

A LACZKÓ DEZSŐ MÚZEUM KÖZLEMÉNYEI



PUBLICATIONES
MUSEUM LACZKÓ DEZSŐ

29
2019

REDIGIT
S. PERÉMI ÁGOTA

VESPREMII, 2019

A LACZKÓ DEZSŐ MÚZEUM
KÖZLEMÉNYEI

29
2019

SZERKESZTŐ:
S. PERÉMI ÁGOTA

VESZPRÉM, 2019



ISSN 2415-8895

Címlapkép:

Korongos övveret a balatonszőlősi késő avar kori temető A. sírjából

Fotó: Sárközi Judit

A LACZKÓ DEZSŐ MÚZEUM KIADVÁNYA

Felelős kiadó: Péterváry-Szanyi Brigitta

Készült 100 példányban, 22,25 A/5 ív terjedelemben

Nyomtatás: OOK-Press Kft.

www.ookpress.hu

Felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető

A DÍSZÍTŐ KOVÁCSHEGESZTÉS (DAMASZKOLÁS) SZEREPE A KORA KÖZÉPKORI KARDPENGÉKBEN

1. Bevezetés

A díszítő kovácshegesztés 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.⁶ Az angolban szintén damasc, vagy damascus steel, a németben pedig damast, damaszener Stahl a gyakran használt köznyelvi kifejezés. Az angol archeometallurgiai szakirodalomban azonban a „pattern-welding” szóösszetétel használatos. Ennek alapján, a technológia megnevezésére a szerzők a díszítő kovácshegesztés 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 kovácshegesztés (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 esetben 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 kovácshegesztés történeti háttere

A díszítő kovácshegesztés a kelta időkben kezdődött réteges kompozit készítés („piling” vagy „piled composites”) eljárásáig vezethető vissza.⁷ Lágvas („wrought iron”, $C < 0,2 \text{ wt\%}$) és acél („steel”, $C > 0,2 \text{ wt\%}$) lapokat felváltva helyeztek egymásra, majd a tömböt kovácshegesztéssel hozták anyagzáro kapcsolatba.⁸ 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 kovácshegesztés technológiája akkor fejlődött ki az egyszerű réteges kompozit készítésből, amikor foszforvasat („phosphoric-iron”, az archeometallurgiában ez alatt a $P > 0,1 \text{ wt\%}$ foszfortartalmú vasanyagokat értik⁹) kezdtek felhasználni a réteges rudak elkészítéséhez. Ezeknek a rudaknak a mintázatot többnyire további megmunkálással (megcsavarhatták őket a hossztengelyük körül, levághattak vagy forgácsolással anyagot választhattak le róluk a hosszuk mentén, stb.) különlegesebbé, maratással pedig láthatóvá tették.¹⁰ Annak ellenére, hogy a legtöbben még ma is úgy gondolják, hogy lágvas és acél rétegek eredményezik a mintázatot, már az 1980-as években kiderült, hogy a díszítő kovácshegesztésben kizárólag kétféle, foszforvas+lágvas vagy foszforvas+acél anyagpárosításokat használtak.¹¹

Díszítő kovácshegesztéssel első sorban kardpengék

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, Czech Republic

³ Nicolaus Copernicus 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

⁶ HALMÁNYI-RIEDEL 1986

⁷ PLEINER 1993, LANG - AGER 1989, JONES 1997, JONES 2002, WILLIAMS 2012

⁸ Id. BUCHWALD 2005, ANSTEE - BIEK 1961, JONES 1997, WILLIAMS 1997, EDGE - WILLIAMS 2003, LANG 2011

⁹ VEGA et al 2003

¹⁰ ANTEINS 1973, THÅLIN-BERGMAN 1979, MÄDER 2001, ANSTEE - BIEK 1961

¹¹ TYLECOTE - GILMOUR 1986, BUCHWALD 2005, HOYLAND - GILMOUR 2006

magja (amelybe a vércsatorna volt bekovácsolva) készült, mégpedig vagy teljes szelvényében, vagy pedig lágyvas vagy acél magra rákovácsolt díszítő kovácshégesztéssel előállított szalagok rákovácsolásával.¹² A kardok központi magja általában maga is több díszítő kovácshégesztéssel előállított rúd sokféle kombinációban történő kovácshégesztésével készült.¹³ A díszítő kovácshégesztéssel készült rudak általában hét rétegből álltak.¹⁴ Ehhez a központi maghoz két oldalról a kard élet szintén kovácshégesztéssel hozták anyagzáró kötésbe.¹⁵ 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,¹⁶ 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.¹⁷ Ezeknek az igen nagy becsben tartott kardoknak a mintázata is komoly, már-már mitikus szerephez jutott; rendszerint kígyók tekergőzésére, sárkány erőt adó leheletére aszociáltak belőle.

1.2. Célkitűzés

Manapság a köztudatban és az achaeometallurgiával foglalkozó szakemberek körében is elterjedt vélekedés az, hogy ezek a díszítő kovácshégesztéssel készült kardpengék tetszetős megjelenésük mellett kiváló mechanikai tulajdonságokkal is rendelkeztek. Korábban már mások is tanulmányozták díszítő kovácshégesztéssel készült próbatestek mechanikai tulajdonságait, azonban a próbatestek anyagául nem foszforvasat, sőt még csak nem is bucavasat, hanem modern vasanyagokat használtak fel¹⁸, így eredményeik és az azokból levont következtetések vitat-

hatók. A legfőbb akadály magának a kovácsolható foszforvasnak az előállítása és a díszítő kovácshégesztés nagy tapasztalatot igénylő technológiája volt. A díszítő kovácshégesztéssel 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 kovácshégesztésnek valóban a mechanikai tulajdonságok javításában vagy csak a szép felületi mintázat létrehozásában volt szerepe?

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

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

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

1.3. A kardpengék igénybevételei

A kardpengéknél harc közben a következő három igénybevétel lépett fel: ütésszerű (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.

Az ütésszerű hajlító igénybevétel a penge törését okozhatta. Az ütésszerű hajlító igénybevétellel szembeni ellenállás az anyagjellemzők tekintetében a dinamikus szívóssággal hozható összefüggésbe, amely az ütőmunkával (KV (J)), minél nagyobb, annál szívósabb) jellemezhető. Az anyagok ütőmunkája a Charpy-féle ütvehajlító vizsgálattal mérhető. Az ütőmunka 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.

¹² JONES 1997, JONES 2002, WILLIAMS 2012

¹³ TYLECOTE - GILMOUR 1986, JONES 2002, LANG - AGER 1989

¹⁴ Id. JONES 1997, THÄLIN-BERGMAN 1979

¹⁵ ANTEINS 1973, JONES 2002; MARYON 1960, BÖHNE - DANNHEIMER 1961

¹⁶ LANG - AGER 1989, ANTEINS 1973, HOŠEK et al. 2011, GILMOUR 2007, WILLIAMS 2012

¹⁷ MAGNUSSON - PALSSON 1969

¹⁸ PELSMAEKER 2010, LANG 2011, POLÁK 2008

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 ugyanúgy van hatással, mint ahogyan azt az ütősszerű hajlító igénybevétel esetén 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 szakítópróbatést a törésig.

Az eddig említett fogalmakat az 1. táblázat foglalja össze.

Nagy nyomó igénybevétel következtében a kard-penge kihajolhat. Ha a penge már kis nyomó igénybevételre kihajlik, akkor nehezen használható döfésre, szúrásra. A penge kihajlással szemben mutatott ellenállása csak geometriai jellemzők függvénye (karcúság), 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 időszakal kapcsolatosan leginkább azt határozhatjuk meg, hogy egyáltalán milyen savakat használhattak marószerekként.

A kénsav („vitriol” - H₂SO₄) ősidők óta ismert vegyület, sumer és asszír feljegyzések éppúgy említik,

1. táblázat: A mechanikai anyagvizsgálatok mechanikai háttere
Table 1: Mechanical background of the mechanical tests

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

mint Dioscorides (Kr.u. 1. sz.) görög orvos, vagy Idősebb Plinius (Kr. u. 23-79), római polihisztor.¹⁹ A kénsavról koraiszlám forrásokból tudjuk, hogy fém-maratási célra is használták a Közel-Keleten. Ya'qūb ibn Işhāq 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 r-Rayhān al-Bīrūnī szintén megemlékezett erről az eljárásról *Gyűjteményes könyv az ékkövek ismeretéről* című írásában.²⁰ Európában is korán ismerhették az említett savat, hiszen a festéshez már az ókortól használatos Rubia tinctorum (festőbuzér) gyökeréből a színezéket fermentálással, és kénsavas vagy lúgos hidrolízissel állították elő.²¹ 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 tingenda musiva*) található.²²

A *salétromsav* (HNO₃) 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* (C₆H₈O₇) és *borkősav* (C₄H₆O₆) „felfedezése” mellett ő adta meg az aranyat oldó „királyvíz” (aqua regia) három rész sósavat és egy rész salétromsavat tartalmazó receptjét.²³ Az európai írásokban ugyanez a 13. századi Pseudo-Geber néven emlegetett (az elnevezés nem véletlen), ismeretlen alkimista műveiben (*Summa perfectionis magisterii*) jelenik meg, leírva azt is, hogy a királyvizet kénsavban oldott szalmiáksó, ammóniasó (sal ammoniacum, NH₄Cl) segítségével állították

elő.²⁴ Egy korai 14. századi feljegyzésben is szerepel „sal armoniacum” formában az ammóniasó. A fennmaradt recept arról tanúskodik, hogy az ammóniasó vizes oldata korrodálhatja a vasat. („*Aqua corrosiva: Nota quod aqua corrosiva minuens corporum pondera fit ex sale armoniaci et coperosa in equali portione distillando aquam per alembicum [...] Aqua solvens argentum: Aqua solvens argentum et quidem alia metalla fit ex vitriollo romano et sale armoniaco in equali portione et haec aqua dissolvit ferrum...*”)²⁵

Az *ecetsav* (CH₃COOH) az ókorban és a középkorban közismert volt. Az orvoslásban többek között fogfájás ellen, vérzés elállítására 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.²⁶

A *csersav* (C₁₄H₁₀O₉ + 2H₂O) Teophilus Presbyter (kb. 1070 – 1125) *De diversibus artibus* című munkájában olvashatunk. Egy tintakészítési receptben lejegyzett növény, a Ligna Spinarum egy tüskés fafajta jelöl, melynek kérgeiben magas a csersavtartalom.²⁷

A „*rozsdáatalakítóként*” is ismert *foszforsav* (H₃PO₄) (amely a vöröses-barna rozsdát (Fe₂O₃) fekete ferro-foszfáttá (FePO₄) 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 írások, 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 gubacsáiból a csersav, illetve használhattak kénsavat, salétromsavat, sósavat is, annak pontos definiálása nélkül.

¹⁹ KARPENKO - NORRIS 2002

²⁰ FEHÉR 2000

²¹ TEOPHILUS 1986

²² STILLMAN 1960

²³ DATTA 2005

²⁴ KARPENKO - NORRIS 2002

²⁵ NEWMAN 1991

²⁶ WEISS 2004

²⁷ TEOPHILUS 1986

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 gypvasérc kohósításával. A kohósításokat a Somogyfajszon évente megrendezésre kerülő Őskohász Táborban végeztük el 2012 nyarán.²⁸ Korábbi publikációinkban részletes leírás található az alapul szolgáló, az elmúlt években lezajlott kísérleti régészeti munkáról.²⁹

2.1.1. Gypvasérc gyűjtés és előkészítés

A Lábod településtől kb. 3 km-re ÉK-re található Petesmalmi Vidrapark területén avar kori vaskohászati műhelyt tártak fel még a '90-es években.³⁰ Az egyik halastó fenekén kb. 100x50m-es kiterjedésű, néhányszor 10 cm vastag gypvasérc szemcsékből

álló hordalékkúp keletkezett (EOV koordináták: 530.807; 099.280). A tóba befolyó patak hordalékkúpjá a patakmeder oldalfalában több, a folyásirányban feljebb kibukkanó biogén gypvasérc lencse áthalmozásából származik.³¹ A hordalékkúpból lapátoltuk össze a próbakohósításokhoz szükséges gypvasércet, amikor a halastavat leeresztették.

Az összegyűjtött gypvasércet a kohósítás előtt megpörköltük. A régészeti feltárások alapján tudjuk, hogy pörkölést a 6-8. századi kárpát-medencei Őskohások is végeztek.³² Az összegyűjtött gypvasércet szabad tűzön, egy ércpörkölő gödörben fél-egy napon át hevítettük. A pörkölés során a vashidroxidok hidrátvíz tartalma eltávozik és vasoxidokká, hematittá és magnetittá alakulnak át, illetve szerkezetük fellazul, könnyen morzsolhatóvá válnak, és jobban átjárják őket a bucakenece redukáló gázai.³³

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

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

Table 2: Phase composition and calculated chemical composition of bog iron ore samples based on XRD test

Azonosító	Megjegyzés	Fázisösszetétel (wt%)			Össz.
		Quar	Goet	Hemma	
pet_v-01	Petesmalmi gypvasérc minta	3.00	90.00	-	93.00
pet_v-01	Petesmalmi gypvasérc minta 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	Petesmalmi gypvasérc minta	3.00	80.88	9.12	93.00
pet_v-02	Petesmalmi gypvasérc minta pörkölés után	5.00	90.00	-	95.00

²⁸ Az Őskohász Táborokról részletesen a www.bucavasgyuro.net oldalon lehet tájékozódni.

²⁹ 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=O8kwoVEhHKY>

³⁰ KÖLTŐ 1999

³¹ A somogyi gypvasércet genetikájáról bővebben ld. KERCSMÁR - THIELE 2013

³² GÖMÖRI 2002

³³ THIELE 2010

3. táblázat: Gyepvasérc minták kémiai összetétele XRF vizsgálat alapján
Table 3: Chemical composition of bog iron ore samples based on XRF test

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 gyepvasérc minta	3.82	81.0	0.46	3.44	1.61	6.60	0.12	56.70
pet_v-04	Petesalmi gyepvasérc minta 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 gyepvasércet földtanával foglalkozó legutóbbi kutatásunk során megállapítottuk, hogy ez a kémiai összetétel általánosan jellemző a somogyi gyepvasércekre.³⁴ A fázisösszetétel (és ezáltal a kémiai összetétel) pörkölés következtében történő változása szintén megfigyelhető: a pörkölés előtt főként goethites érc hematitosá alakul át.

A pörkölés után a gyepvasérc rögöket 2-3 cm-nél kisebb darabokra törtük, ahogyan az a régészeti feltárásokon előkerült pörkölt gyepvasércszemcséknél megfigyelhető volt.³⁵

2.1.2. Kohósítások

A kohósításokhoz csertölgyből³⁶ égettünk faszénét 2m³ felhasználott fából rakott faszénégető boksában.

A kohósításokat az ún. fajszi-típusú bucakemence másolatában végeztük el. Ilyen bucakemencék kerültek napvilágra a somogyi honfoglalás-kori műhelygödrök feltárása során.³⁷ A bucakemencét a Belső-somogyban a talajszint alatt 1-3 m 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.

Ugyanabban a kísérleti bucakemencében összesen három kohósítást és egy újrakohósítást végeztünk

el (egy-egy kohósítás után mindössze a vasbuca kihúzásához kitört mellfalazot kell újra építeni). A levegőt ábrázolások alapján³⁸ rekonstruált kézi fűjtatóval végeztük, a levegő térfogatárama minden kohósításnál és az újrakohósításnál is kb. 100l/perc volt. A kohósítások során minden esetben 20 kg pörkölt gyepvasércet adagoltunk a bucakemencébe, 1:1 faszén:pörkölt gyepvasérc tömegarány mellett. Egy gyepvasércadag és egy faszénadag tömege 250 g 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 vas-vasfoszfid(Fe-Fe₃P) eutektikum miatt (P≈2wt%).

Az második kohósítás során 10 g égetett meszet (CaO) adagoltunk a bucakemencébe minden gyepvasércadaghoz (az égetett mésznek a vasbuca foszfortartalmára gyakorolt hatására vonatkozóan.³⁹ A kohósítás eredményeképpen kapott második vasbucát rúddá kovácsoltuk. A vasrúd egyik oldalát fémtisztára csiszoltuk és p-XRF műszerrel 11 pontban megmértük a foszfortartalmat. A foszfortartalmom a CaO hatására jelentősen csökkent (P≈0,5wt%). A kapott vasrudat foszforvas alapanyagként használtuk fel a maratási kísérletek próbatestjeinek kikovácsolásához.

Az harmadik kohósítás során 25 g CaO-ot adagoltunk a bucakemencébe minden gyepvasércadaghoz. A kohósítás eredményeképpen kapott harma-

³⁴ KERCSMÁR - THIELE 2013

³⁵ GÖMÖRI 2002

³⁶ Az őskohászokhoz hasonlóan, ld. GÖMÖRI 2002

³⁷ GÖMÖRI 2002

³⁸ BUCHWALD 2005

³⁹ THIELE et al. 2013 és TÖRÖK - THIELE 2013

dik 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.

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

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

2.2. A próbatestek kikovácsolása

Az ellenőrzött kémiai összetételű három alapanyagból négy különböző anyagú 10x10x60 mm befoglaló méretű, lágyvas (I), foszforvas (P), normalizált acél (Sn) és nemesített acél (Sh) próbatestet kovácsoltunk. Referencia anyagként modern S235 szerkezeti acélt választottunk. A bucavas alapanyagokból díszítő kovácsheglesztéssel 8 és 16 rétegű, csavart mintázatú és nem csavart mintázatú (párhuzamos rétegek), a középkori kard- és késpengéknél előforduló, foszforvas

és normalizált lágyvas (PIt8 és PId8 és PIt16), 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-próbatest típusok közül egy-egy reprezentáns darab a 6. 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 órában át hőn tartottuk. A normalizálás kovácsolási hőmérsékletéről levegőn való lehűtéssel történt.

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok után a kettőtört próbatestek töretfelületének közeléből kimunkált teljes keresztmetszeti (10x10 mm-es felületű) mintákból metallográfiai csiszolatokat készítettünk. Az alapanyagok és a próbatestek szövetszerkezetének és pontosabb karbontartalmának meghatározása céljából a mintákon metallográfiai vizsgálatot végeztünk. A marószert 2%-os nitál volt. A karbontartalmat a szövetszerkezet alapján képelemző programmal (Photoshop CS3) számítottuk ki. A foszforvas pontos foszfortartalmát energiadiszperzív röntgen spektrométerrel 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:

4. táblázat: Az előállított alapanyagok és a belőlük készült próbatestek szövetszerkezete és kémiai összetétele
Table 4: Texture and chemical composition of the raw materials produced and the samples made of them

Alapanyagokból készült próbatestek	Darab-szám	Jelölés	Szövetszerkezet	Kémiai összetétel		Díszítő kovácsheglesztéssel készült próbatestek	Jelölés	Darab-szám
				C (wt%)	P (wt%)			
Lágyvas	5	I	Ferrites, kevés perlittel	0.05	0	Foszforvas+lágyvas, 8 rétegű, csavart	PIt8	4
Foszforvas	3	P	Ferrites, vékony ferrit-perlites sávokkal	max. 0.2	0.6–1.1	Foszforvas+lágyvas, 8 rétegű, nem csavart	PId8	4
Normalizált acél	4	Sn	Widmanstatten (perlit és proeutektoidos ferrit)	kb. 0.6	0	Foszforvas+lágyvas, 16 rétegű, csavart	PIt16	4
Nemesített acél	3	Sh	Megeresztett martenzit apró karbidkiválásokkal	kb. 0.6	0	Foszforvas+normalizált acél, 8 rétegű, csavart	PSnt8	4
Modern acél	5	S235	Szabvány szerinti	Szabvány szerinti		Foszforvas+nemesített acél, 8 rétegű, csavart	PSht8	4

2.3. Mechanikai anyagvizsgálatok a díszítő kovácshégesztéssel készült próbatesteken

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

Első lépésben a Charpy próbatesteken Charpy-féle ütvehajító vizsgálatot végeztünk az ISO 148-2:2008(E) szabványnak megfelelően (a szabványtól csak a próbatestek hosszmérete tért el, amely 55 mm helyett 60 mm 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.

A kettétört ütőmunka próbatestek mindkét felét (a metallográfiai csiszolatnak szánt keresztmetszeti minták kimunkálása után) 3 mm vastagságú lapos próbatestté hengereltük le. A hengerlést meleg hengerművel 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.

Az erő – lehajlás görbékből származtattuk a hajlítófeszültség – alakváltozás görbéket a szabványban meglévő $\sigma_f = 3FL/2bh^2$ és $\varepsilon_f = 6sh/L^2$ 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.

Az így meghatározott határhajlító feszültség értékeket a 12. ábra, számszerűen pedig az 5. táblázat foglalja össze. A hárompontos hajlító vizsgálatok so-

rán mindegyik foszforvas próbatest (P) eltört, illetve néhány Sh-, PId8- és PIt8-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 szakítópróba-testeket munkáltunk ki. A szakítóvizsgálatokat az ISO 6892-1:2009(E) szabványnak megfelelően végeztük (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.

A fajlagos törési munkát az erő – elmozdulás görbékből számítottuk ki, a következő ismert összefüggés felhasználásával: $W_c = \phi_u (R_m + \sigma_u)/2$, ahol W_c a fajlagos törési munka (J/cm³), ϕ_u a töréshez tartozó logaritmikus alakváltozás (-) ($\phi_u = \ln(S_0/S_u)$, 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) ($\sigma_u = F_u/S_u$, 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.

2.4. Maratási kísérletek a díszítő kovácshégesztéssel 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 kovácshégesztés utáni felületkikészítésnél?

Háromféle, díszítő kovácshégesztéssel készült próbatesten végeztünk el maratási kísérleteket: foszforvas + lágyvas (PIt8), 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 felérdesítettük, 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 két-komponensű 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 tárgy távolság, stb.) között készüljenek. A képeket táblázatba rendezve foglalja össze a 13. ábra:

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 ütmunkája (170J) a modern S235 anyagminőségű acél próbatesteknek volt, míg a hasonló mikroszerkezetű és kémiai összetételű, de bucavásból készült jelű lágyvas próbatestek ütmunka értéke csak 70J volt. A P jelű foszforvas próbatestek ütmunkája nagyon kis értékű volt (2J), a foszforvas dinamikus szívóssága tehát praktikusan nullának tekinthető. Az Sh jelű nemesített acél próbatestek ütmunkája nagyobb volt, mint az Sn jelű normalizált acél próbatesteké (40J ill. 10J). A díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetén látható, hogy az ütmunka értékek az alapanyagok ütmunkáinak hozzávetőleges átlagai. Az is megállapítható, hogy az ütmunka nem függ a mintázattól, mind a PI_{t8}, PI_{d8} és a PI_{t16} 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 ütmunka. A legnagyobb ütmunka értékeket a PS_{nt8} illetve a PS_{ht8} jelű próbatestek mutatták (20J ill. 22J).

A hárompontos hajlítóvizsgálati 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 értéket 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 ütmunka nem függ a mintázattól, mind a PI_{t8}, PI_{d8} és a PI_{t16} jelű próbatestek esetében 600MPa körüli volt. Ehhez képest valamivel nagyobb (700MPa) értékeket kaptunk a PS_{nt8} jelű próbatesteknél, de a legnagyobb, a díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek esetében kiugróan magasnak tekinthető határhajlító feszültség értékeket (900MPa) a PS_{ht8} jelű próbatestek mutatták.

A szakítóvizsgálati eredmények (12.c. ábra) alapján az alapanyagokra vonatkozóan látható, hogy a legnagyobb fajlagos törési munkája (470 J/cm³) a modern S235 anyagminőségű acél próbatesteknek volt, amelytől alig marad el az Sh jelű nemesített acél próbatestek fajlagos törési munkája (450 J/cm³). A modern S235 anyagminőségű acél próbatestekhez képest a hasonló mikroszerkezetű és kémiai összetételű, de bucavásból készült jelű lágyvas próbatestek fajlagos törési munkája csak 100 J volt. A P jelű foszforvas próbatestek fajlagos törési munkája nagyon kis értékű volt (20 J/cm³), tehát a foszforvas statikus szívóssága is közel nullának tekinthető. Az Sn jelű normalizált acél próbatestek fajlagos törési munkája közepes értékű (300 J/cm³) 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 PI_{t8}, PI_{d8} és a PI_{t16} jelű próbatestek esetében 50-100 J/cm³ közötti volt. Ehhez képest valamivel nagyobb (150 J/cm³) értékeket kaptunk a PS_{nt8} jelű próbatesteknél, de a legnagyobb, fajlagos

törési munka értékeket (közel 200 J/cm³) 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 törekeny), 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.⁴⁰ 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.⁴¹ A díszítő kovácshegesztés mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával korábban foglalkozó, modern acélokkal dolgozó korábbi kutatások⁴² 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 tulajdonsá-

gaik és felhasználási tulajdonságaik alapján ragsorba állíthassuk az eredmények további kiértékelése szükséges. Erre a minőségbiztosításban használatos több szempontú 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 maradó 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 kritériumokhoz értékeket 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 értelem-szerűen a modern S235 acélt kihagytuk, továbbá a tiszta foszforvasat sem vettük számításba, mert abból önmagában használva nem készítettek vastárgyakat. A normalizált kritériummátrixot a kritériummátrix normalizálásával kapjuk (ld. 5. táblázat).

5. táblázat: A kritériummátrix és a normalizált kritériummátrix

Table 5: Criteria matrix and normalised criteria matrix

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
PIt8	8.6	634.0	54.0	0.12	0.65	0.12
PId8	8.5	641.2	93.6	0.12	0.66	0.21
PIt16	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

⁴⁰TYLECOTE - GILMOUR 1986, 251

⁴¹vö. TYLECOTE - GILMOUR 1986, 253-254

⁴²ld. PELSMAEKER 2010, LANG 2011, POLÁK 2008

Az egyes kritériumok fontosságának meghatározása érdekében a súlyozó szorzókat az AHP-módszerrel⁴³, 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

Table 6: Pairwise comparison matrix for 6th to 8th century sword blades

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

Table 7: Pairwise comparison matrix for 9th and 10th century sword blades

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

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

Table 8: Ranking of materials useable for 6th to 8th century swords

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)	Szorzatösszeg	Sorrend (az 1. a legjobb)
Súlyszám	0.54	0.30	0.16		
I	0.54	0.16	0.05	0.75	1
Sn	0.08	0.21	0.11	0.39	4
Sh	0.29	0.30	0.16	0.75	1
PIt8	0.06	0.19	0.02	0.28	7
PIId8	0.06	0.20	0.03	0.29	6
PIt16	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

A kritériumok súlyszámait két esetre, 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.⁴⁴ 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.

⁴³ ANALYTIC HIERARHY PROCESS, SAATY 1980

⁴⁴ Ezt jól dokumentálja ŽÁKOVSKÝ et al. [megjelenés alatt 1]; [megjelenés alatt 2]

9. táblázat: 9-10. századi kardokhoz használható anyagok rangsora
Table 9: Ranking of materials useable for 9th to 10th century swords

Kritérium	DIT (KV)	HIG ($R_{pf}^{0.001}$)	HIT (W_c)	Szorzatösszeg	Sorrend (az 1. a legjobb)
Súlyszám	0.43	0.43	0.14		
I	0.43	0.23	0.04	0.70	2
Sn	0.06	0.30	0.09	0.46	5
Sh	0.23	0.43	0.14	0.80	1
PIt8	0.05	0.28	0.02	0.35	7
PId8	0.05	0.28	0.03	0.36	6
PIt16	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 lágyvas (I) volt (még annak ellenére is, hogy a lágyvas 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 harmadik 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, és 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 foglaltunk 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 egyes 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.

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
Table 10: Parameter values of A and B for the individual photos

		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	B										13.3	17.7	11.2	14.3	19.0	14.8	11.3	13.8	20.1
20°	A							-38	-9.1	-22.9	1.9	13	21.3				27	14.3	41.1
60s	B							18.2	25.8	13.7	19.6	17.4	22.5				24.6	17.1	25.9
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
10s	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°	A							-12.1	0.7	45.9	-28.2	31.3	1.3				4	-31.1	-33.1
60s	B							27.2	24.5	32.7	22.4	26.4	14.3				24.9	22.4	19.2
20%	A										38.6	20.5	11.5	9.9	6.2	-48.9	-31	17.1	-28.4
10s	B										23.7	20.9	24.7	12.5	13.7	17.3	18.7	25.8	11.3
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
60s	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%	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
10s	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
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
60s	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
70°	B																		

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 marószert 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 foszforvas 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 borkósavat, 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. Mindemellett a korabeli karpengék számára legmegfelelőbb, MCA-módszerrel meghatározott

anyaggrangsorban 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 elsősorban 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 gypvasérc minták XRD elemzéséért, illetve a Somogy Természetvédelmi Szervezet és Zöld Folyosó Közalapítványnak (Somogy TVSZ) az Őskohász Táborok lebonyolításában nyújtott segítségével. Szeretnénk megköszönni továbbá a 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.

IRODALOM

- ANSTEE – BIEK 1961 = ANSTEE, J. W. – BIEK, L.: A Study in Pattern-Welding, *Medieval Archaeology* 5, 71–93.
- ANTEINS 1973 = ANTEINS, A.: *Damasskaāstal' w stranahbassejna Baltijskogo Morā*, Riga. Izdatel'stvo Zinatne.
- BÖHNE – DANNHEIMER 1961 = BÖHNE, C. – DANNHEIMER, H.: Studien an Wurbmbuntklingen des frühen Mittelalters. *Bayerische Vorgeschichtsblätter* 26, 1961. 107–122.
- BUCHWALD 2005 = BUCHWALD, V.F.: Iron and steel in ancient times. *Historisk-filosofiske Skrifter* 29, København: Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.
- DATTA 2005 = DATTA, N. C.: *The Story of Chemistry*. Universities Press. India, pp 40.
- EDGE – WILLIAMS 2003 = EDGE, D. – WILLIAMS, A.: Some Early Medieval Swords in the Wallace Collection and Elsewhere. *Gladius* 23. 191–210.
- FEHÉR 2000 = FEHÉR B.: Források a korai iszlám kardművesség történetéhez. *Pázmány Péter Katolikus Egyetem BTK, Piliscsaba* 21, 44.
- GILMOUR 2007 = GILMOUR, B.: 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, 250–261.
- GÖMÖRI 2002 = GÖMÖRI J.: Az avar és Árpád-kori vaskohászat emlékei Pannóniában, *Sopron*. 31–32.
- HALMÁNYI – RIEDEL 1986 = HALMÁNYI SZ. – RIEDEL L.: Régi fegyverekről. Budapest 88.
- HOYLAND – GILMOUR 2006 = HOYLAND, R. G. – GILMOUR, B.: Medieval Islamic Swords and Swordmaking: Kindi's Treatise on Swords and Their Kinds.
- HOŠEK et al. 2011 = HOŠEK, J. – BERAN, V. – KOMORÓCZY, B.: The metallography of two Roman swords from Mušov, Czech Republic. In: Hauptmann, A.–Moderressi-Tehrani, D. – Prange, M. (eds.): *Archaeometallurgy in Europe III–Abstracts*, Bochum: Deutsches Bergbau-Museum Bochum. 100.
- International Standard ISO 148-2:2008(E).
- International Standard ISO 7838:2005(E).
- International Standard ISO 6892-1:2009(E).
- JONES 1997 = JONES, L. A.: The Serpent in the Sword: Pattern-Welding in Early Medieval Swords, „Park Lane Arms Fair Catalogue” 4, 7–11, online verzió [megtekintve 2013.06.07]:

- JONES 2002 = JONES, L. A.: Blade Construction and Pattern-Welding. In: I. Peirce: Swords of the Viking Age. Woodbridge: The Boydell Press. 145–151.
- KARPENKO – NORRIS 2002 = KARPENKO, V. – NORRIS, J. A.: Vitriol in the History of Chemistry, Chem. Listy 96, 997–998, 1002.
- KERCSMÁR – THIELE = KERCSMÁR ZS. – THIELE Á.: A somogyi gyevasérc telepek genetikája és geokémiai jellemzői, földtani és archeometallurgiai megközelítés alapján. Földtani Közöny (megjelenés alatt).
- KÖLTŐ 1999 = KÖLTŐ L.: Korai vaskohászati lelőhelyek kutatása. Múzeumi tájékoztató. Somogy Megyei Múzeumok Igazgatósága 1999/3-4, 18–21.
- LANG – AGER 1989 = LANG, J. – AGER, B.: Swords of the Anglo-Saxon and Viking Periods in the British Museum: A Radiographic Study. In: Chadwick Hawkes, S. (ed.): Weapons and Warfare in Anglo-Saxon England, Oxford University Committee for Archaeology Monograph 21, Oxford: Oxford University Committee for Archaeology, 85–122.
- LANG 2011 = LANG, J.: The Celtic Sword: a source of practical inspiration. In: Hošek, J.–Cleere, H.–Mihok, L. (eds.): The Archaeometallurgy of Iron. Recent Developments in Archaeological and Scientific Research, Prague: Institute of Archaeology ASCR, Prague, v.v.i., 263–272
- MÄDER 2001 = MÄDER, S.: Stähle, Steine und Schlangen. Zur kunst-, kultur- und technikgeschichtlichen Einordnung dreier Schwertklingen aus dem alamannischen Siedlungsraum, TS of PhD Thesis, IA HU, Berlin.
- MAGNUSSON – PALSSON 1969 = MAGNUSSON, M. – PALSSON, H.: The Laxdæla Saga. Penguin Classics Book 218. chapter 30. 272.
- MARYON 1960 = MARYON, H.: Pattern-welding and Damascening of Sword-blades – Part I. Pattern-Welding. Studies in Conservation 5/1, 25–37.
- NEWMAN W. 1991 = NEWMAN, W. R.: The Summa Perfectionis of Pseudo-Geber, Brill, Leiden, 73–74, 106.
- PELSMAEKER 2010 = PELSMAEKER, S. B. M.: 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 1993 = PLEINER, R.: The Celtic Sword. Oxford: Clarendon Press.
- POLÁK 2008 = POLÁK, M.: Damascenská ocel–středověký kompozit z pohledu současnosti. Jemná mechanika a optika 9, 253–254.
- SAATY 1980 = SAATY, T. L.: The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw Hill International.
- STILLMAN 1960 = STILLMAN, J. M.: The Story of Alchemy and Early Chemistry. Dover Publ. New York, 185
- TEOPHILUS 1986 = TEOPHILUS PRESBYTER: 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, 51–52, 56, 159.
- THÅLIN–BERGMAN 1979 = THÅLIN–BERGMAN, L.: Blacksmithing in Prehistoric Sweden. In: Calissendorff, K.–Holmqvist, W.–Hjennstrand, Å.–Serling, I.–Thålin-Bergman, L.: Iron and Man in Prehistoric Sweden, Stockholm: LTs förlag, 99–133.
- THIELE 2010 = THIELE Á. : A kora középkori vaselőállítás technológiája a X. századi fajszi-típusú bucakemencében elvégzett próbakohósítások tükrében, In: Petkes Zs. (Ed.) Népvándorlásokor Fiala Kutatóinak XX. Összejövetelének konferenciakötete Budapest–Szigethalom, 2010. október 28–30., Budapest, Magyarország, 2010.10.28–2010.10.30., 395–408.
- THIELE – BÁN 2010 = THIELE Á. – BÁN K.: A bucavaskohászat kora középkori technológiája a megvalósíthatóság tükrében. Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat, 143:(2), 7–12.
- THIELE – DÉVÉNYI 2011 = THIELE Á. – DÉVÉNYI L.: 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, 364–367.
- THIELE 2011 = THIELE Á.: Az ércről a vastárgyig: a bucavaskohászat metallurgiája. Bányászati és Kohászati Lapok–Kohászat, 144:(1), 2–5.

- THIELE 2012 = THIELE, Á.: Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom. *Periodica Polytechnica–Mech. Eng.* 54:(2), 99-104.
- THIELE et al. 2013 = 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 – THIELE = TÖRÖK, B. – THIELE, Á.: Smelting bog iron ores under laboratorial conditions - the role of phosphorus in the archaeometallurgy of iron in Somogy county.— *OP Conference Series: Materials Science and Engineering.* (megjelenés alatt)
- TYLECOTE – GILMOUR 1986 = TYLECOTE, R. F. – GILMOUR, B. J. J.: *The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons*, BAR British Series 155, Oxford: B.A.R., 146–262, 251–252.
- VEGA et al. 2003 = VEGA, E. – DILLMANN, P. – LHERITIER, M. – FLUZIN, P. – CREW, P. – BENOIT, P.: Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach. In: *Archaeometallurgy in Europe*, vol. II, Milan, 337-346.
- WEISS 2004 = WEISS, A. M.: *Food in Medieval Times*. Greenwood Press, London, 28.
- WILLIAMS 2012 = WILLIAMS, A.: *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 1977 = WILLIAMS, A.: *Methods of Manufacture of Swords in Medieval Europe Illustrated by the Metallography of some Examples*, *Gladius* 13, 75–101.
- ŽÁKOVSKÝ et al. = ŽÁKOVSKÝ, P. – HOŠEK, J. – BÁRTA, P.: Dussacks with broad blades and the probable method of their manufacturing. In: Marek, L. (ed.), *Weapons Bring Peace? Warfare in Medieval and Early Modern Europe*. *Acta Universitatis Wratislaviensis: Studia archeologiczne*, Wrocław (megjelenés alatt 1).
- ŽÁKOVSKÝ et al. = ŽÁKOVSKÝ, P. – HOŠEK, J. – SEDLÁČKOVÁ, L.: *Meče 11.–13. století z území Moravy*. *Archaeologia historica* 38. (megjelenés alatt 2).

The role of pattern welding (damasking) in early medieval sword blades

Pattern welding has been undergoing a new renaissance for the recent decades. Drifting away from historical authenticity, this method is mostly used for making knives and swords today. The process itself is publicly known as “damasking”, and the blades made using this method, are called “damasked”, “Damascus steel”, “damask” or “damast” in Hungary.

The technology of pattern welding developed from the making of layered composites that began in the Celtic times. In this process, soft iron and steel plates were brought in firmly bonded connection by forge-welding. However, when making sword and knife blades by forge-welding between the 2nd and the 10th centuries, the combination of phosphoric iron + soft iron or phosphoric iron + steel was used. Today, it is a widespread opinion in the public and among experts in archaeometallurgy that these sword blades made by forge-welding, apart from

their pleasing appearance, had excellent mechanical characteristics as well. The purpose of our research presented in this paper was to give an answer to the question: Did pattern welding used in making early middle age sword blades play a role in improving mechanical parameters or only in creating a beautiful surface pattern?

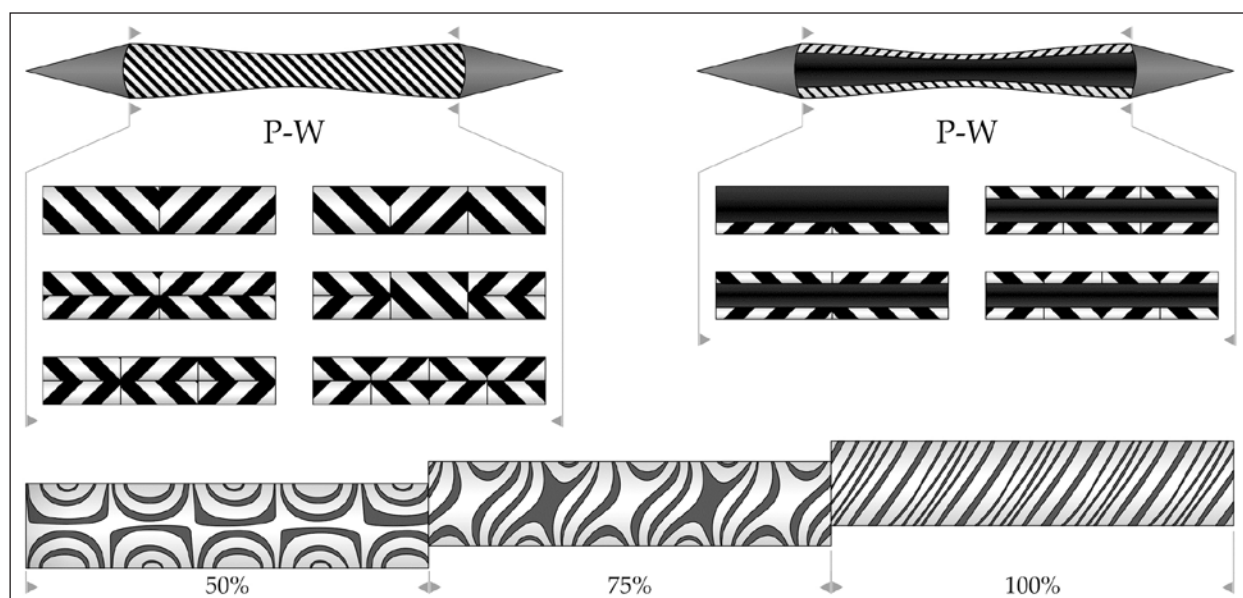
We prepared raw iron clumps consisting of soft iron, steel and phosphoric iron material, and forged samples by pattern welding using various combinations of them. To clarify the role of pattern welding in the improvement of mechanical properties, we performed mechanical tests (Charpy impact test, three-point flexural test and tensile test). In this manner we could determine the material characteristics that may be in connection with the resistance of sword blades to stress in the course of fight. To clarify the decorative role of pattern welding, we carried out

etching tests on polished metallographic specimen surfaces taken from the samples using six different acids that were available in the Middle Ages using two different concentrations, temperatures and etching times.

The results of mechanical tests were evaluated with the MCA method (Multi-Criteria Analysis) known in quality assurance, and, in the course of the etching experiments, we took photographs of the etched surfaces which were evaluated by image processing software.

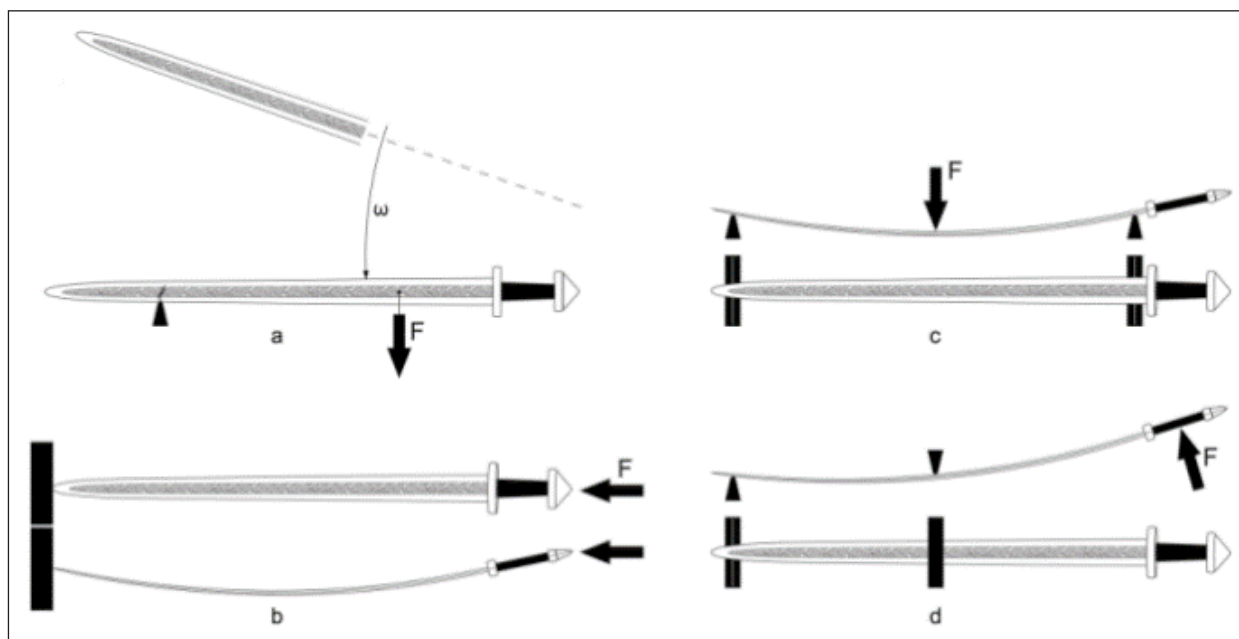
Based on the results of the mechanical tests, we established that although the strength of phos-

phoric iron is high, similarly to tempered steels, its toughness remains well below that of tempered steels (it is rigid and brittle), and the poor mechanical properties are also shown by the layered composites. Further, based on the MCA method, it was also found that either a pure soft iron or a pure steel sword blade was a better choice against the stresses than the best of the material combinations made by pattern welding that is phosphoric iron + tempered steel. Nevertheless, this coupling resulted in the most beautiful pattern after etching by 20% hydrochloric acid at 70°C for 10 seconds.



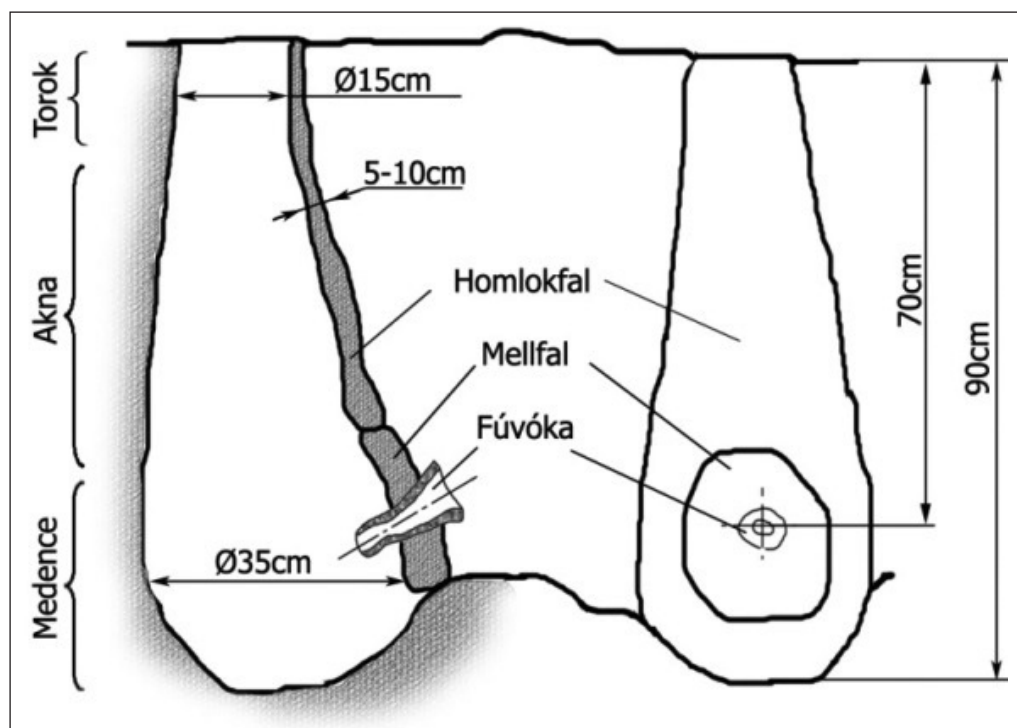
1. ábra Kardpengék, amelyek több díszítő kovácshegesztéssel készült rúd vagy szalag és az élek kovácshegesztésével készültek. A központi mag készülhetett teljes szelvényében (felül baloldalon) díszítő kovácshegesztéssel vagy egy magra rákovácsolt díszítő kovácshegesztéssel készült szalagokból (felül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

Figure 1. Sword blades made by forge-welding several pattern-welded rods or ribbons and the edges. The central core could be made by pattern welding in its entire section (top left) or by ribbons made by pattern welding and forged onto a core (top left). Pattern shaped by twisting and removal of material (bottom). All figures were made by the authors.



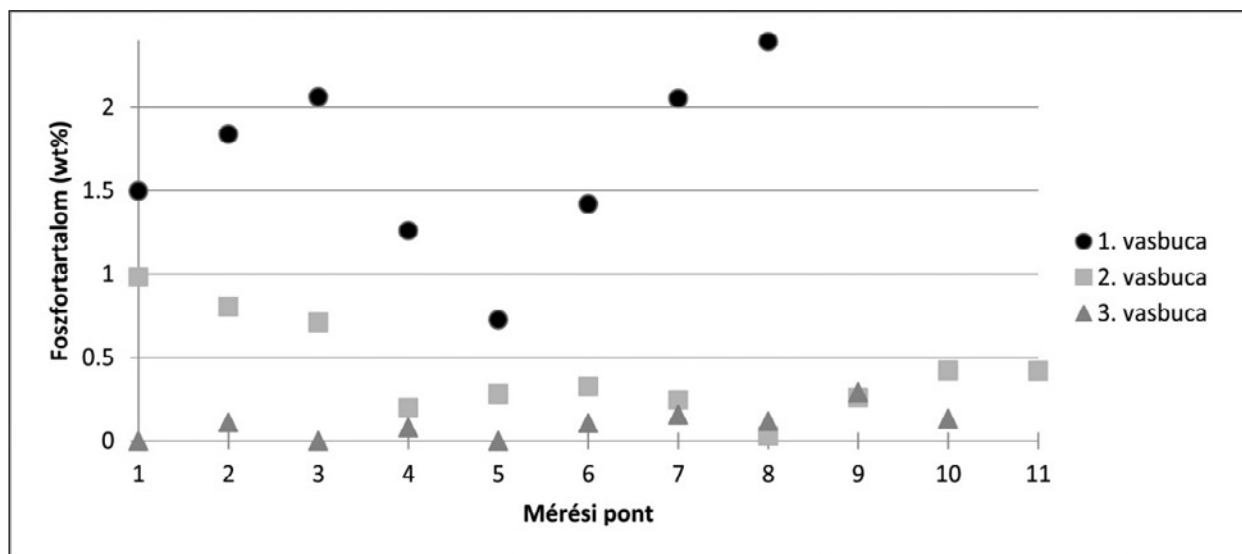
2. ábra A kardpengék harc közben fellépő igénybevételei. a) ütésszerű hajlító igénybevétel, b) nyomó igénybevételek következtében kihajlás, c), d) hajlító igénybevétel

Figure 2. Stresses affecting sword blades while fighting. a) impact-like flexural stress, b) buckling under compressive stress, c), d) bending stress

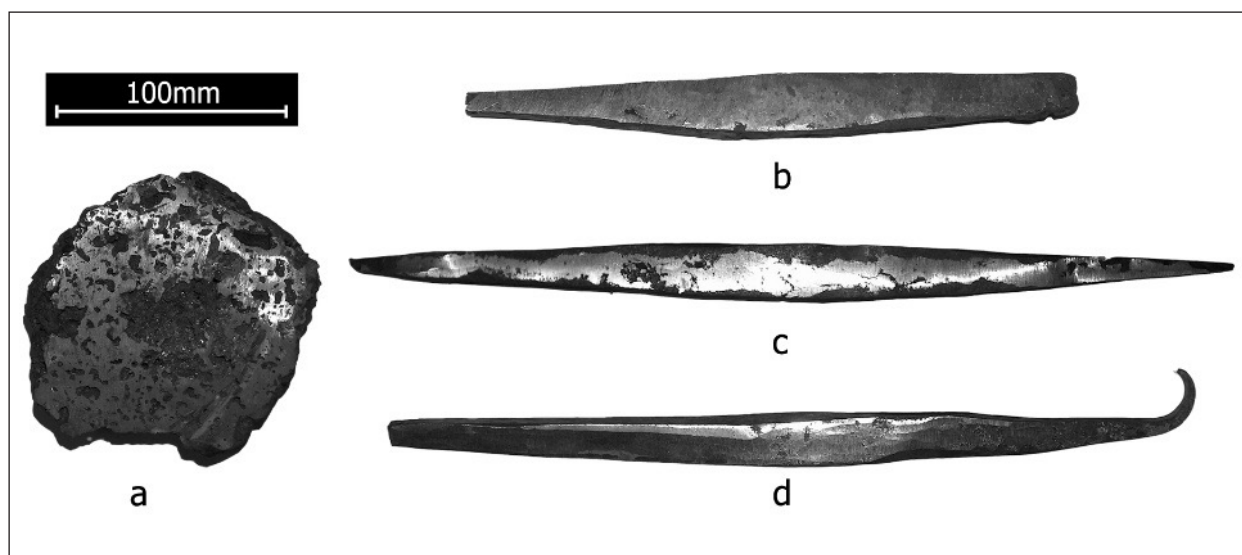


3. ábra A rekonstruált bucakemence felépítése és geometriai kialakítása

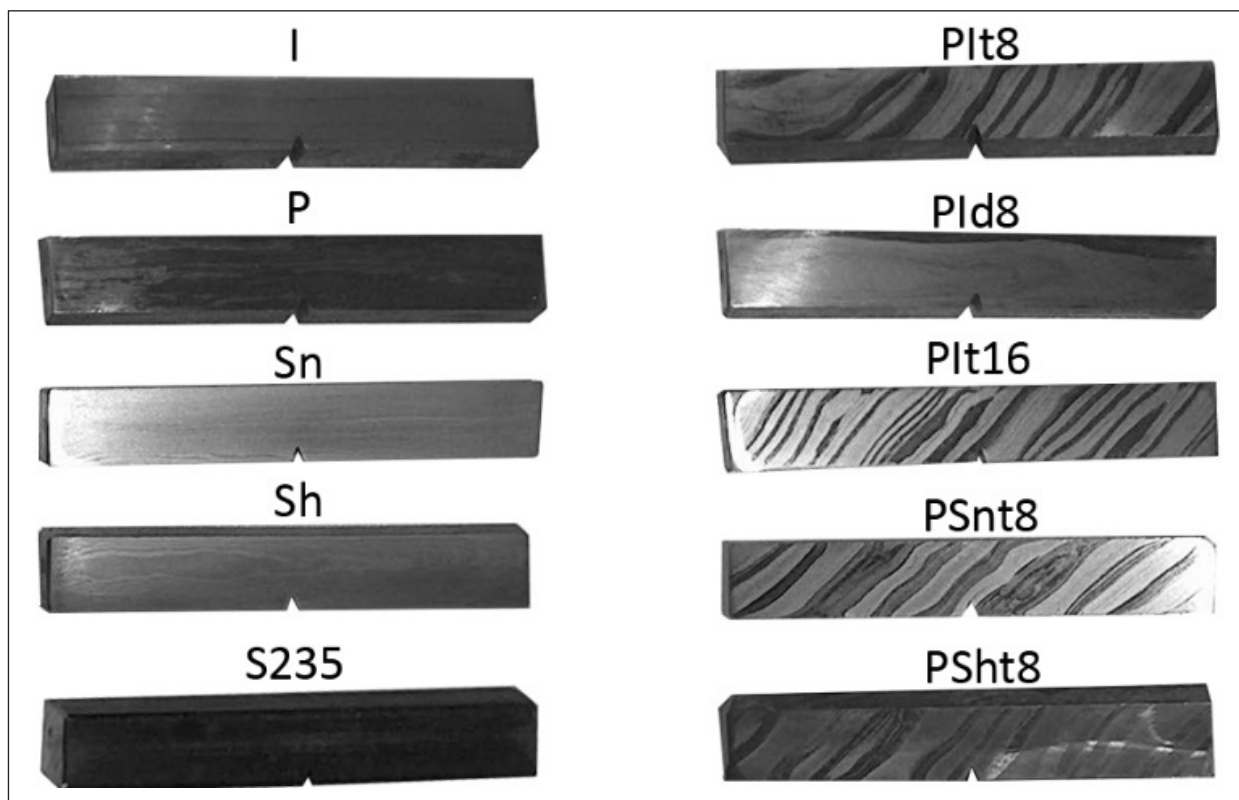
Figure 3. Design and geometry of the reconstructed bloomery for making raw iron clumps



4. ábra A próbakohósítások során kapott vasbucák foszfortartalma
 Figure 4. Phosphorus content of raw iron clumps gained in test smelts

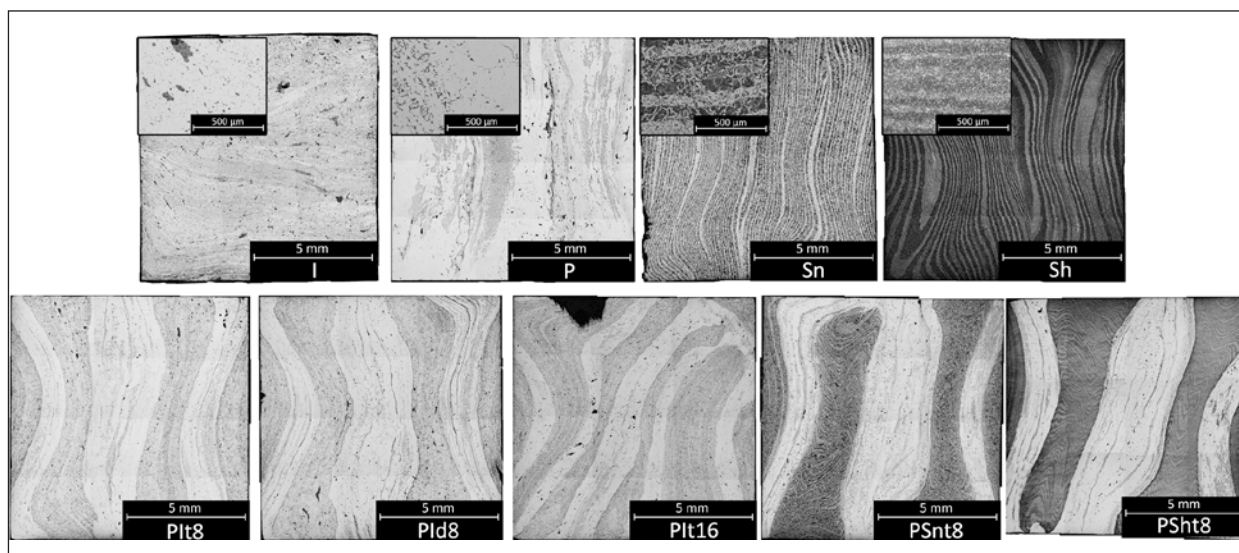


5. ábra A próbakohósítások során kapott vasbucák és vasrudak. a) az 1. kohósítással kapott nagy foszfortartalmú vasbuca, b) a 2. kohósítással kapott foszforvasrúd, c) a 3. kohósítással kapott lágyvasrúd, d) a lágyvas újrakohósításával kapott acélrúd
 Figure 5. Raw iron clumps and iron rods gained from test smelts. a) high-phosphorus raw iron clumps gained from the first smelt; b) phosphoric iron rod gained from the second smelt; c) soft iron rod gained from the third smelt; d) steel rod gained from re-smelting the soft iron

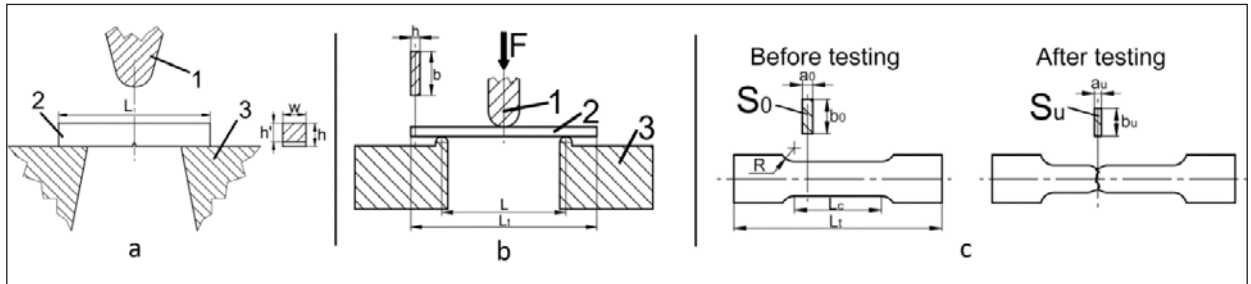


6. ábra Bucavásból kovácsolt Charpy próbatestek (reprezentáns darab egy-egy próbatest típusból).
A felület polírozva és 2%-os nitállal maratva

Figure 6. Charpy sample forged from raw iron clumps (representative pieces from the individual sample types). The surface is polished and etched with 2% nital



7. ábra Az alapanyagokból és a díszítő kovácshegesztéssel készült próbatestek metallográfiai csiszolata
Figure 7. Metallographic polished surface of the raw material and of the samples made by pattern welding



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

a) Charpy-féle ütvehajlító 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) Hárompontos 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.

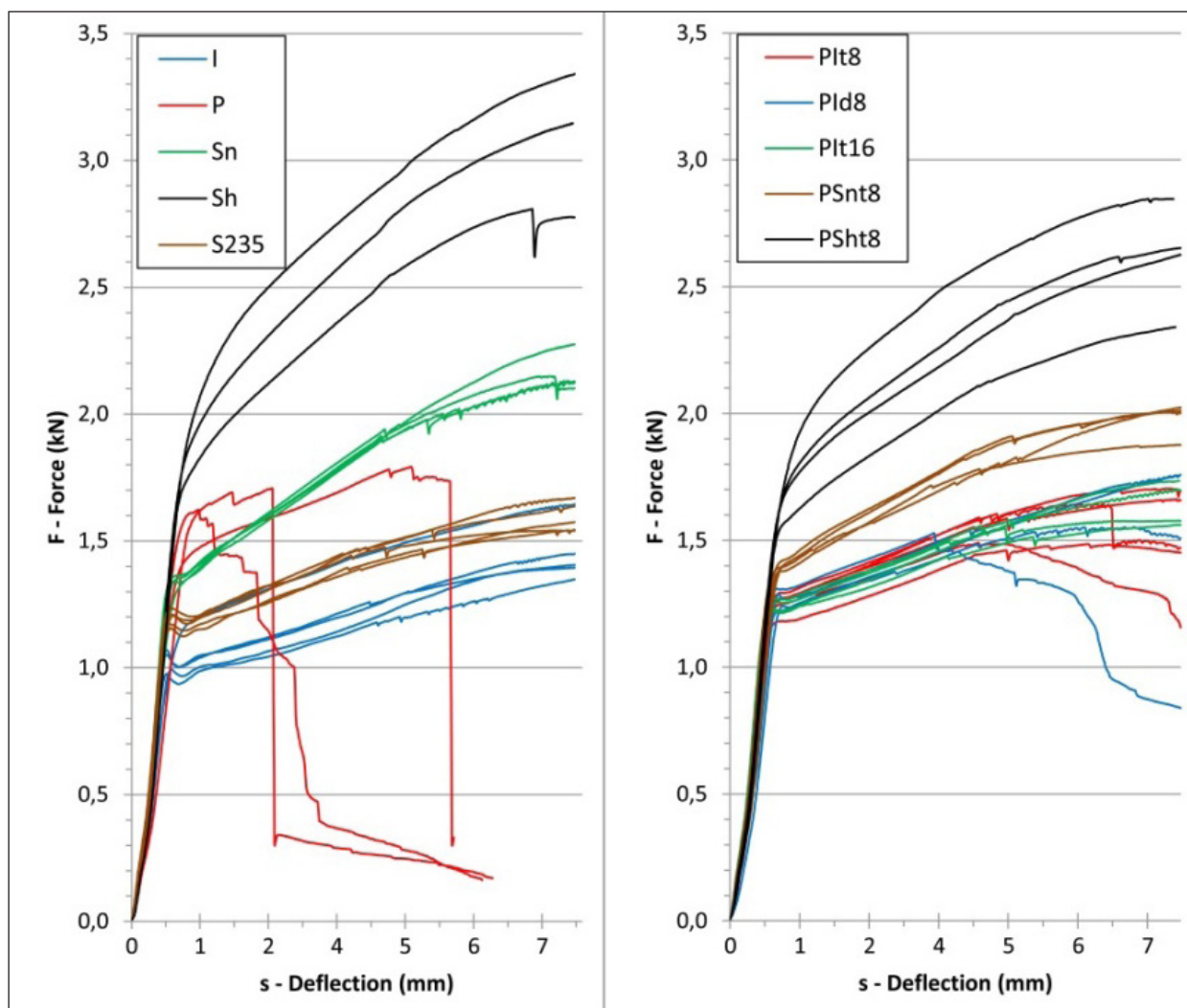
c) Szakítóvizsgálat; L_t – próbatest teljes hossza $L_t=60\text{mm}$, L_c – a párhuzamos szakasz hossza $L_c=28\text{mm}$, R – leke-rekítési sugár $R=4\text{mm}$, a_0 – próbatest kezdeti vastagsága $a_0=3\text{mm}$, b_0 – a próbatest kezdeti szélessége $b_0=10\text{mm}$, S_0 – a párhuzamos szakasz kezdeti 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.

Figure 8. Sketch of the measuring setup for the mechanical tests and sample sizes

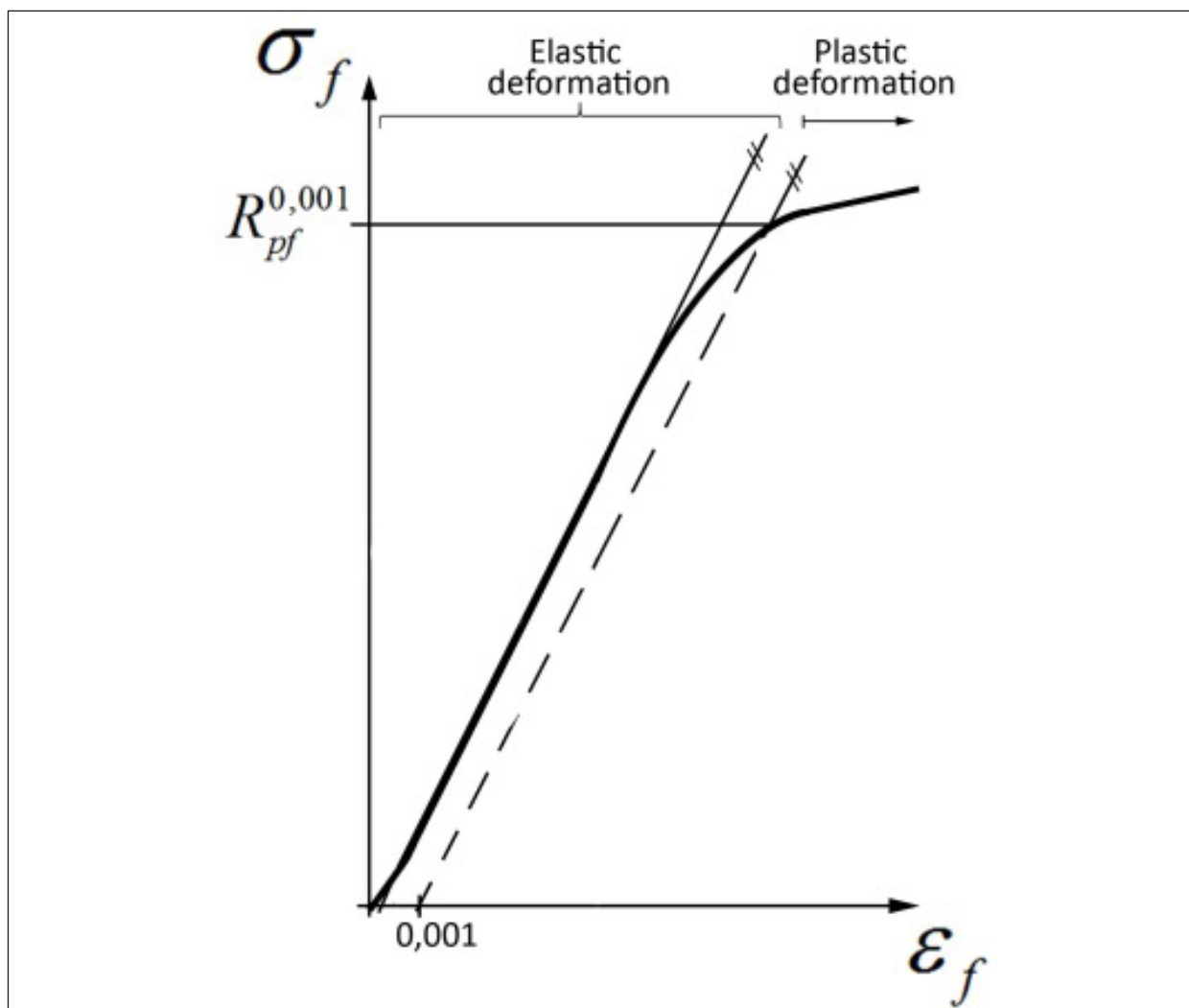
a) Charpy impact bending test; 1 – hammer, 2 – sample, 3 – anvil, L – Length $L=65\text{mm}$, h – height $h=10\text{mm}$, w – width $w=10\text{mm}$, h' – height above notch $h'=8\text{mm}$.

b) Three-point flexural test; 1 – cross-head, 2 – sample, 3 – support, L – support distance $L=40\text{mm}$, L_t – full length of sample $L_t=60\text{mm}$, b – width of sample $b=14\text{mm}$, h – thickness of sample $h=3\text{mm}$, the velocity of the cross-head was 20mm/minute .

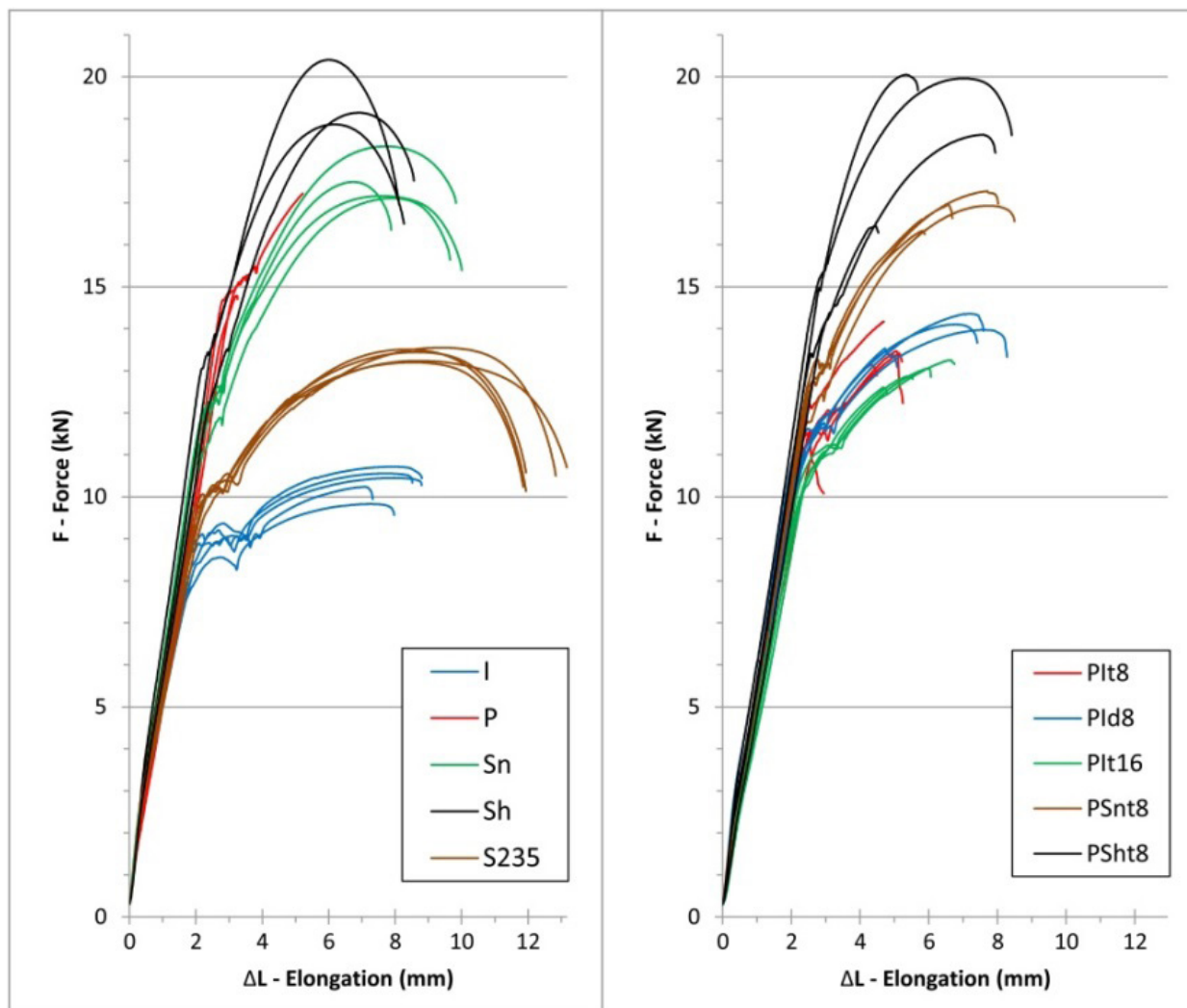
c) Tensile testing; L_t – full length of sample $L_t=60\text{mm}$, L_c – length of parallel segment $L_c=28\text{mm}$, R – radius of curvature $R=4\text{mm}$, a_0 – starting thickness of sample $a_0=3\text{mm}$, b_0 – starting width of sample $b_0=10\text{mm}$, S_0 – starting area of parallel segment, a_u – thickness of sample after rupture, b_u – width of sample after rupture, S_u – area of parallel segment after rupture, the velocity of the cross-head was 20mm/minute .



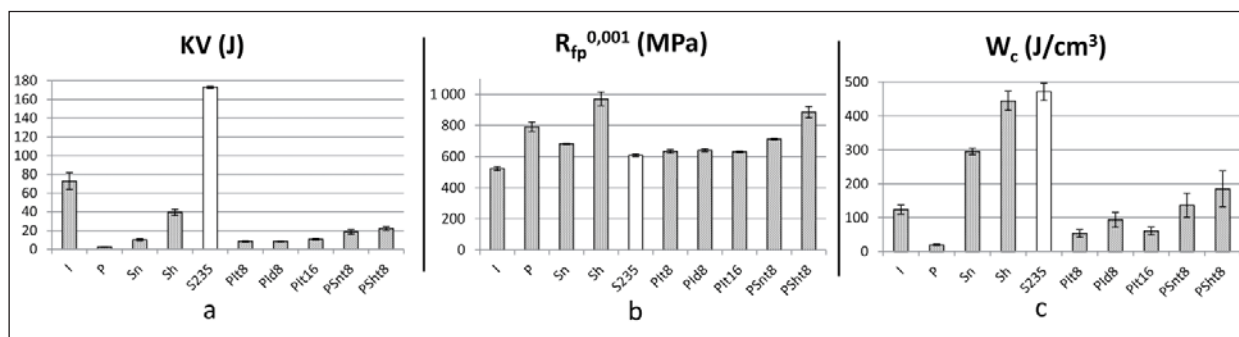
9. ábra A hárompontos hajlítóvizsgálat során regisztrált erő-lehajlás görbék
 Figure 9. Strength-deflection curves registered during three-point flexural test



10. ábra A határhajlító feszültség definiálása
 Figure 10. Definition of limit bending stress



11. ábra A szakítóvizsgálat során regisztrált erő-elmozdulás görbék
 Figure 11. Strength-displacement curves registered during tensile test



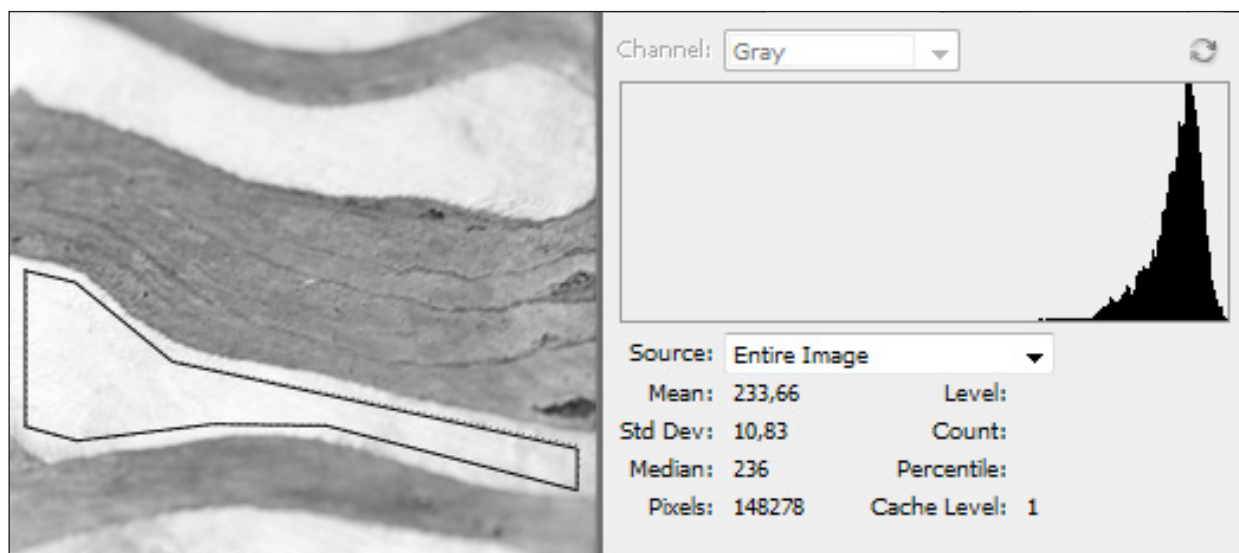
12. ábra Az ütőmunka, határhajlító feszültség és a fajlagos törési munka átlagos értékei az egyes próbatest típusokra a szórások feltüntetésével

Figure 12. Average values of impact energy, limit bending stress and specific fracture energy for the individual sample types with the indication of standard deviation

	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)

Figure 13. Macro-photographs of the samples during etching experiments (the best defined, most contrasting patterns are framed)



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

Figure 14. Brightness of the pixels of the evaluated area (the polygonal area in the picture) within a layer (histogram)

