

- (2013), 12, 2118–2025.
- [8] Harada, A.; Maruoka, N.; Shibata, H.; Zeze, M.; Asahara, N.; Huang, F.; Kitamura, S.: ISIJ Int., 54 (2014), 11, 2569–2577.
- [9] Shu, Q.; Volkova, O.; Scheller, P. R.: HINO Symposium. Tokyo, Japan, May 23–25, 2010, pp. 106–115.
- [10] Scheller, P. R., Shu, Q.: Proc. 5th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany, Oct. 1–3, Paper ID 1388
- [11] Scheller, P. R., Shu, Q.: steel research int., 85 (2014), 8, 1310–1316.
- [12] Steinmetz, E.; Scheller, P. R.: Stahl und Eisen, 1987, No. 9, pp. 417–425.
- [13] Scheller, P. R.; Volkova, O.; Ryabov, D.: Proc. Jim Evans Honorary Symposium, TMS 2010, Washington, USA, February 14–18, 2010, pp. 165–172.
- [14] Szekely, J.; Lehner, T.; Chang, C. W.: Ironmaking and Steelmaking, 1979, No. 6, pp. 285–293.
- [15] Mietz, J.; Oeters, F.: Steel Research, 1987, No. 10, pp. 446–453.
- [16] Oeters, F.; Pluschkell, W.; Steinmetz, E.; Wilhelmi, H.: steel research, 1988, No. 5, pp. 192–201.
- [17] Mazumdar, D.; Guthrie, R. I. L.: Met. and Mat. Trans.B, 1986, No. 4, pp. 725–733.
- [18] Zhu, M. Y.; Sawada, I.; Yamasak, N.; Hsiao, T. C.: ISIJ Int., 1996, No. 5, pp. 503–511.
- [19] Mazumdar, D.; Evans, J. W.: ISIJ Int., 2004, No. 3, pp. 447–461.
- [20] Levenspiel, O.: Chemical reaction engineering, Wiley, New York, NY, 1972
- [21] Sano, M.; Mori, K.: Trans. ISIJ, 1983 pp. 169–175.
- [22] Pietzka, J.; Steinmetz, E.; Wilhelmi, H.: steel research, 1987, No. 12, pp. 538–545.
- [23] Krishna Murthy, G. G.: ISIJ Int., 1989, No. 1, pp. 49–57.
- [24] Hongbin Yin, Shibata, H.; Emi, T.; Suzuki, M.: ISIJ Int., 1997, No. 10, pp. 946–955.
- [25] Kang, Y. J.; Sahebkar, B.; Scheller, P. R.; Du, S.: Proc. Int. Steel Conf. on New Materials in Metallurgical Process Technologies, METEC, 11–15 June 2007, Dusseldorf, Germany, pp. 265–272.
- [26] Kang, Y. J.; Sahebkar, B.; Morita, K.; Scheller, P. R.; Du, S.: Met. and Mat. Trans. B, 42B, 2011, No. 6, pp. 522–534.

THIELE ÁDÁM

## A foszfor szerepe a vas archeometallurgiájában – a Somogyban folyó avar és honfoglalás kori vaskohászattól kezdve a korabeli damaszkolt pengéig

*Az avar és honfoglalás kori vaskohászok Belső-Somogyban olyan foszfordús gyevasérceket kohósítottak, amelyekből nagy foszfortartalmú, ún. foszforvasat állítottak elő. Ennek a speciális anyagnak a felhasználásával készültek a korabeli damaszkolt pengéjű kések és kardok.*

*Damaszkolt kés- és kardpengék archeometriai vizsgálatai alapján somogyi gyevasércek próbakohósításával különböző kémiai összetételű bucavasakat illetve ezekből damaszkolt próbatesteket állítottunk elő. A próbatesteken elvégzett mechanikai anyagvizsgálatok során megállapítottuk, hogy a foszforvas felhasználásával készült középkori európai damaszkolt pengék esetében a damaszkolás mint eljárás, a szakirodalom ide vonatkozó megállapításaival és a közhiedelemmel ellentétben, nem módosította kedvezően a mechanikai tulajdonságokat, funkciója csupán a díszítés volt.*

*A cikkhez kapcsolódó PhD-dolgozat teljes terjedelmében letölthető az Országos Műszaki Könyvtár weblapjáról: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/1357>*

### 1. A foszfor szerepe Somogy avar és honfoglalás kori vaskohászataiban

#### Bevezetés

Magyarország területén az elmúlt évtizedek iparrégészeti feltárásai során a középkori vaskohászat nyomaira bukkantak. Az egyik nagy vaskohászati centrum Somogyban volt, ahol avar és honfoglalás kori bucakemencék kerültek napvilágra, összesen nyolc régészeti feltárt lelőhelyen. A középkori Somogyban kétféle bucakemence típus volt használatban. Az avarok a szabadon álló avar vagy nemeskéri változatot használták, míg a honfoglaló magyarok a műhelygödör oldalfalába beépített fajszi típusú bucakemencét.

Korábban számos ún. próbakohósítást végeztünk el a fajszi típusú bucakemence másolatával (1. ábra) nyírségi (Fancsika, Bagamér és Léta-vertes környékéről származó) gyevasérceket kohósítva. Ezek a gye-

*Thiele Ádám 2010-ben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) gépészmérnöki diplomát, 2015-ben ugyanitt PhD-címet szerzett. Jelenleg a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén egyetemi adjunktus, kutatási területe a vas archeometallurgiája, a középkori vasiparhoz köthető régészeti leletek archeometriai vizsgálata. Emellett díszműkovácsként dolgozik önálló vállalkozásban.*

vasércek nagy foszfortartalmúak voltak, és kohósításukkor a foszfor a salakfázis és a vafázis közötti megoszlással bekerült a vasbucába. Ha a foszfor kb. 2 t%-nál nagyobb mennyiségben jelent meg a vafázisban, a vasbuca melegtörékeny lett, mert a szemcsehatárokon megjelenő vasvasfoszfid eutektikum a kovácsolás 1100-1300 °C-os hőmérsékletén megolvadt. 2 t% P-tartalom alatt, bár a vasbuca kovácsolható volt, a belőle kikovácsolt vastárgyak ridegek és törékenyek lettek.

#### A kutatás célja, kérdések

A kísérleti tapasztalatok alapján vetődött fel az a kérdés, hogy vajon Somogyban, ahol nagyon intenzív vaskohászat folyt az avar és honfoglalás korban, szembesültek-e a foszfor okozta súlyos technológiai problémákkal, és ha igen, akkor milyen megoldást találhattak rá.

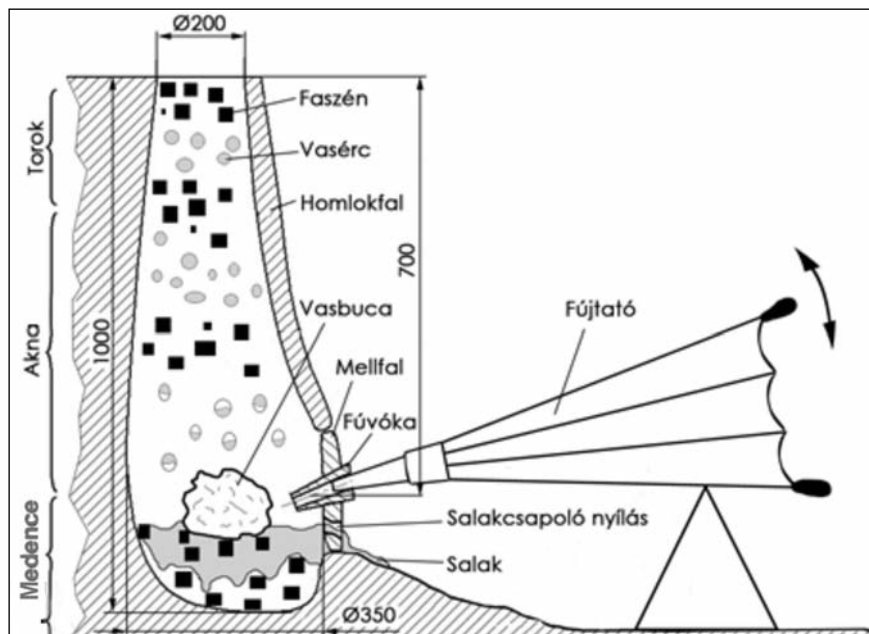
#### A vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek

Terepbejárások során feltérképeztük a somogyi gyevasérctelepeket és megállapítottuk, hogy elsősorban az óholocén ártéri, mocsári-lápi környezetben kialakult, jelenkori patakmedrekben feltároluló ún. biogén gyevasérclelencsékben, illetve egyes, ezek áthalmozásával és dúsításával keletkezett ún. áthalmozott gyevasérclelencsékben található gyevasérc szolgálta a Somogyban folyó avar és honfoglalás kori vaskohászat ércbázisát. A begyűjtött mintákon röntgenfluoreszcens vegyelemzéseket végeztünk.

Összehasonlító anyagvizsgálatokat végeztünk régészeti salakmintákon, illetve három somogyi gyevasércleléről származó ércelvégezett próbakohósításokkal kapott kísérleti salakmintákon. A kísérletek során megvizsgáltuk a CaO beadagolásának hatását a vasbuca foszfortartalmára.

#### Eredmények

A területen folyó vaskohászat ércbázisát adó óholocén biogén gyevasérclelencsék, illetve ezek áthalmozásával és természetes úton való dúsulásával keletkezett áthalmozott gyevasérclelencsék közül kifejtethető ércnek foszforpentoxid tartalma nagy, 3-7 t%. Ennek oka, hogy a mocsári-lápi környezetben, vaskohászat közreműködésével



■ 1. ábra. A próbakohósításokhoz használt fajszí típusú bucakemence geometriai méretei, felépítése és a kísérletek elrendezési vázlatja

vel kialakult nagy fajlagos felületű gyevasércek a terület vegetációjának bomlásából származó, vízben oldott foszfátionokat abszorbeálták. A feltöltődött, illetve kiemelkedő terület talajszódosodásának következtében a somogyi gyevasércekre továbbá jellemző az általában nagy, 3-14 t%-os CaO-tartalom is. A területen változó keménységű és mennyiségű meszes gumók vagy rétegek formájában jelentkező karbonátkiválások is megfigyelhetők.

A somogyi gyevasércek korhű próbakohósításai során 0,9-4,5 t% foszfort tartalmazó, melegtörékenységet mutató és szobahőmérsékleten rideg viselkedésű bucavas volt előállítható. Azonban egy archeometallurgiai szempontból nagy jelentőségű (a Lábod község melletti Petesalmi Vidrapark területén egy avar kori vaskohászati műhely közelében fellelt) gyevasércleléről származó, 7 t% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-tartalmú foszfordús gyevasérccel elvégzett próbakohósítás sorozat során 1/10 majd 2/10 CaO/pörkölt gyevasérc tömegarányban beadagolt égetett mész hatására 4,5 t%-ról 0,9 t%-ra, majd 0,1 t% alá csökkent a kapott vasbuca foszfortartalma.

A somogyi vaskohászati műhelyekből származó avar kori és honfoglalás kori folyósalakok átlagos kémiai összetételére nagy, 2-8 t%-os foszforpentoxid tartalom jellemző, illetve a somogyifajszí vaskohászati műhelyben még feldolgozatlanul fellelt négy

vasbuca is nagy, 0,4-1,22 t%-os foszfortartalmú. Megállapítható volt továbbá, hogy a somogyi vaskohászati műhelyekből származó avar kori és honfoglalás kori folyósalakok CaO-tartalma nagy, 6-25 t%-os, bennük a foszfor tús megjelenésű kalciumfoszfát formájában kötve volt megtalálható.

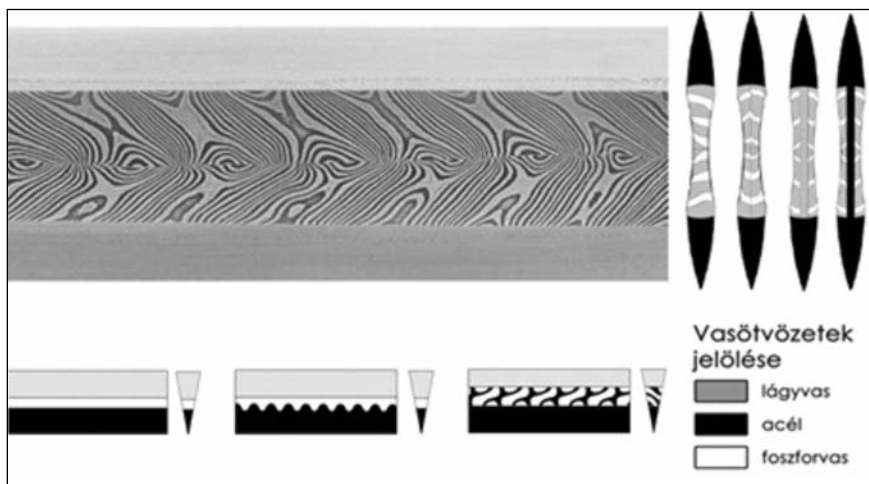
#### Összegzés

A somogyi avar és honfoglalás kori bucavaskohászatban a területen fellelhető foszfordús gyevasércek kohósításával nagy foszfortartalmú bucavak voltak előállíthatók, de a foszfortartalom csökkentésére CaO-tartalmú betétanyagokat (mészkövet, mesze-sebb gyevasérceket vagy fahamut) használhattak.

## 2. A foszforvas szerepe a damasz-kolt pengékben

#### Bevezetés

A damasz-kolt pengék kiváló mechanikai tulajdonságairól máig nagyon sok mítosz, legenda él a köztudatban, amelyeket általában a szakirodalom is megerősít. Az elmúlt évtizedben elvégzett archeometriai vizsgálatok során kiderült, hogy a középkori damasz-kolt pengéknél foszforvasat használtak fel díszítő célra. Kardok esetén a penge középső része (2. ábra), kések esetén pedig a penge foka volt damasz-kolt.



■ 2. ábra. A 6–10. századi damaszkolt kardpengék és a 9–13. századi foszforvassal díszített késpengék leggyakoribb felépítése

### A kutatás célja, kérdések

Az cikk első része alapján felvetődik a kérdés, hogy milyen mechanikai tulajdonságokkal rendelkezett a középkori damaszkolt pengékben felhasznált foszforvas, és hogy a damaszkolás kedvezően módosította-e a pengék mechanikai tulajdonságait, vagy funkciója mindössze a díszítés volt.

### A vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek

A középkori damaszkolt pengékben felhasznált foszforvas mechanikai tulajdonságaira jelentős hatást gyakorló foszfortartalmának meghatározása céljából a mai Csehország és Szlovákia területéről származó damaszkolt kard- és késpengék archeometriai vizsgálatát végeztük el. Megfigyelhető volt, hogy mindegyik pengénél foszforvasat használtak a damaszkoláshoz foszforvas + lágvas vagy foszforvas + acél anyagpárosítással. A pengék egy része normalizált, másik része nemesített hőkezelt állapotú volt. A damaszkolt kard- és késpengékben felhasznált foszforvas foszfortartalmát pásztázó elektronmikroszkóp alatt elektronsugaras mikroanalizátor (SEM-EDS módszer) segítségével mértük.

A foszforvas mechanikai tulajdonságainak meghatározása céljából, és azért, hogy kiderítsük, hogy a damaszkolás valóban kedvezően módosította-e a mechanikai tulajdonságokat, mechanikai anyagvizsgálatokat végeztünk a damaszkolt pengékhez használt bucavas alapanyagokon

(normalizált lágvason, normalizált foszforvason, illetve normalizált és nemesített acélon) és az ezekből damaszkolt próbatesteken. Kémiai összetételük és szövetszerkezetük alapján ezek a próbatestek jól reprezentálták a vizsgált középkori damaszkolt pengéket. Referenciaként a jól ismert S235JRG2 anyagminőségű mai acélt választottuk. Charpy- és szakítóvizsgálatok segítségével meghatároztuk az egyes próbatesttípusok jellemző átlagos szilárdsági és szívóssági mérőszámait és azok szórását.

A kapott eredmények statisztikai módszerekkel történő kiértékelése során elvégeztük a kardpengékhez használható anyagok rangsorba állítását a minőségbiztosításban is használt MCA (Multi Criteria Analysis) és az AHP (Analysis Hierarchy Process) módszer segítségével.

### Eredmények

A középkori, foszforvas felhasználásával készült, európai damaszkolt pengék archeometriai vizsgálata alapján a pengékhez 0,4-1,4 t% foszfort tartalmazó foszforvasat használtak fel. Az ilyen foszforvasat jól reprezentáló, korhűen előállított bucavas a mechanikai anyagvizsgálati eredmények alapján rendkívül rideg és törékeny, a szívósságára és az alakíthatóságára jellemző mérőszámok kicsik, az átlagos ütőmunka  $KV = 2 \text{ J}$ , az átlagos fajlagos törési munka  $W_c = 20 \text{ J/cm}^3$ , az átlagos szakadási nyúlás  $A = 5\%$ , az átlagos kontrakció pedig  $Z = 3\%$ .

A középkorban a damaszkoláshoz felhasznált (különböző hőkezeltégi állapotú) lágvas, foszforvas és acél próbatestek és az ezekből damaszkolt próbatestek összehasonlító mechanikai anyagvizsgálati eredményei alapján megállapítható volt, hogy a damaszkolás során a felhasznált alapanyagok mechanikai tulajdonságait jellemző mérőszámok – függetlenül a damaszkolás során kialakított mintázattól és rétegszámtól – kiátlagolódnak, ezért a rideg és törékeny foszforvas felhasználásával készült damaszkolt anyagok jóval kevésbé szívósak és alakíthatóak, mint a lágvas vagy acél önmagában.

Az összehasonlító mechanikai anyagvizsgálati eredményeinek az MCA- és az AHP-módszerrel történt kiértékelése alapján elmondható, hogy a középkori, foszforvas felhasználásával készült, európai damaszkolt kardpengéknél az igénybevételekkel szemben mutatott ellenállás szempontjából a kardok középső, damaszkolt részéhez a legjobb anyagpárosítás a foszforvas és a nemesített acél volt.

### Összegzés

A középkori, foszforvas felhasználásával készült európai damaszkolt pengék esetében a damaszkolás mint eljárás, a szakirodalom ide vonatkozó megállapításaival és a közhiedelemmel ellentétben, nem módosította kedvezően a mechanikai tulajdonságokat, funkciója csupán a díszítés volt.

### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik lelkesen támogatták és segítettek az elmúlt évek kutatómunkáját, mindenekelőtt *dr. Dévényi László* konzulensemnek és a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársainak.

A szerző témában megjelent publikációi a Magyar Tudományos Művek Tárháza (MTMT) internetes oldalon tekinthetők meg:

[https://vm.mtmt.hu//search/slist.php?nwi=1&initd=1&ty\\_on=1&url\\_on=1&cite\\_type=2&orderby=3D1a&location=mtmt&stn=1&AuthorID=10032619](https://vm.mtmt.hu//search/slist.php?nwi=1&initd=1&ty_on=1&url_on=1&cite_type=2&orderby=3D1a&location=mtmt&stn=1&AuthorID=10032619)