

A díszítő kovácshegesztés (damaszkolás) szerepe a kora középkori kardpengékben

Thiele Ádám (1), JiříHošek (2), PawełKucypera (3), Török Béla (4), Haramza Márk (5), Juhász Marcell (1)

(1) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék

(2) Institute of Archaeology of the ASCR, Prague, v.v.i., Letenská 4, 118 01, Prague 1, CzechRepublic

(3) NicolausCopernicus University, Institute of Archaeology, Bydgoska 44/48, 87-100 Toruń, Poland

(4) Miskolci Egyetem, Metallurgiai és Öntészeti Intézet, Miskolci Egyetem Archeometallurgiai Kutatócsoportja (ARGUM), Miskolc

(5) Károli Gáspár Református Egyetem, Történettudományi Tanszék, Budapest

Absztrakt

A díszítő kovácshegesztés az elmúlt évtizedekben újra reneszánszát éli. A történelmi hitelességtől eltávolodva manapság ezzel az eljárással leginkább késeket és kardokat készítenek. Magára az eljárásra a köztudatban a damaszkolás, az így készült pengékre pedig Magyarországon a damaszkolt, damaszkuszi acél, damaszt vagy damaszk penge kifejezés terjedt el.

A díszítő kovácshegesztés technológiája a kelta időkben kezdődött réteges kompozit készítésből fejlődött ki, amelynek során felváltva egymásra helyezett lágyvas és acél lapokat kovácshegesztéssel hoztak anyagzáró kapcsolatba. A 2-10. század között díszítő kovácshegesztéssel készült kard és késpengéknél azonban már foszforvas+lágyvas vagy foszforvas+acél kombinációjával dolgoztak. Manapság a köztudatban és az archaeometallurgiával foglalkozó szakemberek körében is elterjedt vélekedés az, hogy ezek a díszítő kovácshegesztéssel készült kardpengék tetszetős megjelenésük mellett kiváló mechanikai tulajdonságokkal is rendelkeztek. Jelen tanulmányban bemutatott kutatásunk célkitűzése az volt, hogy választ adjunk a kérdésre: A kora középkori kardpengék esetében alkalmazott díszítő kovácshegesztésnek valóban a mechanikai tulajdonságok javításában vagy csak a szép felületi mintázat létrehozásában volt szerepe?

Gyepvasérc kohósításával lágyvas, acél és foszforvas anyagú vasbucákat állítottunk elő, amelyekből különböző anyagpárosítások mellett díszítő kovácshegesztéssel próbatesteket kovácsoltunk. A díszítő kovácshegesztés mechanikai tulajdonságokat javító szerepét tisztázandó a próbatesteken mechanikai anyagvizsgálatokat (Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot, hárompontos hajlító- és szakítóvizsgálatot) végeztünk. Így meghatározhattuk a kardpengéknek harc közben fellépő igénybevételekkel szemben mutatott ellenállásával összefüggésbe hozható anyagjellemzőit. A díszítő kovácshegesztés díszítő szerepét tisztázandó pedig a próbatestekből vett mintákból készített metallográfiai csiszolatokon maratói kísérleteket végeztünk hat különböző, a középkorban elérhető savval két különböző töménység, hőmérséklet és maratói idő mellett.

A mechanikai anyagvizsgálati eredményeket a minőségbiztosításban használatos MCA-módszerrel (Multi-Criteria Analysis – több szempontú elemzés) értékeltük, a maratói kísérletek során pedig a maratott felületről fényképeket készítettünk, amelyeket képfeldolgozó szoftverrel értékeltünk ki.

A mechanikai anyagvizsgálati eredmények alapján megállapítottuk, hogy a foszforvas, bár szilárdsága a nemesített acéléhoz hasonlóan nagy, szívóssága jóval elmarad azokétól (rideg és törékeny), a rossz mechanikai tulajdonságok pedig a réteges kompozitokban is megjelennek. Továbbá az MCA-módszer alapján azt is megállapítottuk, hogy a tisztán lágyvasból vagy tisztán acélból készült kardpenge jobb választás volt az igénybevételekkel szemben, mint a díszítő kovácshegesztéssel készült anyagpárosítások legjobbjá, a foszforvas+nemesített acél kombinációjá. Mindamellett ez az anyagpárosítási eredményezte a legszebb mintázatot 20%-os, 70°C-os sósavval történő 10 másodperces maratás mellett.

Kulcsszavak: Kora középkor, archaeometallurgia, archaeometria, foszforvas, díszítő kovácshegesztés, mechanikai anyagvizsgálatok

1. Bevezetés

A díszítő kovácshégesztés az elmúlt évtizedekben újra reneszánszát éli. Manapság - a történelmi hitelességtől rendszerint eltávolodva - ezzel az eljárással leginkább késeket és kardokat készítenek, melyek elnevezésére a köztudatban általában damaszkolt, damaszkuszi acél (tévesen), damaszt vagy damaszk penge kifejezést terjedt el. Az eljárás régi magyar megnevezése a dömöckölés (Halmányi-Riedel 1986). Az angolban szintén damasc, vagy damascussteel, a németben pedig damast, damaszenerStahl a gyakran használt köznyelvi kifejezés. Az angol archeometallurgiai szakirodalomban azonban a „pattern-welding” szóösszetétel használatos. Ennek alapján, a technológia megnevezésére a szerzők a díszítő kovácshégesztés elnevezést használják. Ez a szóösszetétel nemcsak az eljárás lényeges technológiai lépésére, hanem a funkciójára is utal.

Célszerű tisztázni a különbséget a damaszkuszi acélként ismert anyag és a díszítő kovácshégesztés (damaszkolás), mint technológia között is. Előző esetében a pengéket egy állandó karbontartalmú, hipereutektoidos ($C > 0,8\text{wt}\%$) anyagból készítették, a felületi mintázatot pedig a maratás után megjelenő, töredezett szekunder cementit háló eredményezte. Az utóbbi esetében viszont, mint jelen tanulmányban is látható lesz, nagyságrendekben különböző foszfortartalmú anyagokkal dolgoztak, a felületi mintázatot itt az eltérően maródó anyagminőségű vasanyagok okozták.

1.1. A díszítő kovácshégesztés történeti háttere

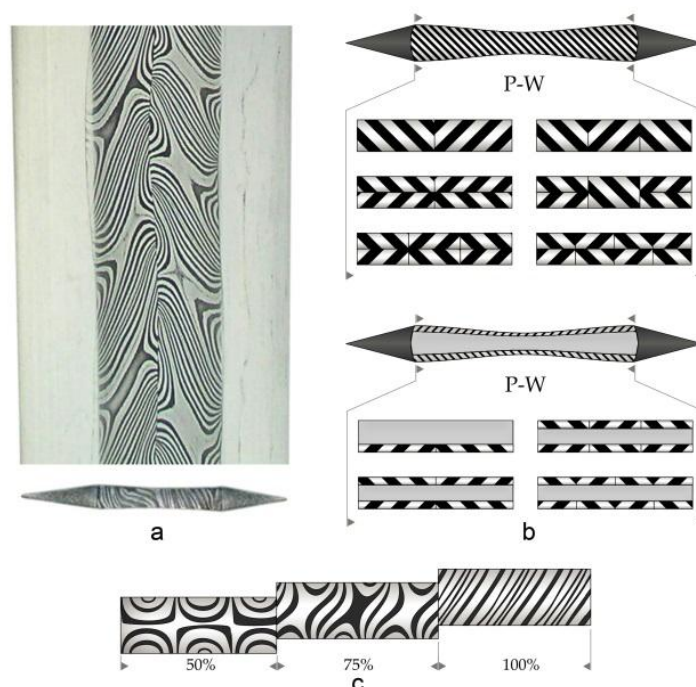
A díszítő kovácshégesztés a kelta időkben kezdődött réteges kompozit készítés („piling” vagy „piledcomposites”) eljárásáig vezethető vissza (Pleiner 1993, Lang & Ager 1989, Jones 1997, Jones 2002, Williams 2012). Lágyvas („wroughtiron”, $C < 0,2\text{wt}\%$) és acél („steel”, $C > 0,2\text{wt}\%$) lapokat felváltva helyeztek egymásra, majd a tömbötkovácshegesztéssel hozták anyagzáró kapcsolatba (ld. Buchwald 2005, Anstee&Biek 1961, Jones 1997, Williams 1997, Edge& Williams 2003, Lang 2011). Szemben a korabeli vaskohászat primer termékével a vasbucával, az így kapott rúdiban már egyenletesebb volt a karbon eloszlása, illetve az átkovácsolás miatt az éles bemetszést okozó salakzárványok is felaprózódtak. Kezdetben tehát a rétegezés célja elsősorban a mechanikai tulajdonságok javítása volt, nem pedig a díszítés.

A díszítő kovácshégesztés technológiája akkor fejlődött ki az egyszerű réteges kompozit készítésből, amikor foszforvasat („phosphoric-iron”, az achaeometallurgiában ezalatt a $P > 0,1\text{wt}\%$ foszfortartalmú vasanyagokat értik (Vega et al 2003)) kezdtek felhasználni a réteges rudak elkészítéséhez. Ezeknek a rudaknak a mintázatát többnyire további megmunkálással (megcsavarhatták őket a hossz tengelyük körül, levághattak vagy forgácsolással anyagot választhattak le róluk a hosszuk mentén, stb.) különlegesebbé, maratással pedig láthatóvá tették (Anteins 1973, Thålin-Bergman 1979, Mäder 2001, Anstee&Biek 1961). Annak ellenére, hogy a legtöbben még ma is úgy gondolják, hogy lágyvas és acél rétegek eredményezik a mintázatot, már az 1980-as években kiderült, hogy a díszítő kovácshégesztésben kizárólag kétféle, foszforvas+lágyvas vagy foszforvas+acél anyagpárosításokat használtak (Tylecote&Gilmour 1986, Buchwald 2005, Hoyland&Gilmour 2006).

Díszítő kovácshégesztéssel első sorban kardpengék magja (amelybe a vércsatorna volt bekovácsolva) készült, mégpedig vagy teljes szelvényében, vagy pedig lágyvas vagy acél magra rákovácsolt díszítő kovácshégesztéssel előállított szalagok rákovácsolásával (Jones 1997, Jones 2002, Williams 2012). A kardok központi magja általában maga is több díszítő kovácshégesztéssel előállított rúd sokféle kombinációban történő kovácshégesztésével készült (Tylecote&Gilmour 1986, Jones 2002, Lang & Ager 1989). A díszítő kovácshégesztéssel készült rudak általában hét rétegből álltak (ld. Jones 1997, Thålin-Bergman 1979). Ehhez a központi maghoz két oldalról a kard élét szintén kovácshégesztéssel hozták anyagzáró kötésbe (Anteins 1973, Jones 2002; Maryon 1960, Böhne&Dannheimer 1961). A díszítő kovácshégesztéssel készült kardpengék jellegzetes kialakítását az 1. ábra mutatja.

Kardpengék esetében a díszítő kovácshégesztést (főként csavart mintázattal) a 2. század végétől a 10-11. század fordulójáig használták (Lang and Ager 1989, Anteins 1973, Hošek et al. 2011, Gilmour 2007, Williams 2012), főként az északi germán népek (norvégek, dánok, angol-szászok, stb.). A

kardnak kivételes szerepe volt a fegyverek között, a harcosnak lehetőleg karddal a kézben kellett meghalnia, ha a Valhallába akart jutni, elvesztése pedig valóságos tragédia volt (Magnusson&Palsson 1969). Ezeknek az igen nagy becsben tartott kardoknak a mintázata is komoly, már-már mitikus szerephez jutott; rendszerint kígyók tekergőzésére, sárkány erőt adó leheletére asszociáltak belőle.



1. ábra: Kardpengék, amelyek több díszítő kovácshesztéssel készült rúd vagy szalag és az élek kovácshesztésével készültek. A központi mag készülhetett teljes szelvényében (felül baloldalon) díszítő kovácshesztéssel vagy egy magra rákovácsolt díszítő kovácshesztéssel készült szalagokból (felül jobboldalon). Csavarással és anyagleválasztással kialakított mintázat (alul). Minden ábra a szerzők saját munkája.

1.2. Célkitűzés

Manapság a köztudatban és az achaeometallurgiával foglalkozó szakemberek körében is elterjedt vélekedés az, hogy ezek a díszítő kovácshesztéssel készült kardpengék tetszetős megjelenésük mellett kiváló mechanikai tulajdonságokkal is rendelkeztek. Korábban már mások is tanulmányozták díszítő kovácshesztéssel készült próbatestek mechanikai tulajdonságait, azonban a próbatestek anyagául nem foszforvasat, sőt még csak nem is bucavasat, hanem modern vasanyagokat használtak fel (Pelsmaeker 2010, Lang 2011, Polák 2008), így eredményeik és az azokból levont következtetések vitathatók. A legfőbb akadály magának a kovácsolható foszforvasnak az előállítás és a díszítő kovácshesztés nagy tapasztalatot igénylő technológiája volt. A díszítő kovácshesztéssel készült kard és késpengék maratással történő felületkikészítéséről szintén nem rendelkezünk releváns ismeretekkel.

Jelen tanulmányban bemutatott kutatásunk célkitűzése az volt, hogy választ adjunk a kérdésre: A kora középkori kardpengék esetében alkalmazott díszítő kovácshesztésnek valóban a mechanikai tulajdonságok javításában vagy csak a szép felületi mintázat létrehozásában volt szerepe?

A kérdés megválaszolásához a vasércről a díszítő kovácshesztéssel készült vastárgyakig (próbatestekig) tartó technológia sort történelmileg hitelesen felelevenítve, két kísérletsorozatot végeztünk el:

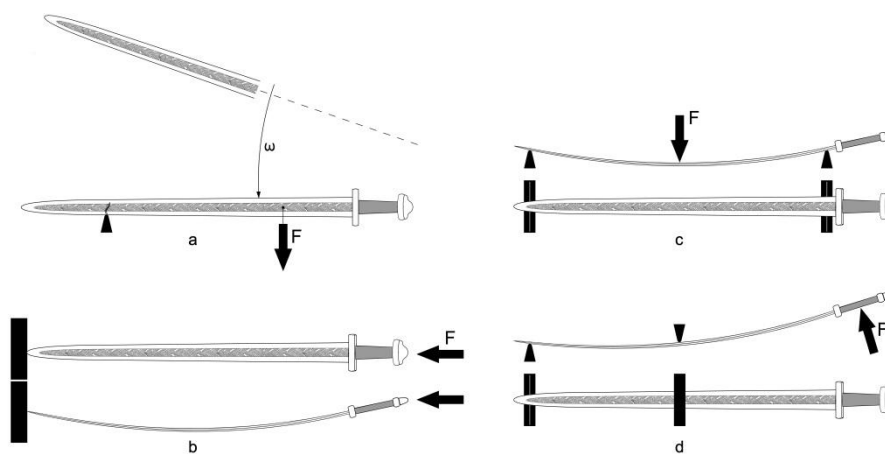
1. Mechanikai anyagvizsgálatok díszítő kovácshesztéssel készült próbatesteken
2. Maratási kísérletek díszítő kovácshesztéssel készült próbatesteken

A két kísérletsorozat mechanikai és régészeti hátterét a következő két alfejezetben mutatjuk be.

1.3. A kardpengék igénybevételei

A kardpengénél harc közben a következő három igénybevétel lépett fel: ütőszerű (dinamikus) hajlító igénybevétel, egyszerű (statikus) hajlító igénybevétel és a döfésre vagy szúrásra is használt kardok

esetében jelentkező nyomó igénybevétel következtében kihajlás történhetett. Ezeket az igénybevételeket foglalja össze a 2. ábra: A fellépő igénybevételekkel szembeni ellenállást a kardpenge geometriai kialakítása (hossza és keresztmetszete) és az anyagjellemzői határozzák meg.



2. ábra: A kardpengék harc közben fellépő igénybevételei. a) ütésszerű hajlító igénybevétel, b) nyomó igénybevétel következtében kihajlás, c), d) hajlító igénybevétel.

Az ütésszerű hajlító igénybevétel a penge törését okozhatta. Az ütésszerű hajlító igénybevétellel szembeni ellenállás az anyagjellemzők tekintetében a dinamikus szívóssággal hozható összefüggésbe, amely az ütmunkával (KV (J), minél nagyobb annál szívósabb) jellemezhető. Az anyagok ütmunkája a Charpy-féleütvehajlító vizsgálattal mérhető. Az ütmunka megmutatja, hogy ütvehajlítás során mekkora energiát nyel el a bemetszett próbatest a törésig. A geometriai kialakítás tekintetében minél nagyobb a keresztmetszetnek a hajlító nyomaték tengelyére számított másodrendű nyomatéka annál nagyobb az ütésszerű hajlító igénybevétellel szembeni ellenállás.

Az egyszerű hajlító igénybevétel a penge maradó alakváltozását okozhatta. A hajlító igénybevétellel szembeni ellenállás az anyagjellemzők tekintetében a szilárdsággal hozható összefüggésbe, amely a határhajlító feszültséggel ($R_{pf}^{0.001}$ (MPa), minél nagyobb annál szilárdabb) jellemezhető. Az anyagok határhajlító feszültsége három pontos hajlítóvizsgálat során határozható meg. Ebben a cikkben a szilárdság jellemzésére a szabványtól eltérően a 0.001 mértékű maradó alakváltozáshoz tartozó határhajlító feszültséget használtuk (ennek a nem szabványos mérőszámnak a definícióját a 10. ábra mutatja). Az egyszerű hajlító igénybevétellel szembeni ellenállással a penge geometriai kialakítása ugyan úgy van hatással, mint ahogyan azt az ütésszerű hajlító igénybevétel esetére tárgyaltuk.

Növekvő hajlító igénybevétel esetén a penge kezdetben maradó alakváltozást szenved, majd amikor az anyag alakváltozási tartaléka elfogy, a penge eltörik. Az ilyen nagy hajlító igénybevétellel szembeni ellenállás a statikus szívóssággal hozható összefüggésbe, amely a fajlagos törési munkával (W_c (J/cm³), minél nagyobb annál szívósabb) jellemezhető. Az anyagok fajlagos törési munkája szakító vizsgálattal határozható meg. A fajlagos törési munka megmutatja, hogy a szakítóvizsgálat során fajlagosan mekkora energiát nyel el a szakító próbatest a törésig.

Az eddig említett fogalmakat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: A mechanikai anyagvizsgálatok mechanikai háttere.

Igénybevétel	Következmény	Anyagjellemző	Mérőszám	Mechanikai anyagvizsgálat
Ütésszerű hajlító igénybevétel	törés	dinamikus szívósság	ütmunka (KV [J])	Charpy-vizsgálat
Kis hajlító igénybevétel	maradó alakváltozás	szilárdság	határhajlító feszültség ($R_{pf}^{0.001}$ [MPa])	három pontos hajlítás
Nagy hajlító igénybevétel	törés	statikus szívósság	fajlagos törési munka (W_c [J/cm ³])	szakítóvizsgálat

Nagy nyomó igénybevétel következtében a karpengé kihajolhat. Ha a penge már kis nyomó igénybevételre kihajlik, akkor nehezen használható dőlésre, szúrásra. A penge kihajlással szemben

mutatott ellenállása csak geometriai jellemzők függvénye (karcsúság), ezért a továbbiakban ezzel az igénybevételi típussal nem foglalkozunk. Szintén nem vizsgáljuk jelen tanulmányban a kardok geometriai kialakítását, hanem csak a kardokhoz használt vasanyagok anyagjellemzőire fókuszálunk.

1.4. A felület kikészítése maratással

Mivel tanulmányunkban a díszítő kovácshegesztésnek a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásán kívül maratással előhozott szép felületi mintázat kialakításában játszott szerepét is tisztázni szeretnénk, így különösen fontos a korabeli marószerek meghatározása. A díszítő kovácshegesztéssel készült pengék felületén a mintázatot az előzőleg fémtisztára csiszolt felület savval történő maratásával tették láthatóvá. Erre a középkorban többféle sav is rendelkezésre állt. Nyilvánvalóan, célirányos szakmai leírások, direkt módon értékelhető források több évszázadokon át tartó szinte teljes hiánya miatt a vizsgált időszakkal kapcsolatosan leginkább azt határozhatjuk meg, hogy egyáltalán milyen savakat használhattak marószerekként.

A kénsav („vitriol” - H_2SO_4) ősidők óta ismert vegyület, sumer és asszír feljegyzések éppúgy említik, mint Dioscorides (Kr.u. 1. sz.) görög orvos, vagy Idősebb Plinius (Kr. u. 23-79), római polihisztor (Karpenko&Norris 2002). A kénsavról koraiszlám forrásokból tudjuk, hogy fémmaratási célra is használták a Közel-Keleten. Ya'qūb ibn Iṣḥāq al-Kindī már a 9. században lejegyezte *Kardok és fajtáik című* művében, hogy a kardpengéket vitriollal, azaz kénsavval vonták be, amely a felületi mintázat maratással történő előhívására szolgált. A 10-11. század fordulóján élő Abū-Rayhān al-Bīrūnī szintén megemlékezett erről az eljárásról *Gyűjteményes könyv az ékkövek ismeretéről* című írásában (Fehér 2000). Európában is korán ismerhették az említett savat, hiszen a festéshez már az ókortól használatos Rubiatinctorem (festőbuzér) gyökeréből a színezékét fermentálással, és kénsavas, vagy lúgos hidrolízissel állították elő (Teophilus 1986). A vitriol egyik legkorábbi középkori európai említése (a fekete festékként használt „atramentum”-mal szembeállítva) egy 8. sz. végi latin nyelvű festőkönyvben az ún. luccai kéziratban (*Compositiones ad tingendam usiva*) (Stillman 1960) található. A *salétromsav* (HNO_3) kora középkori ismertsége párhuzamos lehetett a kénsavéval. Mindkettő tudományos igényű beazonosítását Abū Mūsā Jābir ibn Ḥayyān (kb. Kr. u. 721 – 815. latinosan Geber), a mai Irán területéről származó arab tudós, polihisztor, alkimista nevéhez szokás kötni. Geber műveiben találkozhatunk többek között olyan kémiai technológiák korabeli megfogalmazásával, mint a lepárlás, kristályosítás, pörkölés, elgőzölés. Kísérletező munkássága mutatkozik meg abban is, hogy a kénsav, salétromsav, sósav (HCl), citromsav ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) és borkősav ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) „felfedezése” mellett ő adta meg az aranyat oldó „királyviz” (aquaregia) három rész sósavat és egy rész salétromsavat tartalmazó receptjét (Datta 2005). Az európai írásokban ugyanez a 13. századi Pseudo-Geber néven emlegetett (az elnevezés nem véletlen), ismeretlen alkimista műveiben (*Summa perfectionismagisterii*) jelenik meg, leírva azt is, hogy a királyvizet kénsavban oldott szalmiáksó, ammóniasó (salammoniacum, NH_4Cl) segítségével állították elő (Karpenko&Norris 2002). Egy korai 14. századi feljegyzésben is szerepel „salarmoniacum” formában az ammóniasó. A fennmaradt recept arról tanúskodik, hogy az ammóniasó vizes oldata korrodálhatja a vasat. („Aquacorrosiva: Nota quod aquacorrosivaminuenscorporum pondera fit ex sale armoniaci et coperosainequali portione distillando aquam per alembicum [...] Aquasolvens argentum: Aquasolvens argentum et quidem aliam metallam fit ex vitriol romano et sale armoniaci in equali portione et haec aqua dissolvit ferrum...” Newman 1991, Robert 1970)

Az *ecetsav* (CH_3COOH) az ókorban és a középkorban közismert volt. Az orvoslásban többek között fogfájás ellen, vérzés megállítására és sebek fertőtlenítésére használták, míg a gasztronómiában élelmiszerek ízesítésére, befőzésére és tartósítására. Egyszerű előállíthatóságának köszönhetően olcsó és könnyen elérhető volt az alacsonyabb társadalmi rétegek számára is (Weiss 2004).

A *csersav*ról ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_9 + 2\text{H}_2\text{O}$) Teophilus Presbyter (kb. 1070 – 1125) *De diversibus artibus* című munkájában olvashatunk. Egy tintakészítési receptben lejegyzett növény, a *Ligna Spinarum* egy tüskés fafajtát jelöl, melynek kérgében magas a csersavtartalom (Teophilus 1986).

A „rozsdáátalakítóként” is ismert *foszforsav* (H_3PO_4) (amely a vöröses-barna rozsdát (Fe_2O_3) fekete ferro-foszfáttá (FePO_4) alakítja) szabad állapotban a természetben nem található meg, de sói gyakoriak. Erős oxidálószer, mint pl. a salétromsav a foszfort foszforsavvá alakítja.

Természetesen a fent összefoglalt kémiai jellegű írárok, művek (amelyek, mint látható, a vizsgált időszakot tekintve alapvetően keletiek) meglete nem ekvivalens a korabeli, fémmaratást végző szakemberek használható savakat illető, alapvetően empirikus ismereteivel. Mindazonáltal a gyümölcsök erjedése által közismert lehetett az ecetsav, citromsav, borkősav (szőlősav), a fák gubacsából a csersav, illetve használhattak kénsavat, salétromsavat, sósavat is, annak pontos definiálása nélkül.

2. Módszerek és eredmények

2.1. Az alapanyagok előállítása

A kísérletsorozatokhoz három féle vasanyagot kellett a történelmi hitelességet szem előtt tartva előállítanunk, lágyvasat ($C < 0,2\text{wt}\%$), acélt ($C > 0,2\text{wt}\%$) és foszforvasat ($C < 0,2\text{wt}\%$ és $P > 0,1\text{wt}\%$). Korhű és dokumentált, a 10. századi somogyi vaskohászatot felelevenítő rekonstrukciós kísérletek során lágyvas, acél és foszforvas anyagú vasbucákat állítottunk elő gypevasérc kohósításával. A kohósításokat a Somogyfajszon évente megrendezésre kerülő Őskohász Táborban végeztük el 2012 nyarán (az Őskohász Táborokról részletesen a www.bucavasgyuro.net oldalon lehet tájékozódni). Korábbi publikációinkban részletes leírás található az alapul szolgáló, az elmúlt években lezajlott kísérleti régészeti munkáról (a középkori vaskohászati technológia felelevenítéséről és próbakohósításokról: Thiele & Bán 2010, Thiele 2010, Thiele & Dévényi 2011, Thiele 2011, Thiele 2012, továbbá a vasbucakohászati technológiát bemutató összefoglaló ismeretterjesztő videofilmet készítettünk: <http://www.youtube.com/watch?v=O8kwoVEnHKY>).

2.1.1. Gypevasérc gyűjtés és előkészítés

Lábod településtől kb. 3 km-re ÉK-re található Petesalmi Vidrapark területén avar kori vaskohászati műhelyt tártak fel még a '90-es években (Költő 1999). Az egyik halastó fenekén kb. 100x50m-es kiterjedésű, néhányszor 10cm vastag gypevasérc szemcsékből álló hordalékkúp keletkezett (EOV koordináták: 530.807; 099.280). A tóba befolyó patak hordalékkúpjára a patakmeder oldalfalában több, a folyásirányban feljebb kibukkanó biogéngypevasércclencse áthalmazásából származik (a somogyi gypevasérc genetikájáról bővebben ld. Kerckmár & Thiele 2013). A hordalékkúpból lapátoltuk össze a próbakohósításokhoz szükséges gypevasércet, amikor a halastavat leeresztették. Az összegyűjtött gypevasércet a kohósítás előtt megpörköltük. A régészeti feltárások alapján tudjuk, hogy pörkölést a 6-8. századi kárpát-medencei Őskohászok is végeztek (Gömöri 2002). Az összegyűjtött gypevasércet szabad tűzön, egy ércpörkölő gödörben fél-egy napon át hevítettük. A pörkölés során a vashidroxidok hidratvíz tartalma eltávozik és vasoxidokká, hematittá és magnetittá alakulnak át illetve szerkezetük fellazul, könnyen morzsolhatóvá válnak és jobban átjárják őket a bucakenece redukáló gázai (Thiele 2010).

Mind a kibányászott hidroxidos gypevasércekből, mind pedig a pörkölés után kapott oxidos vasércekből (homogenizálás után) mintát vettünk és a mintákon Röntgen Fluoreszcens (XRF) vegyelemzést és röntgendiffrakciós vizsgálatot (XRD) végeztünk. Az eredményeket az 2. és 3. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Gypevasércminták fázisösszetétele és számított kémiai összetétele XRD vizsgálat alapján

Azonosító	Megjegyzés	Fázisösszetétel (wt%)			Össz.
		Quar	Goet	Hemma	
pet_v-01	Petesalmi gypevasércminta	3.00	90.00	-	93.00
pet_v-01	Petesalmi gypevasércminta pörkölés után	5.00	-	90.00	95.00
		Számított kémiai összetétel (wt%)			Össz.
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	
pet_v-01	Petesalmi gypevasércminta	3.00	80.88	9.12	93.00
pet_v-02	Petesalmi gypevasércminta pörkölés után	5.00	90.00	-	95.00

3. táblázat: Gyepvasércminták kémiai összetétele XRF vizsgálat alapján

Azonosító	Megjegyzés	Főbb oxidok (wt%)							ΣFe
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	P ₂ O ₅	As ₂ O ₃	
pet_v-03	Petesalmi gyepvasércminta	3.82	81.0	0.46	3.44	1.61	6.60	0.12	56.70
pet_v-04	Petesalmi gyepvasércminta pörkölés után	3.85	83.4	0.40	3.30	3.29	4.70	0.13	58.40

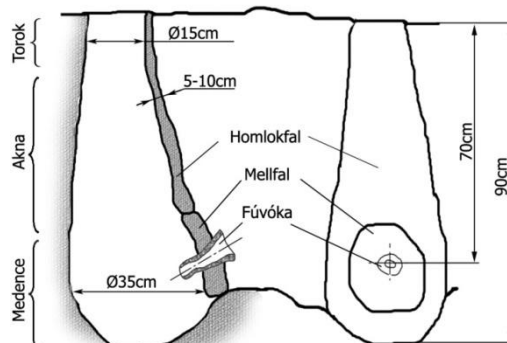
Az eredményekből látható, hogy a gyepvasérc nagy vastartalmú, meddője azonban jelentős mennyiségben tartalmaz foszfort és CaO-ot. A gyepvasérc földtanával foglalkozó legutóbbi kutatásunk során megállapítottuk, hogy ez a kémiai összetétel általánosan jellemző a somogyi gyepvasércekre (Kercsmár & Thiele 2013). A fázisösszetétel (és ezáltal a kémiai összetétel) pörkölés következtében történő változása szintén megfigyelhető: a pörkölés előtt főként goethites érc hematitossá alakul át.

A pörkölés után a gyepvasérc rögöket 2-3cm-nél kisebb darabokra törtük, ahogyan az a régészeti feltárásokon előkerült pörkölt gyepvasércszemcséknél megfigyelhető volt (Gömöri 2002).

2.1.2. Kohósítások

A kohósításokhoz csertölglyből (az őskohászokhoz hasonlóan, ld. Gömöri 2002) égettünk faszenet 2m³ felhasogatott fából rakott faszénégető boksában.

A kohósításokat az ún. fajszi-típusú bucakemence másolatában végeztük el. Ilyen bucakemencék kerültek napvilágra a somogyi honfoglalás-kori műhelyödrök feltárása során (Gömöri 2002). A bucakemencét a Belső-somogyban a talajszint alatt 1-3m mélységben szinte mindenütt megtalálható löszös, meszes agyagból építettük, amelyet az Őskohász Tábor táborhelyéhez közeli Korokna-patak medréből termeltünk ki. A megépített bucakemence belsejében lassú tüzet rakva kb. egy nap alatt kiszáritottuk. A rekonstruált bucakemence felépítését és geometriai kialakítását a 3. ábra mutatja.



3. ábra: A rekonstruált bucakemence felépítése és geometriai kialakítása

Ugyanabban a kísérleti bucakemencében összesen három kohósítást és egy újrakohósítást végeztünk el (egy-egy kohósítás után mindössze a vasbucá kihúzásához kitört mellfalazatot kell újra építeni). A levegőt ábrázások alapján (Buchwald 2005) rekonstruált kézi fújtatóval végeztük, a levegő térfogatárama minden kohósításnál és az újrakohósításnál is kb. 100l/perc volt. A kohósítások során minden esetben 20kg pörkölt gyepvasércet adagoltunk a bucakemencébe, 1:1 faszén:pörkölt gyepvasérc tömegarány mellett. Egy gyepvasércadag és egy faszénadag tömege 250g volt. Egy-egy kohósítás estében az első ércadag és a kohóbontás között eltelt idő 6-8 óra volt.

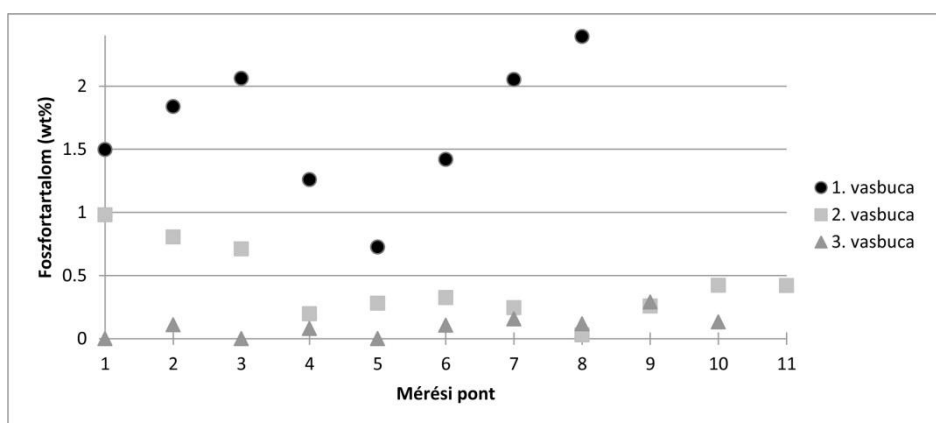
Az első kohósítással nagy foszfortartalmú (kb. 2wt%) foszforvasat kaptunk. A vasbucát félbevágva hordozható XRF műszerrel (portable-XRF, p-XRF) 8 pontban megmértük a foszfortartalmat. A másik fél kovácsolás közben darabokra tört, a nagy mennyiségben jelenlévő, 1050°C-on olvadó vasvasfoszfid (Fe-Fe₃P) eutektikum miatt (P≈2wt%).

Az második kohósítás során 10g égetett meszet (CaO) adagoltunk a bucakemencébe minden gyepvasércadaghoz (az égetett mésznek a vasbucá foszfortartalmára gyakorolt hatására vonatkozóan ld. Thiele et al 2013 és Török & Thiele 2013). A kohósítás eredményeképpen kapott második vasbucát

rúddá kovácsoltuk. A vasrúd egyik oldalát fémtisztára csiszoltuk és p-XRF műszerrel 11 pontban megmértük a foszfortartalmat. A foszfortartalom a CaO hatására jelentősen csökkent ($P \approx 0,5\text{wt}\%$). A kapott vasrudat foszforvas alapanyagként használtuk fel a maratási kísérletek próbatestjeinek kikovácsolásához.

Az harmadik kohósítás során 25g CaO-ot adagoltunk a bucakemencébe minden gyevasércadaghoz. A kohósítás eredményeképpen kapott harmadik vasbucát rúddá kovácsoltuk. A vasrúd egyik oldalát fémtisztára csiszoltuk és p-XRF műszerrel 10 pontban megmértük a foszfortartalmat. A foszfortartalom a nagyobb mennyiségben beadott CaO hatására tovább csökkent ($P \approx 0,05\text{wt}\%$). A kapott vasrudat lágyvas alapanyagként használtuk fel a maratási kísérletek próbatestjeinek kikovácsolásához.

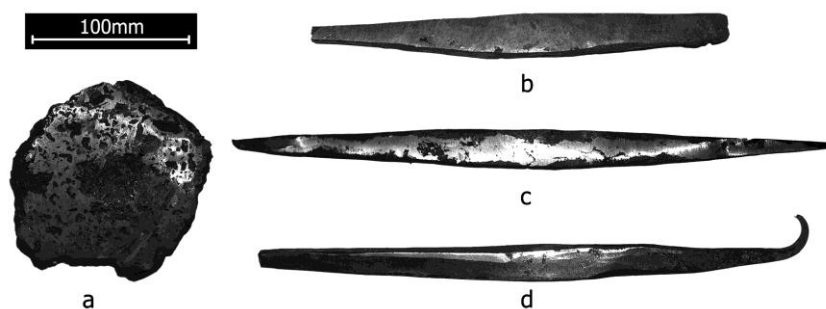
A p-XRF mérési eredményeket a 4. ábra foglalja össze.



4. ábra: A próbakohósítások során kapott vasbucák foszfortartalma

Az újrakohósítás során a feldaraboltuk a lágyvas rúd egy részét és a vasdarabokat faszénrel 1:2 tömegarányban a bucakemencébe adagoltuk, így a lágyvasat acéllá cementáltuk. A kapott vasbucát többször áthajtogatva (a karbon tartalom homogenizálása céljából) rúddá kovácsoltuk, amelyet acél alapanyagként használtuk fel a maratási kísérletek próbatestjeinek kikovácsolásához. A karbon tartalmat szikrapróbával ellenőriztük.

A próbakohósítások során kapott vasbucákat és vasrudakat az 5. ábra mutatja.

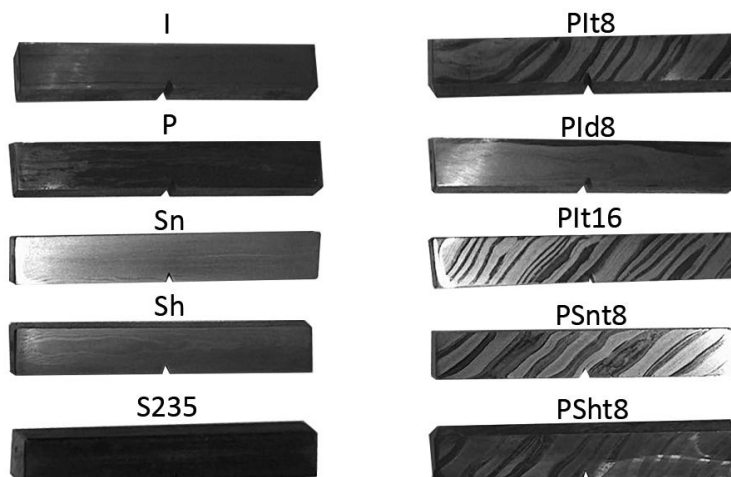


5. ábra: A próbakohósítások során kapott vasbucák és vasrudak. a) az 1. kohósítással kapott nagy foszfortartalmú vasbuca, b) a 2. kohósítással kapott foszforvasrúd, c) a 3. kohósítással kapott lágyvasrúd, d) a lágyvas újrakohósításával kapott acélrúd.

2.2. A próbatestek kikovácsolása

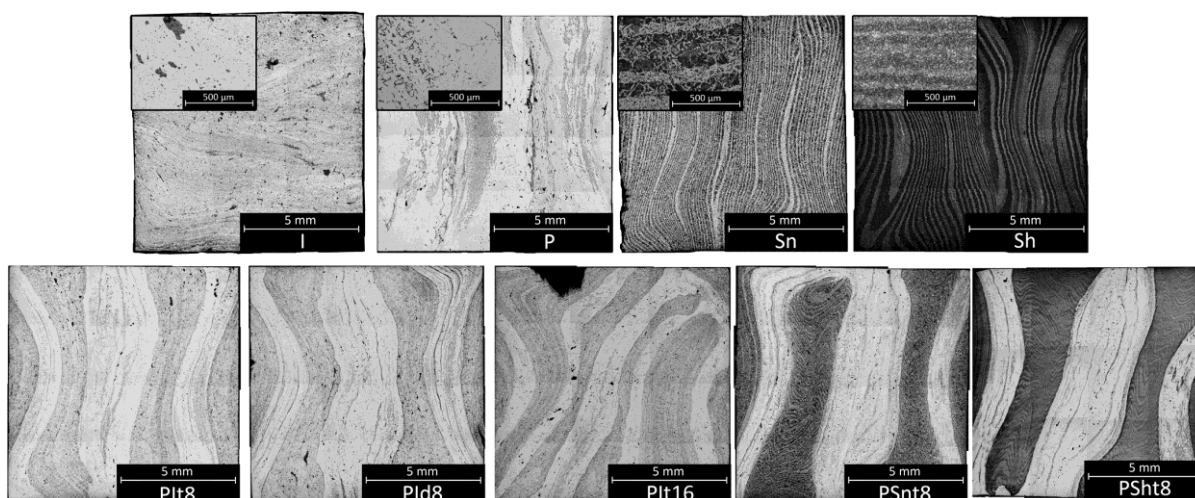
Az ellenőrzött kémiai összetételű három alapanyagból négy különböző anyagú 10x10x60mm befoglaló méretű, lágyvas (I), foszforvas (P), normalizált acél (Sn) és nemesített acél (Sh) próbatestet kovácsoltunk. Referencia anyagként modern S235 szerkezeti acélt választottunk. A buca vas alapanyagokból díszítő kovácshegesztéssel 8 és 16 rétegű, csavart mintázatú és nem csavart mintázatú (párhuzamos rétegek), a középkori kard és késpengéknél előforduló, foszforvas és normalizált lágyvas (Plt8 és Plt16), foszforvas és normalizált acél (PSnt8), foszforvas és nemesített acél (PSht8) anyagpárosításokkal készítettünk próbatesteket. Minden próbatest típusból

3-5 darabot állítottunk elő. A próbatestekből kiforgácsolt, egyik oldalukon polírozott és 2%-os nitállal maratott Charpy-próbatesttípusok közül egy-egy reprezentáns darab a6. ábrán látható. Hőkezelést a nemesített acél és a foszforvas és nemesített acél anyagpárosítással előállított próbatestnél végeztünk. Ezeket 900°C-ról vízben edzettük, majd 300°C-os megeresztési hőmérsékleten 1 órán át hűtöttük. A normalizálás kovácsolási hőmérsékletéről levegőn való lehűtéssel történt.



6. ábra: Bucavasból kovácsolt Charpypróbatestek (reprezentáns darab egy-egy próbatest típusból). A felület polírozva és 2%-os nitállal maratva.

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok után a kettétört próbatestek töretfelületének közeléből kimunkált teljes keresztmetszeti (10x10mm-es felületű) mintákból metallográfiai csiszolatokat készítettünk. Az alapanyagok és a próbatestek szövetszerkezetének és pontosabb karbon tartalmának meghatározása céljából a mintákon metallográfiai vizsgálatot végeztünk. A marószert 2%-os nitál volt. A karbon tartalmat a szövetszerkezet alapján képelemző programmal (Photoshop CS3) számítottuk ki. A foszforvas pontos foszfortartalmát energiadiszperzív röntgenspektrométerrel felszerelt pásztázó elektronmikroszkópos (SEM-EDS) vizsgálat segítségével határoztuk meg. A vizsgálatok eredményeit a 4. táblázat foglalja össze. A metallográfiai csiszolatokról készült makro-képeket (20db 50-szeres nagyítású kép összeillesztésével készült képek) mutatja a 7. ábra:



7. ábra: Az alapanyagokból és a díszítő kováchegesztéssel készült próbatestek metallográfiai csiszolata

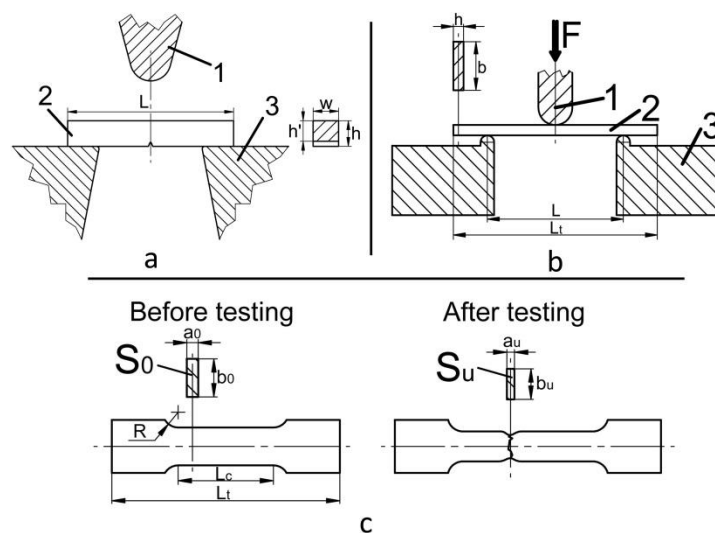
4. táblázat: Az előállított alapanyagok és a belőlük készült próbatestek szövetszerkezete és kémiai összetétele

Alapanyagokból készült próbatestek	Darab-szám	Jelölés	Szövetszerkezet	Kémiai összetétel		Díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek	Jelölés	Darab-szám
				C (wt%)	P (wt%)			
Lágyvas	5	I	Ferrites, kevés perlittel	0.05	0	Foszforsavas+lágyvas, 8 rétegű, csavart	Plt8	4
Foszforsavas	3	P	Ferrites, vékony ferrit-perlites sávokkal	max. 0.2	0.6–1.1	Foszforsavas+lágyvas, 8 rétegű, nem csavart	Pld8	4
Normalizált acél	4	Sn	Widmanstatten (perlit és proeutektoidos ferrit)	kb. 0.6	0	Foszforsavas+lágyvas, 16 rétegű, csavart	Plt16	4
Nemesített acél	3	Sh	Megeresztett martenzit apró karbidkiválásokkal	kb. 0.6	0	Foszforsavas+normalizált acél, 8 rétegű, csavart	PSnt8	4
Modern acél	5	S235	Szabvány szerinti	Szabvány szerinti		Foszforsavas+nemesített acél, 8 rétegű, csavart	PSht8	4

2.3. Mechanikai anyagvizsgálatok díszítő kovácshegesztéssel készült próbatesteken

A mechanikai anyagvizsgálatok segítségével arra kérdésre keressük a választ, hogy javította-e a díszítő kovácshegesztés a középkori kardpengék mechanikai tulajdonságait?

Első lépésben a Charpy próbatesteken Charpy-féleütvehajító vizsgálatot végeztünk az ISO 148-2:2008(E) szabványnak megfelelően (a szabványtól csak a próbatestek hosszmérete tért el, amely 55mm helyett 60mm volt). A mérési összeállítás vázlatát és a próbatestek méreteit a 8. ábra mutatja. A mérési eredményeket a 12. ábra, számszerűen pedig az 5. táblázat foglalja össze.

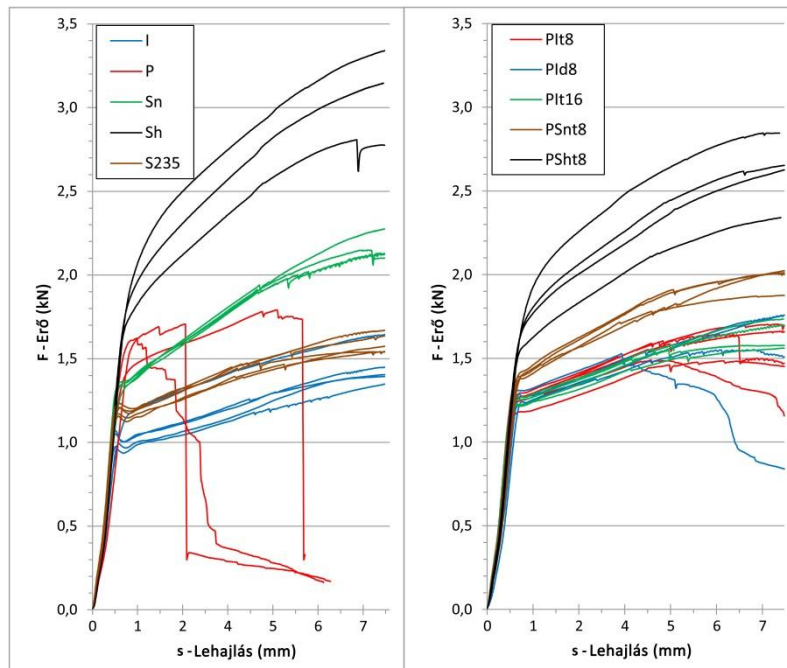


8. ábra: A mechanikai anyagvizsgálatok mérési összeállításának vázlata és a próbatestek méretei.

- a) Charpy-féleütvehajító vizsgálat; 1 – kalapács, 2 – próbatest, 3 – üllő, L – hossz $L=65\text{mm}$, h – magasság $h=10\text{mm}$, w – szélesség $w=10\text{mm}$, h' – bemetszés feletti magasság $h'=8\text{mm}$.
- b) Három pontos hajlító vizsgálat; 1 – keresztfej, 2 – próbatest, 3 – alátámasztás, L – alátámasztási távolság $L=40\text{mm}$, L_t – próbatest teljes hossza $L_t=60\text{mm}$, b – próbatest szélessége $b=14\text{mm}$, h – próbatest vastagsága $h=3\text{mm}$, a keresztfej sebessége 20mm/perc volt.
- c) Szakítóvizsgálat; L_t – próbatest teljes hossza $L_t=60\text{mm}$, L_c – a párhuzamos szakasz hossza $L_c=28\text{mm}$, R – lekerekítési sugár $R=4\text{mm}$, a_0 – próbatest kezdeti vastagsága $a_0=3\text{mm}$, b_0 – a próbatest kezdeti szélessége $b_0=10\text{mm}$, S_0 – a párhuzamos szakasz kezdeti területe, a_u – próbatest szakadás utáni vastagsága, b_u – a próbatest szakadás utáni szélessége, S_u – a párhuzamos szakasz szakadás utáni területe, a keresztfej sebessége 20mm/perc volt.

A kettétört ütőmunka próbatestek mindkét felét (a metallográfiai csiszolatnak szánt keresztmetszeti minták kimunkálása után) 3mm vastagságú lapos próbatesté hengereltük le. A hengerlést megleghengerművel végeztük négy szúrással. A munkadarabokat az egyes szúráásokat megelőzően öntöttvas forgácsba ágyazva, szilitrudas hőkezelő kemencében hevítettük fel 1250°C -ra.

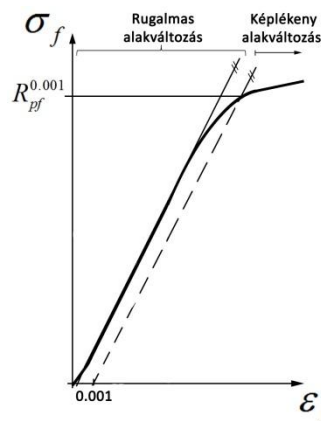
Az ütőmunka próbatestek egyik feléből lehengerelt lapos próbatestekből az oldalélek párhuzamosra marásával három pontos hajlító próbatesteket készítettünk. A három pontos hajlító vizsgálatokat az ISO 7838:2005(E) szabvány szerint végeztük el (a szabványtól csak a próbatestek geometriai kialakítása tért el). A mérési összeállítás vázlatát és a próbatestek méreteit a 8. ábra, a mérés során regisztrált erő – lehajlás görbéket a 9. ábra mutatja.



9. ábra: A hárompontos hajlító vizsgálat során regisztrált erő-lehajlás görbék.

Az erő – lehajlás görbékből származtattuk a hajlítófeszültség– alakváltozás görbéket a szabványban meglévő $\sigma_f = 3FL/2bh^2$ és $\epsilon_f = 6sh/L^2$ összefüggések felhasználásával, ahol σ_f a hajlítófeszültség (MPa), ϵ_f az alakváltozás (-), F a nyomóerő (N), L az alátámasztási távolság (mm), b a próbatest szélessége (mm) és h a próbatest vastagsága (mm).

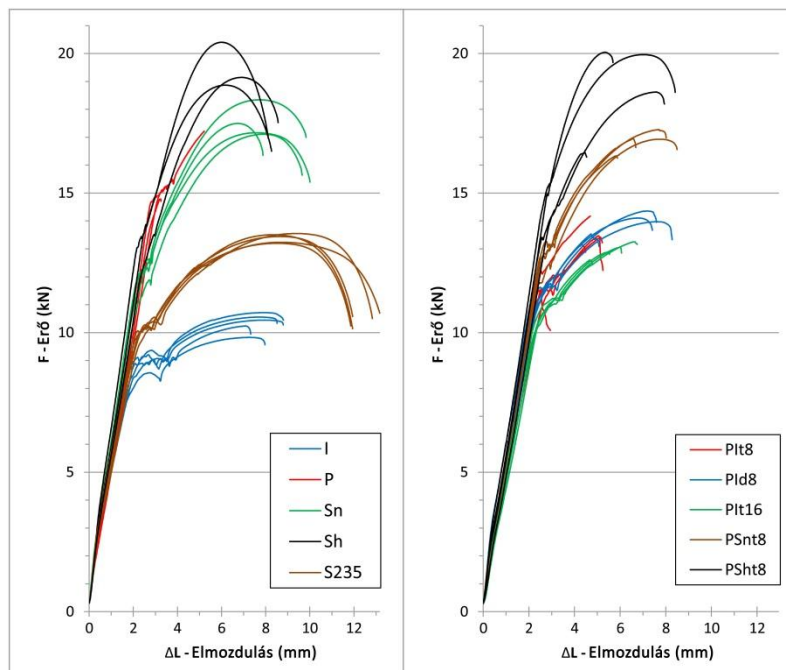
A határhajlító feszültséget a 0.001 mértékű maradó alakváltozáshoz tartozó feszültség értékében definiáltuk (ld. 10. ábra). Ennek alapján a határhajlító feszültséget a hajlítófeszültség – alakváltozás görbékből határoztuk meg.



10. ábra: A határhajlító feszültség definiálása.

Az így meghatározott határhajlító feszültség értékeket a 12. ábra, számszerűen pedig az 5. táblázat foglalja össze. A hárompontos hajlító vizsgálatok során mindegyik foszforvas próbatest (P) eltört illetve néhány Sh-, Pld8- és Plt8-jelű próbatest is megrepedt az alsó, húzott oldalán. A hajlító rugalmassági modulus, amely grafikusán az erő-elmozdulás görbék kezdeti, lineáris szakaszának tangense, minden próbatestre közel azonos volt (vö. 9. ábra).

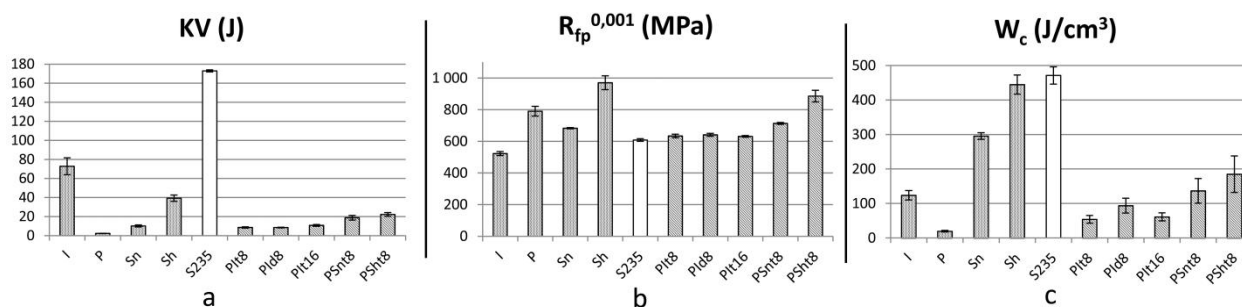
Az ütőmunka próbatestek másik feléből szakító-próbatesteket munkáltunk ki. A szakítóvizsgálatokat az ISO 6892-1:2009(E) szabványnak megfelelően (a szabványtól csak a próbatestek geometriájában volt eltérés). A mérési összeállítás vázlatát és a próbatestek méreteit a 8. ábra, a mérés során regisztrált erő – elmozdulás (a keresztfej elmozdulását mértük) görbéket a 11. ábra mutatja.



11. ábra: A szakítóvizsgálat során regisztrált erő-elmozdulás görbék.

A fajlagos törési munkát az erő – elmozdulás görbékből számítottuk ki, a következő ismert összefüggés felhasználásával: $W_c = \varphi_u(R_m + \sigma_u)/2$, ahol W_c a fajlagos törési munka (J/cm^3), φ_u a töréshez tartozó logaritmus alakváltozás (-) ($\varphi_u = \ln(S_0/S_u)$, ahol S_0 a párhuzamos szakasz kezdeti keresztmetszete, S_u pedig a párhuzamos szakasz töréshez tartozó keresztmetszete), R_m a szakítószilárdság (MPa) ($R_m = F_m/S_0$, ahol F_m a legnagyobb erő) és σ_u a töréshez tartozó valódi feszültség (MPa) ($\sigma_u = F_m/S_u$, ahol F_u a töréshez tartozó erő).

A mérési eredményekből számított fajlagos törési munka értékeit a 12. ábra, számszerűen pedig az 5. táblázat foglalja össze.



12. ábra: Az ütőmunka, határhajlító feszültség és a fajlagos törési munka átlagos értékei az egyes próbatípusokra a szórások feltüntetésével.

2.4. Maratási kísérletek a díszítő kovácshegesztéssel készült próbatesteken

A maratási kísérletek célja az volt, hogy választ keressünk a kérdésre: Vajon milyen anyagpárosítással és milyen maratási technológiával volt elérhető a legmarkánsabb, legkontrasztosabb mintázat a díszítő kovácshegesztés utáni felületkikészítésnél?

Három féle, díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestenvégeztünk el maratási kísérleteket: foszforvas + lágyvas (Plt8), foszforvas + normalizált acél (PSnt8) illetve foszforvas és nemesített acél (PSht8). A korábban kimunkált keresztmetszeti mintákból készült metallográfiai csiszolatok (ld. 7. ábra) felületét P320-as csiszolópapírral felérsítettük, így rekonstruálva a korabeli köszörüléssel és csiszolással elérhető felületi érdességet. A kísérleteket 2% és 10%-os csapvízzel hígított, 20°C-os és 70°C-os citromsavval, ecetsavval, foszforsavval, kénsavval, salétromsavval és sósavval végeztük el, a

mintákat 10 illetve 60 másodpercig maratva. A három mintát ugyanabba a kétkomponensű műgyanta korongba ágyaztuk be, így biztosítva az azonos maratási paramétereket.

Minden maratás után makro fotót készítettünk a kapott felületi mintázatról. A fénykép elkészülte után a következő maratás előtt a felületet P320-as papírral fémtisztára csiszoltuk. A fényképezés során Nikon D700-as, tükörreflexes, digitális fényképezőgépet használtunk ügyelve arra, hogy a fényképek azonos körülmények (azonos fényviszonyok, azonos fényképezőgép-beállítások, azonos tárgytávolság, stb.) között készüljenek. A képeket táblázatba rendezve foglalja össze a 13. ábra:

	Citromsav			Ecetsav			Foszforsav			Kénsav			Salétromsav			Sósav		
	PSht8	PSnt8	Plt8	PSht8	PSnt8	Plt8	PSht8	PSnt8	Plt8	PSht8	PSnt8	Plt8	PSht8	PSnt8	Plt8	PSht8	PSnt8	Plt8
2% 10mp 20°																		
2% 60mp 20°																		
20% 10mp 20°																		
20% 60mp 20°																		
2% 10mp 70°																		
2% 60mp 70°																		
20% 10mp 70°																		
20% 60mp 70°																		

13. ábra: A maratási kísérletek során a mintákról készült makro fotók (bekeretezve a legmarkánsabb, legkontrasztosabb minták)

3. Eredmények értékelése és következtetések

3.1. A mechanikai anyagvizsgálati eredmények értékelése és következtetések

3.1.1. Az eredmények közvetlen értékelése

A Charpy-féle ütve hajlító vizsgálati eredmények (12.a. ábra) alapján az alapanyagokra vonatkozóan látható, hogy a legnagyobb ütőmunkája (170J) a modern S235 anyagminőségű acél próbatesteknek volt, míg a hasonló mikroszerkezetű és kémiai összetételű, de bucavásból készült jelű lágyvas próbatestek ütőmunka értéke csak 70J volt. A P jelű foszforvas próbatestek ütőmunkája nagyon kis értékű volt (2J), a foszforvas dinamikus szívóssága tehát praktikusán nullának tekinthető. Az Sh jelű nemesített acél próbatestek ütőmunkája nagyobb volt mint az Sn jelű normalizált acél próbatesteké (40J ill. 10J). A díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetén látható, hogy az ütőmunka értékek az alapanyagok ütőmunkáinak hozzávetőleges átlagai. Az is megállapítható, hogy az ütőmunka nem függ a mintázattól, mind a Plt8, Pld8 és a Plt16 jelű próbatestek esetében 10J körüli volt. Viszont megfigyelhető volt, hogy minél nagyobb volt a rétegek és a próbatest bemetszésének hossz tengelye által bezárt szögben jelentkező eltérés, annál kisebb volt az ütőmunka. A legnagyobb ütőmunka értékeket a PSnt8 illetve a PSht8 jelű próbatestek mutatták (20J ill. 22J).

A hárompontos hajlító vizsgálati eredmények (12.b. ábra) alapján az alapanyagokra vonatkozóan látható, hogy a P jelű foszforvas próbatestek határhajlító feszültsége, így a szilárdsága igen nagy, megközelíti az Sh jelű nemesített acél próbatestekét (800MPa ill. 950MPa). A legkisebb határhajlító feszültség értékeket az I jelű lágyvas próbatestek mutatták (500MPa), amelynél ismét nagyobb értékeket kaptunk a modern S235 anyagminőségű acél próbatestek esetében (600MPa). Az Sn jelű normalizált acél próbatestek határhajlító feszültsége közepes, 700MPa volt. A díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetén látható, hogy a határhajlító feszültségek az alapanyagok határhajlító feszültségeinek hozzávetőleges átlagai. Itt is megállapítható, hogy az ütőmunka nem függ a mintázattól, mind a Plt8, Pld8 és a Plt16 jelű próbatestek esetében 600MPa körüli volt. Ehhez képest valamivel nagyobb (700MPa) értékeket kaptunk a PSnt8 jelű próbatesteknél,

de a legnagyobb, a díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetében kiugróan magasnak tekinthető határhajlító feszültség értékeket (900MPa) a PSht8 jelű próbatestek mutatták.

A szakítóvizsgálati eredmények (12.c. ábra) alapján az alapanyagokra vonatkozóan látható, hogy a legnagyobb fajlagos törési munkája ($470\text{J}/\text{cm}^3$) a modern S235 anyagminőségű acél próbatesteknek volt, amelytől alig marad el az Sh jelű nemesített acél próbatestek fajlagos törési munkája ($450\text{J}/\text{cm}^3$). A modern S235 anyagminőségű acél próbatestekhez képest a hasonló mikroszerkezetű és kémiai összetételű, de bucavasból készült jelű lágyvas próbatestek fajlagos törési munkája csak 100J volt. A P jelű foszforvas próbatestek fajlagos törési munkája nagyon kis értékű volt ($20\text{J}/\text{cm}^3$), tehát a foszforvas statikus szívóssága is közel nullának tekinthető. Az Sn jelű normalizált acél próbatestek fajlagos törési munkája közepes értékű ($300\text{J}/\text{cm}^3$) volt. A díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetén látható, hogy a fajlagos törési munkák az alapanyagok fajlagos törési munkájának hozzávetőleges átlagai. Itt is megállapítható, hogy a fajlagos törési munka nem függ a mintázattól, mind a Plt8, Pld8 és a Plt16 jelű próbatestek esetében $50\text{--}100\text{J}/\text{cm}^3$ közötti volt. Ehhez képest valamivel nagyobb ($150\text{J}/\text{cm}^3$) értékeket kaptunk a PSnt8 jelű próbatesteknél, de a legnagyobb, fajlagos törési munka értékeket (közel $200\text{J}/\text{cm}^3$) ismét a PSht8 jelű próbatestek mutatták.

A mechanikai anyagvizsgálatok során kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a foszforvas, bár szilárdsága a nemesített acélokéhoz hasonlóan nagy, dinamikus és statikus szívóssága jóval elmarad azokétól (rideg és törékeny), a rossz mechanikai tulajdonságok pedig a díszítő kovácshegesztéssel készült anyagokban is megjelennek. Mindezek alapján levonható az a következtetés, hogy a klasszikus díszítő kovácshegesztés, amelyben foszforvasat használtak fel, általában nem javította a mechanikai tulajdonságokat, sőt egyes mechanikai tulajdonságok jelentős romlását okozta (pl. dinamikus és statikus szívósság). Ugyanezt a megállapítást sejtésként, bizonyítás nélkül Tylecote és Gilmour már megfogalmazták (Tylecote&Gilmour 1986, 251). A mechanikai anyagvizsgálati eredmények alapján az is megállapítható, hogy a hasonló kémiai összetételű és mikroszerkezetű, de salakzárványokat tartalmazó bucavas mechanikai tulajdonságai jóval elmaradnak a mai modern acéloktól, például jóval kisebb a dinamikus és statikus szívósságuk a zárványok bemetsző, feszültséggyűjtő hatása miatt (vö. Tylecote&Gilmour 1986, 253-254). A díszítő kovácshegesztés mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával korábban foglalkozó, modern acélokkal dolgozó korábbi kutatások (ld. Pelsmaeker 2010, Lang 2011, Polák 2008) eredményei és az azokból levont következtetések éppen ezért kérdőjelezhetők meg.

3.1.2. Az eredmények értékelése MCA módszerrel

A mechanikai anyagvizsgálati eredmények önmagukban is sokatmondóak, de ahhoz, hogy a kardpengékhez választható anyagokat mechanikai tulajdonságaik és felhasználási tulajdonságaik alapján ragsorba állíthassuk az eredmények további kiértékelése szükséges. Erre a minőségbiztosításban használatos többszempontú elemzés (Multi Criteria Analysis - MCA) módszert alkalmaztuk. A módszer szerint első lépésben a rangsorba állítás szempontjait (kritériumokat) határozzuk meg, amelyek az 1.3. fejezetben bemutatott anyagjellemzőkkel vannak összefüggésben:

DIT – Dinamikus igénybevétel okozta töréssel szemben mutatott ellenállás (ez a dinamikus szívóssággal, azaz ütőmunkával KV (J) függ össze)

HIG – Kis hajlító igénybevétel okozta maradót alakváltozással (elgörbüléssel) szemben mutatott ellenállás (ez a szilárdsággal, azaz a határhajlító szilárdsággal $R_{pf}^{0.001}$ (MPa) függ össze)

HIT – Nagy hajlító igénybevétel okozta töréssel szemben mutatott ellenállás (ez a statikus szívóssággal, azaz a fajlagos törési munkával W_c (J/cm³) függ össze)

Az MCA módszer két fő lépésből áll, az egyes kritériumokhozértékeket rendelünk hozzá, majd az egyes kritériumokhoz súlyszámokat rendelünk, így jellemezve azok fontosságát. A kritériumok értékeit a különböző próbatest típusokra vonatkozóan a kritériummátrix mutatja meg, amely a mechanikai anyagvizsgálati eredményekből egyszerűen származtatható (ld. 5. táblázat). A kiértékelésből értelemszerűen a modern S235 acélt kihagytuk, továbbá a tiszta foszforvasat sem vettük számításba, mert abból önmagában használva nem készítettek vastárgyakat. A normalizált kritériummátrixota kritériummátrix normalizálásával kapjuk (ld. 5. táblázat).

5. táblázat: A kritériummátrix és a normalizált kritériummátrix.

Anyagok	Kritériummátrix			Normalizált kritériummátrix		
	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)
I	72.8	522.8	123.7	1.00	0.54	0.28
Sn	10.1	683.1	295.4	0.14	0.70	0.66
Sh	39.3	970.5	444.6	0.54	1.00	1.00
Plt8	8.6	634.0	54.0	0.12	0.65	0.12
Pld8	8.5	641.2	93.6	0.12	0.66	0.21
Plt16	10.8	631.4	61.2	0.15	0.65	0.14
PSnt8	18.8	713.6	136.5	0.26	0.74	0.31
PSht8	22.3	886.1	184.8	0.31	0.91	0.42

Az egyes kritériumok fontosságának meghatározása érdekében a súlyozó szorzókat az AHP-módszerrel (AnalyticHierarchyProcess, Saaty 1980), páronkénti összehasonlítás alkalmazásával számítottuk ki. Az AHP páronkénti összehasonlítás módszerében az egyes kritériumok fontosságát jellemző súlyszámokat úgy határozzuk meg, hogy csak az egyes kritériumok páronként egymáshoz viszonyított fontosságát szubjektíven pontozzuk 1-9 közötti pontszámokkal, így kapjuk az ún. páros összehasonlítás mátrixot (ld. 6. és 7. táblázat).

6. táblázat: A páros összehasonlítás mátrix a 6-8. századi kardpengékre.

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)
DIT (KV)	1	2	3
HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	1/2	1	2
HIT (W_c)	1/3	1/2	1

7. táblázat: A páros összehasonlítás mátrix a 9-10. századi kardpengékre.

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)
DIT (KV)	1	1	3
HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	1	1	3
HIT (W_c)	1/3	1/3	1

A kritériumok súlyszámait két estre, a 6-8. és a 9-10. századi kardpengékre külön adjuk meg. A 6-8. századi robusztus kardokat főként vágásra használták, a díszítő kovácshegesztés ezeknél a kardoknál volt elterjedt eljárás. Ezzel szemben a 9-10. században megjelenő kevésbé robusztus, jobban irányítható kardokat már vágásra és szúrásra is használták, a díszítő kovácshegesztés gyakorisága ezeknél a kardoknál már csökkent. A DIT-HIT összehasonlító fontosságát minkét időszak kardjainál azonosan 3-as számmal értékeltük, mert a kardokra jellemző volt a maradó alakváltozás nélküli, dinamikus igénybevétel okozta törés (ezt jól dokumentálja Žákovský et al. [megjelenés alatt 1]; [megjelenés alatt 2]). A DIT-HIG és a HIG-HIT összehasonlító fontosságát a 6-8. illetve a 9-10. századi kardok esetében eltérően ítéltük meg, mert a későbbi kardok a hajlító igénybevételnek, így a hajlító igénybevétel okozta elgörbülésnek és törésnek is jobban ki voltak téve.

Mindkét páros összehasonlítás mátrix legnagyobb sajátértékéből számítható következetlenségi index értéke kicsi ($CR < 0.1$), így az összehasonlító fontosság értékek megadása következetesnek tekinthető. A kritériumok súlyszámait a páros összehasonlítás mátrixok legnagyobb sajátértékéhez tartozó sajátvektora adja meg. Az így meghatározott súlyszámok a 8. és a 9. táblázatban láthatók.

8. táblázat: 6-8. századi kardokhoz használható anyagok rangsora.

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)	Szorzatösszeg	Sorrend (az 1. a legjobb)
Súlyszám					
I	0.54	0.30	0.16	0.75	1
Sn	0.08	0.21	0.11	0.39	4
Sh	0.29	0.30	0.16	0.75	1
Plt8	0.06	0.19	0.02	0.28	7
Pld8	0.06	0.20	0.03	0.29	6
Plt16	0.08	0.19	0.02	0.30	5
PSnt8	0.14	0.22	0.05	0.41	3
PSht8	0.16	0.27	0.07	0.50	2

9. táblázat: 9-10. századi kardokhoz használható anyagok rangsora.

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)	Szorzatösszeg	Sorrend (az 1. a legjobb)
Súlyszám					
I	0.43	0.43	0.14	0.70	2

Sn	0.06	0.30	0.09	0.46	5
Sh	0.23	0.43	0.14	0.80	1
Plt8	0.05	0.28	0.02	0.35	7
Plt8	0.05	0.28	0.03	0.36	6
Plt16	0.06	0.28	0.02	0.36	6
PSnt8	0.11	0.32	0.04	0.47	4
PSht8	0.13	0.39	0.06	0.58	3

Ahogy az a mechanikai anyagvizsgálatok eredményei alapján is sejthető volt, a mind a 6-8., mind pedig a 9-10. századi kardpengék esetében a legjobb választás a nemesített acél (Sh) vagy a lágvas (I) volt (még annak ellenére is, hogy a lágvas szilárdsága kicsi, így hajlító igénybevétel hatására könnyen elgörbül). Az MCA-módszer alapján a 6-8. századi kardoknál a második, a 9-10. századi kardoknál pedig a haramdik legjobb választás a díszítő kovácshegesztett anyagok közül került ki, ez a foszforvas + nemesített acél (PSnt8) kombinációja. Ha figyelembe vesszük, hogy a díszítő kovácshegesztést tartalmazó kardok nem egy anyagból készültek, hanem egy magra (vércsatornára) két oldalról kovácsolták rá az acél éleket, akkor az előbbi rangsor a mag anyagára vonatkozik. Összességében az MCA-módszer alapján felállított anyagrangsorból is kiderül, hogy a díszítő kovácshegesztés szerepe nem a mechanikai tulajdonságok javításában, így a különböző igénybevételekkel szemben történő ellenállás javításában van.

3.2. A maratási eredmények értékelése és következtetések

Az elkészült fotók alapján egymáshoz viszonyítva értékelni kellett a maratás után kapott felületi mintázat jellemzőit. Ahhoz, hogy objektív rangsort állíthassunk fel, két paramétert foglalmaztunk meg:

A paraméter: A világos és sötét rétegek közötti fényesség-különbség (kontraszt)

B paraméter: A rétegeken belüli világosság-homogenitást

Ezeket a paramétereket képfeldolgozó szoftver segítségével (Photoshop CS3) határoztuk meg minden fekete-fehérre konvertált képen. A szoftver segítségével a középső és az egyik szomszédos réteg közel teljes területén minden képpont (kb. 150 000 képpont, ld. „Pixels” a 14. ábrán) világosságát megmértük, a mért értékek átlagát (ld. „Mean” a 14. ábrán) és szórását (ld. „StdDev” a 5. ábrán) kiszámítottuk. A két réteg átlagos világosságának előjeles különbsége az A paramétert (ha a foszforvas réteg a sötétebb, akkor az előjel negatív), a rétegek világosságának szórásának átlaga pedig a B paramétert adta. Az A és a B paraméterre kapott értékeket a 10. táblázat foglalja össze.



14. ábra: Egy rétegen belül az értékelt terület (a képen a sokszög alakú terület) képpontjainak világossága (hisztogram).

Ezzel a módszerrel az elkészült képekhez két számot rendelhattünk. A mintázat markánságát akkor tekintettük elegendőnek, ha az A paraméter értéke abszolút értékben meghaladta a szubjektíven megválasztott 40-es értéket, a B paraméter pedig nem haladta meg a szintén szubjektíven választott 20-as értéket. Ennek megfelelően a 10. táblázatban a bekeretezett mezők tartalmazzák a kifejezetten markánsnak, kontrasztosnak tekinthető mintázatokat.

10. táblázat: Az A és B paraméterek értékei az egyes fotókra.

	Citromsav			Ecetsav			Foszforsav			Kénsav			Salétromsav			Sósav		
	PSH	PSn	PI	PSH	PSn	PI	PSH	PSn	PI	PSH	PSn	PI	PSH	PSn	PI	PSH	PSn	PI
2%	A									11.8	34.9	6.8	64.3	46	3	2.7	16.1	22.8

10s 20°	B									13.3	17.7	11.2	14.3	19.0	14.8	11.3	13.8	20.1
2% 60s 20°	A						-38	-9.1	-22.9	1.9	13	21.3				27	14.3	41.1
	B						18.2	25.8	13.7	19.6	17.4	22.5				24.6	17.1	25.9
20% 10s 20°	A	-	-	-	-	-	-6.4	31.5	40.1	-19.9	8.1	-1.9	32	-2.6	-69.6	-47.1	-60.4	-48.6
	B	-	-	-	-	-	11.8	19.7	19.3	10.6	16.6	10.6	12.7	18.3	12.6	14.3	18.0	16.1
20% 60s 20°	A						-12.1	0.7	45.9	-28.2	31.3	1.3				4	-31.1	-33.1
	B						27.2	24.5	32.7	22.4	26.4	14.3				24.9	22.4	19.2
2% 10s 70°	A									38.6	20.5	11.5	9.9	6.2	-48.9	-31	17.1	-28.4
	B									23.7	20.9	24.7	12.5	13.7	17.3	18.7	25.8	11.3
2% 60s 70°	A	-45.9	-17.9	-33.4	-26.2	-26.8	-12.7	-8.2	-2.6	3.2	4.6	-34.6	-27.2			-46.9	-17	0
	B	18.6	19.7	12.8	17.7	19.4	15.2	27.7	18.4	24.0	22.0	22.8	24.9			30.8	28.2	20.5
20% 10s 70°	A	-52.6	-14.8	-34.1				-41.3	-33.7	-34.3	46.4	26.4	18.4			-118.9	-58.3	-49.3
	B	18.1	20.5	12.5				32.1	22.9	16.5	18.4	21.7	28.2			11.4	16.9	17.8
20% 60s 70°	A	-48.1	-26.1	-49.2	-57.3	-14.1	-23.4	21.2	14.9	-3.6	47.3	49.9	45.3			-19	5.6	-23.9
	B	15.1	23.2	15.0	10.5	18.0	14.7	23.8	21.4	31.5	15.9	20.6	34.0			28.1	34.1	32.8

Ezek után már felállítható egyfajta rangsor a maratás után kapott felületi mintázatot illetően. A legmarkánsabb, legkontrasztosabb mintázatot a foszforvas és nemesített acél kombinációja, 20%-os töménységű, 70°C-os hőmérsékletű sósavval történő 10 másodperces maratás mellett eredményezi (az A paraméter kiugróan magas, 118.9-es értékű). A 20%-os sósav minden anyagpárosításra markáns mintázatot eredményezett 20°C-os és 70°C-os hőmérsékleten is. A sósav, mint említettük, a középkorban minden bizonnyal elvileg elérhető marószer volt, még ha nem is olyan könnyen, mint például az ecetsav, ezért nem valószínű, hogy gyakran használták. A szintén beszerezhető salétromsav, ugyancsak határozott mintázatot hozott létre, bár az egyes anyagpárosításokra vonatkozóan más-más maratási paraméterek mellett. A kénsav és a foszforsav csak néhány esetben, a citromsav és az ecetsav pedig egy esettől eltekintve kizárólag csak a foszforvas és nemesített acél anyagpárosítás mellett eredményezett markáns mintázatot. A korabeli kardkészítők minden bizonnyal a természetben könnyebben elérhető, relatíve gyenge savakat használták rendszeresebben, mint például az ecetsavat, a megsavanyodott sört, a vizelet savtartalmát, a borkősavat, illetve a csersavat, amely az igen hatásos, kék-fekete színű sávokat eredményezi és egyfajta rozsdásodás-gátlásként is szolgált. Vizsgálatainkban természetesen a kor valószínűsíthető szakmai szokásai mellett a technológia minél szélesebb palettájának vizsgálatára is fókuszáltunk, így az akkoriban szintén elérhető, használható erősebb savakat is kipróbáltuk.

4. Összegzés

A 2-10.században díszítő kovácshegesztéssel készült kardpengékhez felhasznált anyagokból készített próbatesteken elvégzett mechanikai anyagvizsgálati eredmények alapján kijelenthető, hogy a díszítő kovácshegesztésnek nem volt szerepe a mechanikai tulajdonságok javításában. Mindemelllett a korabeli karpengék számára legmegfelelőbb, MCA-módszerrel meghatározott anyagrangsorban a díszítő kovácshegesztéssel készült anyagokat megelőzi a lágyvas és a nemesített acél, mert a korabeli díszítő kovácshegesztéshez foszforvasat használtak fel, amelynek mind az ütőmunkával mind pedig a fajlagos törési munkával jellemezhető szívóssága nagyon kicsi. A legjobb mechanikai tulajdonságúnak a foszforvas + nemesített acél anyagpárosítással készült próbatestek bizonyultak a díszítő kovácshegesztéssel előállított próbatestek közül.

A maratási kísérlek eredményei alapján viszont látható, hogy a díszítő kovácshegesztésnek első sorban díszítő szerepe lehetett. A legmarkánsabb, legkontrasztosabb mintázatot szintén a foszforvas + nemesített acél kombinációja eredményezte, 20%-os töménységű, 70°C-os hőmérsékletű sósavval történő 10 másodperces maratás mellett.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnénk mondani Dr. Botz Andrásnak és Dr. Fehér Andrásnak az XRF vizsgálatok elvégzéséért és támogatásukért, Sajó Istvánnak a gypvasércminták XRD elemzéséért, illetve a Somogy Természetvédelmi Szervezet és Zöld Folyosó Közalapítványnak (Somogy TVSZ) az Őskohász Táborok lebonyolításában nyújtott segítségért. Szeretnénk megköszönni továbbá Patrick Bárta-tól és Petr Žákovský-tól kapott szakmai tanácsokat. A bemutatott kutatást az Új Széchenyi Terv (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 és TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009) és a Cseh Tudományos Alap (GACR – Grantová agentura České republiky, P405/12/2289) támogatta.

Hivatkozások

- Anstee, J.W.; Biek, L. 1961: A Study in Pattern-Welding, *Medieval Archaeology* 5, pp 71–93.
- Anteins, A. 1973: *Damasska āsta' w stranah bassejna Baltijskogo Morā*, Riga: Izdatel'stvo Zinatne.
- Böhne, C.; Dannheimer, H. 1961: Studien an Wurm buntklingen des frühen Mittelalters, *Bayerische Vorgeschichtsblätter* 26, 1961, pp 107–122.
- Buchwald, V.F. 2005: Iron and steel in ancient times, *Historisk-filosofiske Skrifter* 29, København: Det Kongelige Danske Videnskabsnæstelskab.
- Datta, N.C. 2005: *The Story of Chemistry*. Universities Press, India, pp 40.
- Edge, D.; Williams, A. 2003: Some Early Medieval Swords in the Wallace Collection and Elsewhere, *Gladius* 23, pp 191–210.
- Fehér, B. 2000: Források a korai iszlám kardművesség történetéhez, *Pázmány Péter Katolikus Egyetem BTK, Piliscsaba*, pp 21, 44.
- Forbes, R.J. 1970: *Short History of the Art of Distillation from the Beginnings up to the Death of Cellier Blumenthal*, Brill, Leiden, pp 86–87.
- Fülek, Gy. 2009: *Geokémiai körfolyamatok*. – Szent István Egyetem kiadványa, Gödöllő, pp 26–27.
- Gilmour, B. 2007: Victims of crime? Ferrous technology and origins of two pattern-welded long swords from Durovernum Cantiacorum (Canterbury Kent), [in:] *Archaeometallurgy in Europe 2007. Proceedings of the 2nd International Conference. Selected Papers*. Aquileia, 17–21 June 2007, Milano: Associazione italiana di Metallurgia, pp 250–261.
- Gömöri, J. 2002: Az Avar és Árpád-kori vaskohászat emlékei Pannóniában, *Sopron*, pp 31–32.
- Graecus, M. 1804: *Liber lignum ad comburendos hostes*, Delance et Lesueur, Párizs, pp 15.
- Halmányi, Sz.; Riedel, L. 1986: *Régi fegyverekről*, Budapest, pp 88.
- Hošek, J.; Beran, V.; Komoróczy, B. 2011: The metallography of two Roman swords from Mušov, Czech Republic, [in:] A. Hauptmann, D. Moderessi-Tehrani, M. Prange (eds.), *Archaeometallurgy in Europe III – Abstracts*, Bochum: Deutsches Bergbau-Museum Bochum, pp 100.
- International Standard ISO 148-2:2008(E).
- International Standard ISO 7838:2005(E).
- International Standard ISO 6892-1:2009(E).
- Jones, L.A. 1997: The Serpent in the Sword: Pattern-Welding in Early Medieval Swords, „Park Lane Arms Fair Catalogue” 4, pp 7–11, online verzió [megtekintve 2013.06.07]:
- Jones, L.A. 2002: *Blade Construction and Pattern-Welding*, [in:] I. Peirce, *Swords of the Viking Age*, Woodbridge: The Boydell Press, pp 145–151.
- Kappler, A.; Straub, K.L. 2005: Geomicrobiological Cycling of Iron, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Vol. 59, pp 85–108.
- Karpenko, V.; Norris, J.A. 2002: Vitriol in the History of Chemistry, *Chem. Listy* 96, pp 997–998, 1002.
- Kercsmár, Zs.; Thiele, Á.: A somogyi gypvasérc telepek genetikája és geokémiai jellemzői, földtani és archeometallurgiai megközelítés alapján, *Földtani Közlöny* (megjelenés alatt).
- Koch, S.; Sztókay, K.I. 1968: *Ásványtan II*, Tankönyvkiadó, pp 629–630.
- Költő, L. 1999: Korai vaskohászati lelőhelyek kutatása. Múzeumi tájékoztató (Somogy Megyei Múzeumok Igazgatósága) 1999/3–4, pp 18–21.
- Lang, J.; Ager, B. 1989: Swords of the Anglo-Saxon and Viking Periods in the British Museum: A Radiographic Study, [in:] S. Chadwick Hawkes (ed.), *Weapons and Warfare in Anglo-Saxon England*, Oxford University Committee for Archaeology Monograph 21, Oxford: Oxford University Committee for Archaeology, pp 85–122.
- Lang, J. 2011: The Celtic Sword: a source of practical inspiration, [in:] J. Hošek, H. Cleere, L. Mihok (eds.), *The Archaeometallurgy of Iron. Recent Developments in Archaeological and Scientific Research*, Prague: Institute of Archaeology ASCR, Prague, v.v.i., pp 263–272.
- Mäder, S. 2001: *Stähle, Steine und Schlangen. Zur Kunst-, kultur- und technikgeschichtlichen Einordnung dreier Schwertklingen aus dem alamannischen Siedlungsraum*, TS of PhD Thesis, IA HU, Berlin.
- Magnusson, M.; Palsson, H. 1969: *The Laxdæla Saga*. Penguin Classics Book 218. chapter 30. pp 272.
- Maryon, H. 1960: Pattern-welding and Damascening of Sword-blades – Part I. Pattern-Welding, *Studies in Conservation* 5/1, pp 25–37.
- Newman, William, R. 1991: *The Summa Perfectionis of Pseudo-Geber*, Brill, Leiden, pp 73–74, 106.
- Newman, W. R. 1991: *The Summa Perfectionis of Pseudo-Geber*, Brill, Leiden, pp 73–74.
- Pelsmaeker, S.B.M. 2010: *Weapons of Princes, Weapons of War? An experimental analysis of pattern-welded swords from northwestern Europe, 400–1100 AD*, TS of Master Thesis, GIA RUG, Groningen.
- Pleiner, R. 1993: *The Celtic Sword*, Oxford: Clarendon Press.
- Polák, M. 2008: *Damascenská ocel – středověký kompozit z pohledu současnosti*, *Jemná mechanika a optika* 9, pp 253–254.
- Saaty, T.L. 1980: *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill International.
- Smith, C.T.; Gnudi, M.T. 1990: *The Pyrotechnia of Vannoccio Biringuccio. The Classic Sixteenth-Century Treatise on Metals and Metallurgy*. Dover Publications, New York, pp 12, 183–185.

- Stillman, J.M. 1960: *The Story of Alchemy and Early Chemistry*. Dover Publ. New York, pp 185
- Teophilus Presbyter 1886: *De diversibus artibus*, Theophili, qui et Rugerus presbyteri et monachi 1847: *Diversarum artium schedula*, [ford. Hendrie, Robert] George Woodfall and Son, [ford. Takács Vilmos] Műszaki Könyvkiadó, Budapest, London, pp 51-52, 56, 159.
- Thålin-Bergman, L. 1979: *Blacksmithing in Prehistoric Sweden*, [in:] K. Calissendorff, W. Holmqvist, Å. Hyenstrand, I. Serning, L. Thålin-Bergman, *Iron and Man in Prehistoric Sweden*, Stockholm: LTsförlag, pp 99–133.
- Thiele, Á. 2010: A kora középkori vaselőállítás technológiája a X. századi fajszi-típusú bucakemencében elvégzett próbakohósítások tükrében, In: Petkes Zsolt (Ed.) *Népvándorlások Fatai Kutatóinak XX. Összejövetelének konferenciakötete Budapest–Szigetalom*, 2010. október 28–30., Budapest, Magyarország, 2010.10.28-2010.10.30., pp 395-408.
- Thiele, Á.; Bán, K. 2010: A bucavaskohászat kora középkori technológiája a megvalósíthatóság tükrében. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat*, 143:(2), pp 7-12.
- Thiele, Á.; Dévényi, L. 2011: Rekonstrukciós kísérletek a X. századi fajszi típusú bucakemencében, In: Dr. Csibi Venczel-J (Ed.) *OGÉT 2011-XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*. Csíksomlyó, Románia, 2011.04.28-2011.05.01. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp 364-367.
- Thiele, Á. 2011: Az ércről a vastárgyig: a bucavaskohászat metallurgiája, *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat*, 144:(1), pp 2-5.
- Thiele, Á. 2012: Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom, *Periodica Politechnica – Mech. Eng.* 54:(2), pp 99-104.
- Thiele Á.; Török, B.; Költő, L.: Energy dispersive X-ray analysis (SEM-EDS) on slag samples from medieval bloomery workshops – the role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron in Somogy County, Hungary *Proceedings of the 39th International Symposium for Archaeometry*, Leuven (2012) (megjelenés alatt)
- Török, B.; Thiele, Á.: Smelting bog iron ores under laboratory conditions – the role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron in Somogy county. — *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (megjelenés alatt)
- Tylecote, R.F.; Gilmour, B.J.J. 1986: *The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons*, BAR British Series 155, Oxford: B.A.R., pp 146–262, 251–252.
- Vega, E.; Dillmann, P.; Lheritier, M.; Fluzin, P.; Crew, P.; Benoit, P. 2003: Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach. In: *Archaeometallurgy in Europe*, vol. II, Milan, pp 337-346.
- Weiss A. M. 2004: *Food in Medieval Times*. Greenwood Press, London, pp 28.
- Williams, A. 2012: *The Sword and the Crucible. A History of the Metallurgy of European Swords up to the 16th Century*, *History of Warfare* 77, London: Brill.
- Williams, A. 1977: *Methods of Manufacture of Swords in Medieval Europe Illustrated by the Metallography of some Examples*, *Gladius* 13, pp 75–101.
- Žákovský, P.; Hošek, J.; Bárta, P.: Dussacks with broad blades and the probable method of their manufacturing, [in:] L. Marek (ed.), *Weapons Bring Peace? Warfare in Medieval and Early Modern Europe*, *Acta Universitatis Wratislaviensis: Studia archaeologica*, Wrocław (megjelenés alatt 1).
- Žákovský, P.; Hošek, J.; Sedláčková, L.: *Meče 11.–13. století z území Moravy*, *Archaeologia historica* 38. (megjelenés alatt 2).