcsolatban. BLAKELOCK 2012. 175-179.

tében. A hajtogatás és az ezzel összefüggő kovácshegesztés révén az anyagban található szennyeződések részben eltávolíthatók voltak, ami elősegítette a mechanikailag stabilabb, egységesebb szövetszerkezet kialakítását.

A kísérleti kovácsolás során előállított vasanyag mikroszerkezeti vizsgálata igazolta, hogy a többszöri hajtogatás nyomán a nagy kiterjedésű inhomogenitások eltűnnek, a zárványok feldarabolódnak és megnyúlnak. A nagyméretű zárványok száma ugyan csökkenhet, viszont a folyamat során újabb, kisebb méretű zárványok sokasága is létrejöhet. Ez arra mutat rá, hogy a hajtogatás egyszerre járulhat hozzá a szövetszerkezet finomodásához és egyben új hibaforrások megjelenéséhez is, vagyis a technológia alkalmazása bizonyos kockázatot is jelentett.



7. ábra. A kétélű egyenes kardpengék mikroszkópos felvételein látható inhomogenitások, salakzárványok és karbontartalom-változások, amelyek a hajtogatás technikájának jellegzetességeire utalnak. 1.: Budapesti szórványlelet (Itsz.: 79.5.1.; BTM Aquincumi Múzeum Népvándorlás kori Gyűjteménye). 2.: Egri kard/ismeretlen lelőhely (Itsz.: 54.84.1.; Dobó István Vármúzeum, Eger. 3.: Fülöp Gyula kard/ismeretlen lelőhely (Itsz.: n.a.; Szent István Király Múzeum, Székesfehérvár).

A karpengékben megfigyelhető világos vonalak értelmezésekor különösen fontos az elektronmikroszkópos vizsgálatok alkalmazása. Amint jelen tanulmány is rávilágít, nem minden fehér/világos vonal tekinthető a hajtogatás vagy kovácshegesztés egyértelmű bizonyítékának. Ilyen jelenségek kialakulhatnak a metallográfiai előkészítés során alkalmazott marószerek használata által és értelmezhető bizonyos elemek lokális dúsulásaként is. A technika alkalmazását ezért elsősorban a szemcsedehformációk, zárványláncok elhelyezkedése, illetve a réteghatárok megfigyelése támaszthatja alá, amelyek megbízhatóbban utalnak a hajtogatás/kovácshegesztés tényleges használatára.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány nem jöhetett volna létre *Dr. Török Béla* (Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, ARGUM) szakmai vezetése nélkül. Köszönettel tartozom továbbá *Dr. Barkóczy Péternek* (Miskolci Egyetem, Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, ARGUM) az optikai mikroszkópos vizsgálatokért, valamint *Kovács Árpádnak* (Miskolci Egyetem, Fém-tani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, ARGUM) az elektronmikroszkópos felvételek elkészítéséért. Külön köszönöm *Tóth Zoltán Henrik* munkáját, aki a kísérlethez tartozó próbatestet kovácsolta, továbbá az *Eötvös Loránd Tudományegyetem Régészeti Intézete* munkatársainak tartozom köszönettel, akik a kísérlethez szükséges régészeti eredetű alapanyagot biztosították.

Bibliográfia

BLAKELOCK 2012.

Blakelock, S., Eleanor: *The Early Medieval Cutting Edge of Technology: An archaeometallurgical, technological and social study of the manufacture and use of Anglo-Saxon and Viking iron knives, and their contribution to the early medieval iron economy*. PhD disszertáció, University of Bradford, 2012.

GÖMÖRI 2000.

Gömöri János: *Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannoniában*. Sopron, 2000.

GÖMÖRI 2007.

Gömöri, János: The Bloomery Museum at Somogyfajsz (Hungary) and Some Archaeometallurgical Sites in Pannonia from the Avar- and Early Hungarian Period. = *Metalurgija – Journal of Metallurgy*, 2007/2. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 2007.

HALMÁGYI – RIEDEL 1986.

Halmágyi Szabolcs – Riedel Lóránt: *Régi fegyverekről*. Budapest, 1986. Műszaki Könyvkiadó.

HARAMZA 2019.

Haramza Márk: *A 9–10. századi kárpát-medencei szabályák archeometallurgiai és hadtörténeti vonatkozása*. PhD disszertáció. Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Budapest, 2019.

HOŠEK et al. 2021.

Hošek, Jiří – Košta, Jiří – Žákovský, Petr: *Ninth to Mid-Sixteenth Century Swords from the Czech Republic in their European Context. Part II. Swords of Medieval and Early Renaissance Europe as a Technological and Archaeological Source*. Prague – Brno, 2021.

PLEINER 2000.

Pleiner, Radomir 2000: *Iron In Archaeology – The European Bloomery Smelters*. Archeologický ústav AV ČR, Praha.

PLEINER 2006.

Pleiner, Radomir 2006: *Iron In Archaeology – Early European Blacksmith*. Archeologický ústav AV ČR, Praha.

POZSGAI 2016.

Pozsgai, Imre: *Képalpöntés, kémiai analízis és szerkezeti vizsgálat a korszerű pásztázó elektronmikroszkópban*. Typotex, 2016.

TANKÓ et al. 2019.

Tankó Károly – Török Béla – Farkas Csilla: A késő vaskori fémmegmunkálás leleteinek régészeti és archeometriai vizsgálata Szilvásvárad – Lovaspálya lelőhelyen. = *ΜΟΜΟΣ X. Őskoros Kutatók X. Összejövetelének konferenciakötete. Őskori technikák, őskori technológiák* (Szerk.: Vicze Magdolna és Kovács Gabriella). Szászhalombatta, Matrica Múzeum, 2019, 383-409.

THIELE et al. 2019.

Thiele Ádám – Juhász Gergely Marcell – Hošek, Jiří – Kucypera, Paweł – Török Béla – Haramza Márk: A díszítő kovácshégesztés (damaszkolás) szerepe a kora középkori kardpengékben. = *A Laczkó Dezső Múzeum Közleményei*, 29. Veszprém, 2019, 169-196.

TÓTH – TÖRÖK 2023.

Tóth Boglárka – Török Béla: A kiskundorozsmai kard az archeometriai vizsgálatok fókuszában. Készítéstechnológiai elemzés. = *Bányászattörténeti Közlemények*, 18. Rudabánya, 2023, 31-54.

TÓTH 2023.

Tóth Boglárka: A 10. századi kárpát-medencei kétélű egyenes kardok archeometriai aspektusú vizsgálata – kutatási célok és előzetes eredmények. = *Gesta*, XX. Miskolc, 2023, 3-11.

TÖRÖK – BARKÓCZY 2023.

Török Béla – Barkóczy Péter: Keszthely-Fenekpuszta késő római lelőhelyről származó rendkívüli méretű vasbucák archeometriai vizsgálata / Archaeometri-

- al examination of iron blooms of extraordinary size from the Late Roman site of Keszthely-Fenekpuszta. (In Hungarian with English abstract). = *Archeometriai Műhely*, 2023. XX/2. 177–190.
- TÖRÖK – KOVÁCS 2010.
Török Béla – Kovács Árpád: Crystallization of Iron Slags Found in Early Medieval Bloomery Furnaces; 5th International Conference on Solidification and Gravity, Miskolc-Lillafüred, Hungary, (2008). = *Materials Science Forum* 649. Trans Tech Publications, Switzerland, 2010. 455-460. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.649.455
- TÖRÖK – KOVÁCS 2011.
Török Béla – Kovács Árpád: Kora középkori gepida kard archeometallurgiai vizsgálata. Archaeometallurgical investigations of an Early Medieval Gepidic sword. = *Archeometriai Műhely*, 2011/VIII./4. Budapest, 2011. 337-343.
- TÖRÖK 2011.
Török Béla: Vasérc, vasbuca, vastárgy. Az első magyar vaskohászok műhelyei és technikája a Kárpát-medencében. = *Bányászattörténeti Közlemények*, XII. (6. évf. 2. sz.). Érc- és Ásványbányászati Múzeum Alapítvány. Rudabánya, 2011. 3-29.
- TÖRÖK 2014.
Török Béla: *Archeometallurgia*. Miskolci Egyetem, 2014.
- TÖRÖK et al. 2013.
Török Béla – Kovács Árpád – Barkóczy Péter – Kristály Ferenc: 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, 23-32.
- TÖRÖK et al. 2015.
Török Béla – Kovács Árpád – Gallina Zsolt: Ironmetallurgy of the Pannonian Avars of the 7-9th century based on excavations and material examinations. = *Der Anschnitt*, Beiheft 26. Bochum, 2015, 229-237.
- TÖRÖK et al. 2018.
Török Béla – Barkóczy Péter – Kovács Árpád – Költő László – Fehér András – Szőke Béla Miklós: Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata. – A comparative archaeometric study of early medieval split blooms from Pannonia. = *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat*, 151/3. Budapest, 2018. p. 1-4.
- TÖRÖK et al. 2018.
Török Béla – Gallina Zsolt – Kovács Árpád – Kristály Ferenc: Early medieval iron bloomery centre at Zamárdi (Hungary). – Complex archaeometrical examinations of the slags. = *Archeologické rozhledy*, LXX-2018-3. 404-420.
- TÖRÖK et al. 2022.
Török Béla – Barkóczy Péter – Langó, Péter – Tóth Boglárka: Archaeometric investigation of the Kunágota-sword. – A Case Study. / A kunágotai kard archeometriai vizsgálata. – Esettanulmány. = *Archeometriai Műhely*, 2022. XIX/3 279–288.

TÖRÖK et al. 2024.

Török Béla – Barkóczy Péter – V. SZABÓ Gábor: Huge amounts of iron raw material from the Early Iron Age settlement of Dédestapolcsány – Verebce (N-Hungary). – A preliminary archaeometallurgical study. = *Archeometriai Műhely*, 2024, XXI/3. 285–294.

V. SZABÓ et al. 2014.

V. Szabó Gábor – Czajlik Zoltán – Reményi László: Egy vaskori fegyveres konfliktus nyomai. Új topográfiai eredmények a dédestapolcsányi Verebce-tető kutatásában I. = *Magyar Régészet*, 2014 tavasz, 1-6.

V. SZABÓ et al. 2022.

V. Szabó Gábor – Barcsi Marcell – Bíró Péter – Tankó Károly – Váczi Gábor – Mogyorós Péter: Investigations of an Early Iron Siege. Preliminary Report on the Archaeological Research Carried out at Dédestapolcsány – Verebce-bérc between 2020-2022. = *Dissertationes Archaeologicae*, 2022, 3/10. 277-299. <http://doi.org/10.17204/dissarch.2022.277>.

V. SZABÓ et al. 2023.

V. Szabó Gábor – Mogyorós Péter – Bíró Péter – Kovács András – Tankó Károly – Tóth Farkas Márton – Urbán Dániel – Barcsi Marcell: Investigations of an Early Iron Age Siege 2: Preliminary report on the archaeological research carried out at Dédestapolcsány – Verebce-bérc and Dédestapolcsány – Várerdő between September 2022 and the end of 2023. = *Dissertationes Archaeologicae*, 2023, 3/11. 603–623. <https://doi.org/10.17204/dissarch.2023.603>.

