

RÓMAI KOCSI VASALKATRÉSZEINEK ARCHEOMETRIAI VIZSGÁLATA

ARCHAOMETRICAL ANALYSES OF IRON PARTS OF A ROMAN-AGE CARRIAGE

THIELE ÁDÁM¹, LENGYEL BOGLÁRKA², MRÁV ZSOLT³

¹BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, E-mail: adam.thiele@hotmail.com

²Magyar Képzőművészeti Egyetem, Restaurátor szak

³Magyar Nemzeti Múzeum, Régészeti Tár, E-mail: mrav.zsolt@hnm.hu

Abstract

Recently, Roman wagon graves have been excavated in Budaörs (Country Pest, Hungary). Archaeometrical analyses (metallographic, micro-hardness measurement, microanalysis by SEM-EDX) were carried out in case of five iron-part artifacts of a Roman carriage. All of the examined iron parts had different kinds of strain (abrasion, bending, etc. stress). On the basis of the results, we tried to answer the question: Did the ancient blacksmiths use sufficient iron material and processing technology against the mechanical strain? We can state that with some exceptions, regarding most of the iron parts the ancient materials and technologies were suitable against the mechanical strain in the light of modern engineering as well.

Kivonat

A közelmúltban római kori kocsisírokat tártak fel Budaörsön. Az egyik sírból előkerült római kocsi lelet öt különböző igénybevételelű (koptató-, hajlító-, stb. igénybevételelű) vasalkatrészének archeometriai vizsgálatát (metallográfiai, mikro-keményiségmérés és elektronsugaras mikroanalízis) végeztük el. A célunk az volt, hogy az anyagvizsgálatok eredményei alapján következtetéseket vonhassunk le a kérdést illetően: Vajon a kocsit készítő korabeli kovácsmesterek megfelelő vasanyagokat és gyártástechnológiát választottak-e az ismert igénybevételelű alkatrészek elkészítése során? Megállapítottuk, hogy néhány kivételtől eltekintve a vizsgált alkatrészek többségénél az anyagválasztás és a gyártástechnológia tekintetében mai mérnöki szemmel tekintve is helyesen jártak el a régi mesterek.

KEYWORDS: ARCHAOMETRICAL ANALYSES, METALLOGRAPHIC ANALYSES, ROMAN AGE CARRIAGE, ANCIENT TECHNOLOGIES

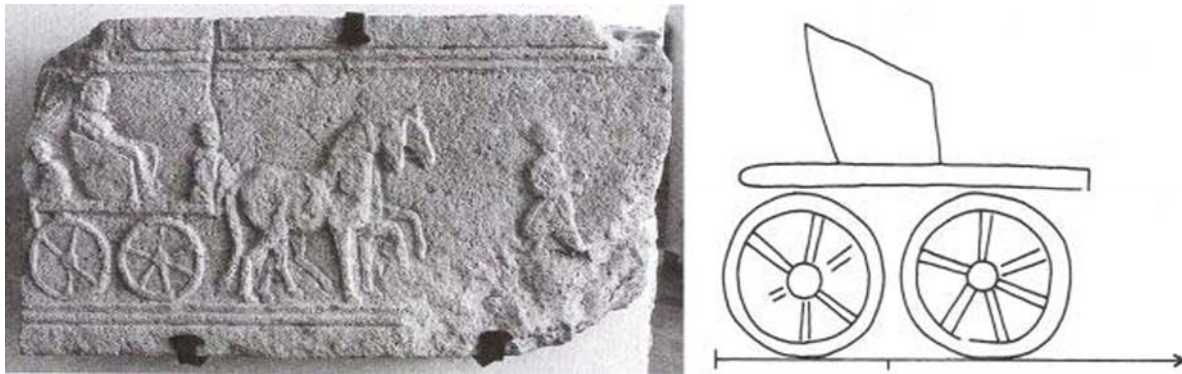
KULCSSZAVAK: ARCHEOMETRIAI VIZSGÁLATOK, METALLOGRÁFIAI VIZSGÁLATOK, RÓMAI KOCSI, ÓKORI GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK

Bevezetés

A technikatörténet egyik ókori csúcsteljesítménye, a korabeli szárazföldi közlekedés és teherszállítás nélkülözhetetlen kelléke, a fogatos kocsi volt.

Az etruszk és kelta hagyományokra épülő római kocsik gyártása és a kifejlesztett szerkezeti megoldásaik a római császárkorra olyan magas technikai színvonalat értek el, hogy azt csak a késő középkorban sikerült újra megközelíteni (Mráv 2005a). Annak ellenére, hogy a pannoniai és thrákiai „kocsisírokból” több száz, gyakran teljes kocsilelet került elő, és az ismert kocsi alkatrészek száma tízezres nagyságrendű, nagyon keveset tudunk a császárkori bognár- és az ehhez szorosan kapcsolódó kocsikovács-iparról. Az írott források szűkszavú megjegyzésein, és egyes alkatrészek görög terminológiáján (ld. Pollux, Onomasticon) kívül csak néhány elrejtett, mintadarabokat és bognár-illetve kovácsszerszámokat tartalmazó depóleltre (például: Mannersdorf, 1. depó: Pollak

2006; Immendorf: Garbsch 1986, 54) és feltárt, inkább javítással, mint gyártással foglalkozó műhelyre támaszkodhatunk (ilyen került elő például Ambrussumban: Fiches 1996). Ezért fontos, hogy az antik kocsikovács-ipar kutatásába egy új forráscsoportot, a kocsivasalások archeometriai vizsgálatát sikerült bevonnunk, amelynek segítségével a kocsik gyártásánál felhasznált vasanyagok minőségéről és az alkatrészek gyártástechnikájáról vonhatunk le következtetéseket. Általános megállapításokat azonban még nem tehetünk, mivel a kocsialkatrészek természettudományos vizsgálata a kezdeténél tart és így kevés összehasonlító anyagvizsgálat áll rendelkezésünkre (például: Kastowsky & Mehofer 2006). A manchingi vasleletek archeometriai vizsgálatából azonban azt már tudjuk, hogy a római-korban használt kovácstechnikákat (Mutz 1976) a késővaskori kelták is ismerték és alkalmazták (Schwab é. n.).



1. ábra: Rögzített szekrényű, üléssel ellátott utazókocsi ábrázolása sírkövön

Fig. 1.: Roman period carriage with fixed cart-body represented on a funerary relief

A vizsgált minták régészeti háttere

Ottományi Katalin és Mráv Zsolt 2002-ben négy bolygatatlan kocsisírt tárt fel a Budaörs, Kamaraerdei dűlőben fekvő római település temetőjében (Mráv 2005b; Mráv 2006). Ezek a kocsit és leölt ígás lovakat tartalmazó gödrök azoknak a gazdag kocsis temetkezéseknek a sorába illeszkednek, amelyekből ma már közel harmincat ismerünk, elsősorban az Északkelet-Pannoniában lakó kelta eraviscusok törzsi területéről (Mráv 2009). A kocsik és felszerszámozott ígás- és hátsólovak szepulchrális célból való eltemetése (feláldozása) a törzs elitjének Kr. u. 2. században és 3. század elején ápolt arisztokratikus temetkezési szokása volt, amelynek gondolati hátterét a halott túlvilágra történő utazása adta. A sírok legjellemzőbb és legdrágább mellékletei a túlvilági utazás kellékei, a fogatos kocsik voltak, amelyek nemcsak az eraviscusok túlvilághitéről, hanem a császárkori utazókocsik típusairól, szerkezetéről és felépítéséről is rengeteg információt hordoznak. Ezek a kocsik ugyanis nem a temetkezés alkalmára készült halotti kocsik voltak, hanem olyanok, amelyeket a családok mindennapi utazásaik során is használtak.

Tanulmányunk tárgyát a budaörsi temető 125-ös számú kocsisírijában feltárt négykerekű utazókocsi adja, amelyet két felszerszámozott és járomba fogott ígáslóval együtt temettek el. A kocsi a rögzített szekrényű, üléssel ellátott utazókocsi típusába tartozik, amelyeket gyakran ábrázoltak az eraviscusok síremlékein is (ld. **1. ábra**, Visy 1997).

Kinézetüket és díszítésüket tekintve ugyanilyen kocsik kerültek elő a budaörsi temető 124-es és 162-es sírjából, valamint a kálózi kocsis temetkezésből (Marosi 1935, 213-216). Ezek nemcsak azonos időszakban, a Kr. u. 2. század első harmadában készültek, hanem azonos sorozatot alkotnak, amelyek valószínűleg egyetlen, nagy produktivitású pannoni műhelyben készültek (Mráv 2009). A budaörsi 125-ös sír kocsiából 212 fémlelet került elő, amelyből 127 a vasalkatrészek száma, a többi a kocsi díszítéséhez vagy a járomhoz

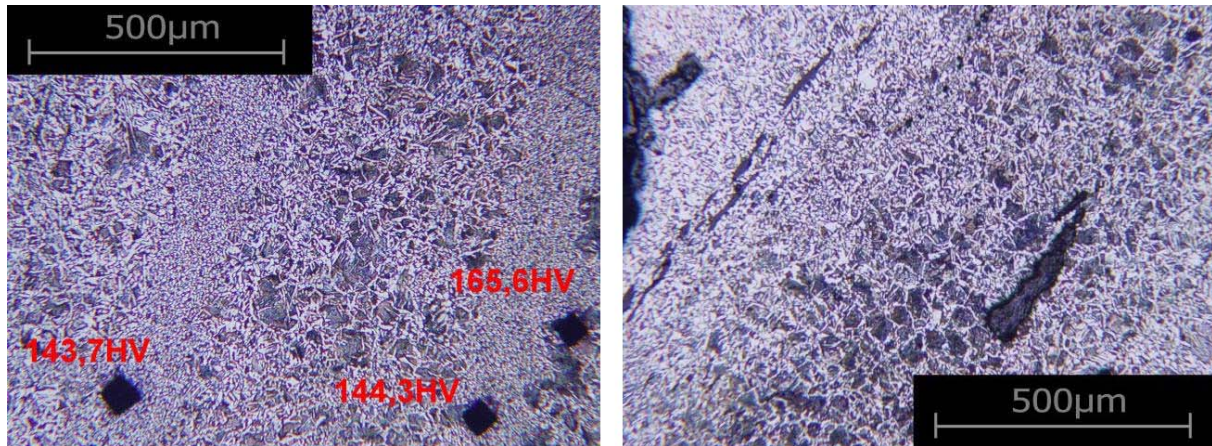
tartozó bronz és ólomlelet. A kocsi megtalált vas alkatrészeinek száma azonban nem azonos a kocsi épített összes vasalásával, mivel a sírba nem a teljes kocsit helyezték el. Hiányzanak ugyanis a nyújtó és a hátsó tengely, valamint a vánkos vasalásai és bronz díszítményei.

Az előkerült vasleleteket pergő, lemezesen leváló korrodálódott réteg borította, amely alatt azonban anyagvizsgálatok elvégzésére alkalmas ép fémfázis volt található.

A vizsgált minták gyártástechnológiai háttere

A korabeli kovácsok a vastárgyakat vasbucákból, illetve az azokból kikovácsolt vastömbökből kovácsolták. Az általában 5-15kg tömegű vasbucákat néhány méter magasságú, faszéntüzelésű ún. bucakohókban állították elő a kohászok. A kohászat során a kohóba adagolt oxidos vagy hidroxidos vasérből a nagy CO-tartalmú atmoszféra redukáló hatására kis szemcsék formájában szilárd állapotban színlőd a vas (indirekt redukció). Ezek a vasszemcsék a kohó alján vasbucává hegedtek össze. A vas az akkoriban elérhető kis kohászati hőmérséklet (1200-1300°C) mellett nem olvadt meg, ebből következően a karbontartalma sem növekedhetett meg túlzottan – néhány tized százalékos karbontartalmú acél keletkezett. Az érc meddőtartalmából és vas-oxidokból álló olvadt salakot a vasbucától a kohászat közben végzett salakcsapolásokkal választották el, így jutottak egy szivacsos, de még erősen salakos vascipóhoz, amelyet a kohászat után többszöri újraizisztálásokkal és tömörítésekkel, átkovácsolással szabadítottak meg a megmaradt felesleges salaktartalomtól (Thiele & Bán 2010, Thiele 2011).

A napvilágra került római kocsi vasalkatrészeit szabadalakító kovácsolással készítették: a faszéntüzelésben felhevített munkadarabot a maihoz hasonló kovácsszerszámok segítségével munkálhatták meg (Tylecote 1972).



2. ábra: A koptatóvas metallográfiai csiszolata. Baloldalon: mikro-keménységmérési eredmények. Jobboldalon: nagyméretű ellapított salakzárványok.

Fig. 2.: Metallographic picture of the wearing-part. On the left: micro hardness values. On the right: large flat slag inclusions.

Az alakadás után a munkadarabot hőkezelték. Végezhettek a teljes keresztmetszetre kiterjedő hőkezelést, pl. a munkadarabot megfelelő karbon tartalom esetén nemesíthették (edzés és megeresztés), emellett felületi hőkezelésre is lehetőség volt, ha csupán a munkadarab felületi rétegének keménységét akarták növelni. Gyakran alkalmazott felületi hőkezelési eljárás volt a betétedzés. Ennek során 1-2mm vastagságú nagy karbon tartalmú réteget hoztak létre az eredetileg kis karbon tartalmú munkadarabon a kovácstűzben, redukáló atmoszférában, néhány órán át tartó iztással – ezt nevezzük cementálásnak. Ezt követően az edzés során csak a felületi réteg edződött be, a kis karbon tartalmú mag lágy és szívós maradt (Konkoly 1992).

Célok és anyagvizsgálati módszerek

A római kocsi vasalkatrészeinek anyagvizsgálatával arra a kérdésre próbáltunk meg választ kapni, hogy vajon a régi mesterek tudatosan választottak-e anyagot és gyártástechnológiát az adott alkatrész jellemző igénybevételével szemben? Pl. a kopásnak kitett alkatrészeket nagyobb karbon tartalmú acélból kovácsolták-e, illetve elvégezték-e azok keménységnövelő hőkezelését?

A kérdés megválaszolása céljából a római kocsi néhány eltérő igénybevételű alkatrészéből mintákat vágunk ki. A vizsgált vasalkatrészek:

1. koptatóvas – ezen fordul el a kocsi első tengelye, koptató igénybevétel
2. zablakarika – nincs jelentős mechanikai igénybevétel
3. szeg (hosszmetszet) – igénybevétel kihajlásra a beütéskor
4. kartámasz – nincs jelentős mechanikai igénybevétel

5. kerékabroncs – koptató igénybevétel az abroncs futófelületén

Minden vasalkatrészen metallográfiai vizsgálatokat és mikro-keménységmérést, a koptatóvas (1) és a szeg (3) minták esetében pedig elektronsugaras mikroanalízist (EDS) is végeztünk.

A metallográfiai vizsgálatok során csiszolatok készültek a kivágott mintákból, amelyeket maratás után (a marószert 2%-os Nitál volt) fénymikroszkóp alatt 50-200-szoros nagyítás mellett vizsgáltunk a minták szövetszerkezetének megismerése és a karbon tartalom becslése céljából.

A mikrokeménység méréseket szintén a csiszolatokon végeztük el: Vickers-keménységet mértünk néhány jellegzetes szövetszerkezeti képet mutató területen 10N-os mérőerővel.

A csiszolatot továbbá pásztázó elektronmikroszkópon (SEM) vizsgáltuk, néhány jellemző területen energiadiszperzív röntgenspektroszkópiával (EDX) mikroanalízist végeztünk az esetleges ötvöző és szennyező elemek mennyiségének meghatározása céljából. Sajnos ez a vizsgálati módszer a kis tömegszámú elemek mennyiségének pontos kimutatására nem alkalmas, így pl. a karbon tartalom sem határozható meg vele.

Anyagvizsgálati eredmények

A koptatóvas (1) maratlan csiszolatán soros elrendeződést mutató, nagyméretű, ellapított zárványok voltak láthatók, a zárványokban salakot is megfigyelhettünk (a buca kohászati technológia maradványa). A maratott csiszolaton tisztán ferrites finomszemcsés szövetszerkezetű (a becsült karbon tartalom: C% \approx 0), finomszemcsés ún. Wiedmanstatteni (perlit szemcsék proeutektoidos ferritűkkel, a szemcsehatárokon szintén proeutektoidos ferrit, C% = kb. 0,4) és ferrithálós szövetszerkezetű (a perlit szemcsék határain

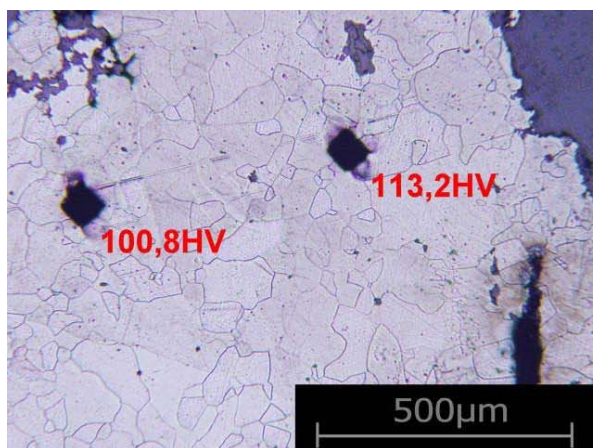
proeutektoidos ferrit, C% = kb. 0,6) területek váltakoztak. A mikro-keménységmérések során a szövetszerkezettől függően 140-170HV értékek adódtak (ld. **2. ábra**). Az elektronsugaras mikroanalízis eredménye szerint a minta sem ötvözőt, sem szennyezőket nem tartalmaz kimutatható mennyiségben (a karbontartalom a maratott csiszolatokon látott szövetelemek alapján becsülhető).

Az ötvözők és szennyezők hiányával magyarázhatóak a keménységmérések során tapasztalt nagyon kis keménység értékek. Az egyik nagyobb salakzárvány elektronsugaras mikroanalízise során adódott elemösszetételeket a **3. ábra** foglalja össze.

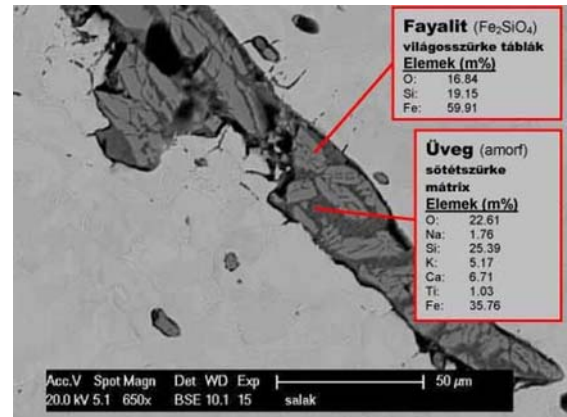
A zablakarika (2) maratlan csiszolatán sok, nagy, elrendeződést nem mutató zárvány volt látható. A felületi rétegekben helyenként kristályközi korrózió jelentkezett. A maratott csiszolaton durvaszemcsés, tisztán ferrites (C% = 0) szövetszerkezet mutatkozott. A mikro-keménységmérések során 100-110HV értékek adódtak (ld. **4. ábra**).

A szeg (3) hosszmetzetének maratlan csiszolatán sok apró, elrendeződést nem mutató zárvány és a felülethez közel kristályközi korrózió volt látható. A maratott csiszolaton sávosan eldurvult, többnyire finomszemcsés ferritet és kevés perlit tartalmazó szövetszerkezet (C% = kb. 0,1) jelent meg. A mikro-keménységmérések során 160-170HV értékek adódtak (ld. **5. ábra**). Az elektronsugaras mikroanalízis eredménye szerint a minta sem ötvözőt, sem szennyezőket nem tartalmaz kimutatható mennyiségben.

A kartámasz (4) maratlan csiszolatán sok, soros elrendeződést mutató zárványt és a felületi rétegekben helyenként kristályközi korróziót lehetett megfigyelni.



4. ábra: A zablakarika metallográfiai csiszolata. Baloldalon: mikro-keménységmérési eredmények. Jobboldalon: salakzárvány.



3. ábra: A koptatóvas egyik salakzárványának elemösszetétele

Fig. 3.: Chemical composition of a slag inclusion of the wearing-part

A maratott csiszolaton javarészt lemezes perlites szövetszerkezet (C% = kb. 0,8) volt látható, amely az egyik oldalon ferrithálós majd Wiedmanstatteni szövetszerkezeten keresztül ment át finomszemcsés ferritbe. A mikro-keménységmérések során a szövetszerkezettől függően 190-290HV értékek adódtak (ld. **6. ábra**).

A kerékabroncs (5) maratlan csiszolatán a koptatóvashoz (1) hasonlóan kevés, de nagy, ellapított zárványt lehetett megfigyelni. A maratott csiszolaton finomszemcsés szövetszerkezet volt látható. Karbontartalom gradiens volt megfigyelhető: az egyik oldal ferrites (C% = kb. 0,1), középen ferrit-perlites (C% = kb. 0,2), a másik oldal Wiedmanstatteni (C% = kb. 0,4), ferrithálós (C% = kb. 0,6) majd a legkülső réteg tisztán perlites-szövetszerkezetű (C% = kb. 0,8). A mikro-keménységmérések során a szövetszerkezettől függően 100-200HV értékek adódtak (ld. **7. ábra**).

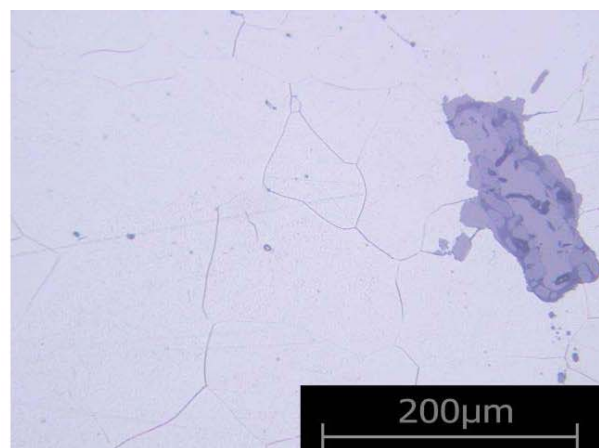
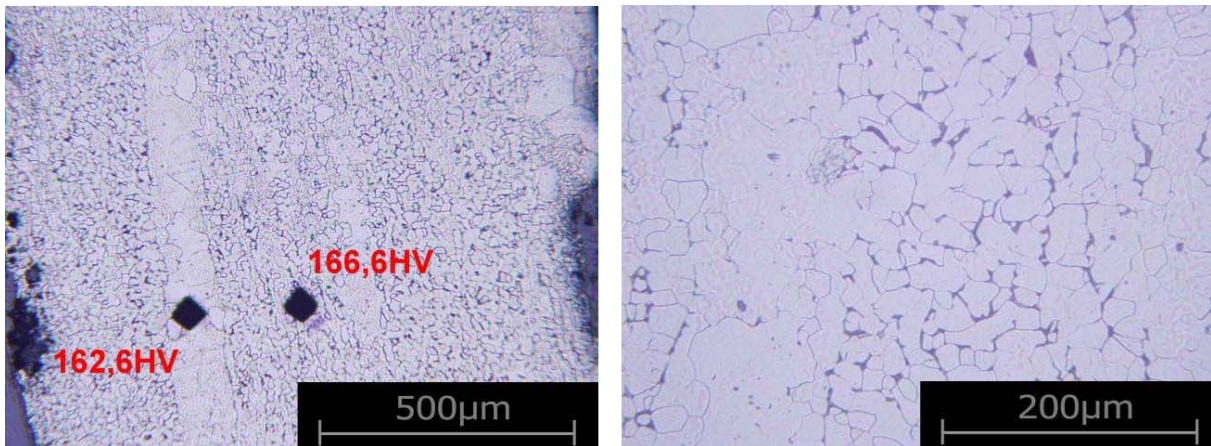
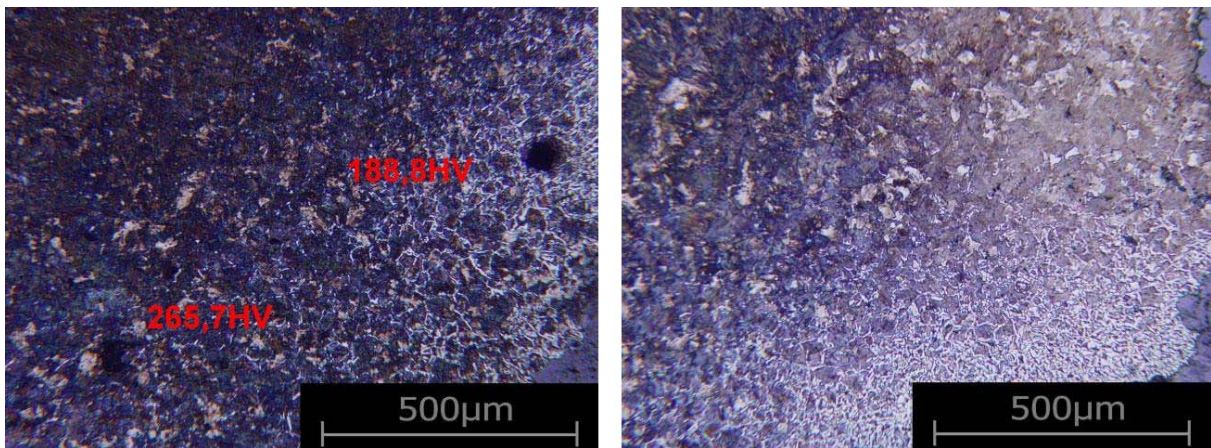


Fig. 4.: Metallographic picture of the bit-ring. On the left: micro hardness values. On the right: slag inclusion.



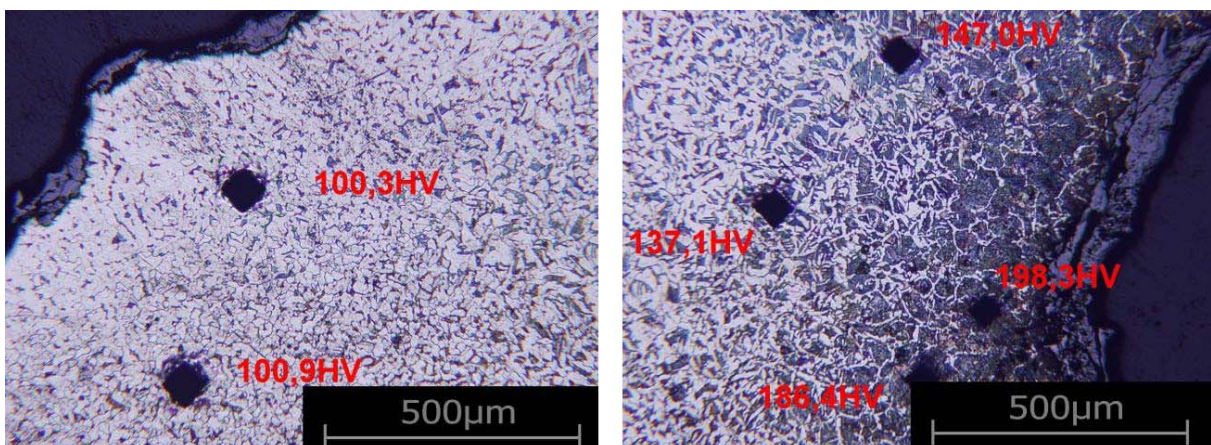
5. ábra: A szeg metallográfiai csiszolata. Baloldalon: mikro-keménységmérési eredmények . Jobboldalon: durvaszemcsés ferritsáv mellett finomszemcsés ferritsáv .

Fig. 5.: Metallographic picture of the nail. On the left: micro hardness values. On the right: fine-grained ferrit layer between large-grained one.



6. ábra: A kartámasz metallográfiai csiszolata. Baloldalon: mikro-keménységmérési eredmények. Jobboldalon: a perlites szövetszerkezet ferritesbe megy át .

Fig. 6.: Metallographic picture of the arm-rest. On the left: micro hardness values. On the right: ferritic texture change to perlitic texture.



7. ábra: A kartámasz metallográfiai csiszolata. Baloldalon: mikro-keménységmérési eredmények a minta egyik oldalán. Jobboldalon: mikro-keménységmérési eredmények a minta másik oldalán.

Fig. 7.: Metallographic picture of the arm-rest. On the left: micro hardness values on the one side of the part. On the right: micro hardness values on the other side of the part.

Következtetések

Az anyagvizsgálati eredmények alapján a korabeli mesterek igénybevételekkel szembeni anyagválasztására és az alkalmazott gyártástechnológiájára vonhatók le következtetések.

A koptatóvas (1) igénybevétele koptató jellegű, a kopásnak kitett felületek keménységét ezért célszerű lett volna megnövelni. A metallográfiai vizsgálatok és a mikro-keménységmérések eredményei alapján azonban az állapítható meg, hogy bár az anyagválasztás megfelelő volt, a gyártástechnológia során szükség lett volna nemesítő hőkezelésre is. Az alkatrész karbontartalma ugyanis elegendő lett volna ahhoz, hogy edzés során (vörösszársól vízben lehűtve a munkadarabot) martenzites szövetszerkezet alakuljon ki. Ezzel szemben a munkadarab a kovácsolás után feltételezhetően mindössze a szabad levegőn hűlhetett le, így alakult ki az egyensúlyihoz közeli, többnyire Wiedmanstatteni szövetszerkezet (Verő & Káldor 1977). A salakzárványok nagy méretei a bucakohászati technológiát követő nagymértékű átkovácsolás elmaradására utalnak.

A zablakarika (2) igénybevétele nem jelentős, ennek megfelelően a választott karbonszegény anyag megfelelő. Viszont a durva szemcseszerkezet a mechanikai tulajdonságokat jelentősen rontja, ennél az alkatrésznél a szemcseszerkezet további átkovácsolással történő finomítása célszerű lett volna, tehát a technológia hiányosságai ismét felröghetők.

A szeg (3) igénybevétele a beütéskor ébred, kihajlás jellegű. Ma a szegek kis karbontartalmú acélból, képlékeny hidegalakítással készülnek, ezáltal szilárdságnövekedés érhető el. A vizsgált minta karbontartalma kicsi, így a szilárdságnövelésre a maihoz hasonló hidegalakítási technológia kínál megoldást. Ezzel a módszerrel bizonyos mértékben valószínűleg éltek is, ugyanis a keménység 160HV értékre növekedett a többi mintánál a javarészt ferrites szövetszerkezethez tartozó kb. 100HV keménységértékekhez képest. Nagymértékű hidegalakítás okozta szemcsemegnyúlások, deformációk azonban nem figyelhetők meg.

A kartámasz (4) jelentős mechanikai igénybevételnek feltételezhetően nem volt kitéve a használat során. Ennek ellenére nagy karbontartalmú, nemesíthető acélt választottak ehhez az alkatrészhöz. A gyártástechnológia során azonban nem nemesítették a munkadarabot, az igénybevételt figyelembe véve ez valóban nem is szükséges.

A kerékabroncs (5) a futófelületén koptató igénybevételnek van kitéve. Ennek megfelelően alakul a mintán megfigyelt karbontartalom gradiens

is: a külső felület felé haladva növekvő karbontartalomra utaló szövetszerkezetet láthatunk. Az anyagválasztás és a technológia is megfelelő volt, mert az eredetileg kis karbontartalmú acél felületét cementálással (ld. bevezető, 1.2.) dúsították fel karbonban, ezáltal egy keményebb (kb. 200HV), kopásállóbb felületi réteget kaptak.

Az elektronsugaras mikroanalízis eredményei alapján megállapítható, hogy a római kocsi vizsgált vasalkatrészei ötvözetlen szénacélból készültek, amely anyag szilárd oldatos szennyezőket sem tartalmaz kimutatható mennyiségben. A koptatóvas egyik nagyobb salakzárványának elemösszetétele kristályos fayalit és üvegfázis jelenlétére utal. A salakzárványok fázisösszetétele és a fémfázis szövetszerkezete között egy korábban megjelent publikáció szerint összefüggés mutatkozik: a ferrit-perlites szövetszerkezetben megjelenő salakzárványokban túlnyomó részben fayalit és üvegfázis található (Buchwald & Wivel 1998). Ez az összefüggés a koptatóvas esetén is látható.

A salak üvegfázisának elemösszetételében 1% Ti volt kimutatható, a fémfázisban pedig nem fordult elő a foszfor, mint szennyező. E két mérési eredmény alapján feltételezhető, hogy a vasbucák, amelyekből a római kocsi vasalkatrészeit kovácsolták genetikájukat tekintve nem üledékes eredetű gypvasérc kohósításából származnak (Molnár 2008). A titán mint nyomelem jelenlétéből a vasbucakohászati technológiához felhasznált érc eredetére lehetne következtetni, ha ismernénk a környékbeli vasércbányák érceinek nyomelem-háztartását (vö. Navasaitis et al. 2010).

Összességében elmondható, hogy az adott római kocsi vasalkatrészeinek kovácsai az igénybevételekkel szemben általában megfelelő anyagot, de nem mindig megfelelő technológiát (megmunkálást és hőkezelést) választottak.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Portó Mihálynak (BME, Anyagtudomány és Technológia Tanszék) a SEM-EDX vizsgálatokért.

Irodalom

- BUCHWALD V. F., WIVEL H. (1998): Slag analysis as a method for the characterization and provenancing of ancient iron objects, *Elsevier Science Inc.*, New York, p. 73-96.
- FICHES J-L. (1996): *Ambrossum, une étape de la voie Domitienne en Lunellois*, Montpellier
- GARBSCH, J. (1986): Mann und Roß und Wagen. Transport und Verkehr im antiken Bayern. *Ausstellungskataloge der Prähistorischen Staatssammlung*. **Bd. 13**. München.

- KASTOWSKY K. & MEHOFER M. (2006): Metallografische Analysen an den kaiserzeitlichen Depots aus Mannersdorf am Leithagebrige. *Pollack 2006*, 55-63.
- KONKOLY T. (1992): *Hőkezelés*, Tankönyvkiadó, Budapest, 143-146.
- MAROSI A. (1935): A székesfehérvári múzeum római kocsilelete Kálózról, *Archaeologiai Értesítő* **48** 213-216.
- MOLNÁR F. (2008): Ércsek, salakok, fémek, A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, *Bányászat* **74** 91-111.
- MRÁV ZS. (2005a): Die Deichselmanschette. Zugarmkonstruktion bei römischen Wagen. *Archaeologiai Értesítő* **130** 21-52.
- MRÁV, ZS. (2005b): Kocsival a túlvilágra. Kocsit tartalmazó római temetkezések a budaörsi vicus temetőjében. In: Ottományi K. – Mester E. – Mráv Zs., *Antik gyökereink. A Budaörsön feltárt régészeti leletek gyűjteménye*. Budaörs, p. 56-60.
- MRÁV, ZS. (2006): Paradeschild, Ringknaufschwert und Lanzen aus einem römerzeitlichen Wagengrab in Budaörs). *Archaeologiai Értesítő* **131** 33-73.
- MRÁV, ZS. (2009): Utas két világ között. A helyi elit kocsit tartalmazó temetkezései a császárkori Pannóniában, *Ókor* **8/3-4** 78-87.
- MUTZ A. (1976): Römisches Schmeidehandwerk. *Augster Mushefte* **1**.
- NAVASAITIS J., SELSKIENĖ A., ŽALDARYS G. (2010): The study of trace elements in bloomery iron, *Materials Science* **16/2** 113-118.
- POLLACK M. (2006): Stellmacherei und Landwirtschaft: Zwei römische Materialhorde aus Mannersdorf am Leithagebrige, Niederösterreich. Fundberichte aus Österreich, *Materialhefte Reihe A Bd. 6*. Wien.
- SCHWAB R. (é. n.): Technologie und Herkunft eisener Werkzeuge und Waffen aus dem späteltischen Oppidum von Manching, PhD Thesis, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- THIELE Á, BÁN K. (2010): A bucavaskohászat kora középkori technológiája a megvalósíthatóság tükrében, *BKL Kohászat* **2010/2** 7-12.
- THIELE Á. (2011): A földtől a vastárgyig – a bucavaskohászat metallurgiája, *BKL Kohászat* **2011/1** 1-5.
- TYLECOTE R. F. (1972): *The history of metallurgy*. The Institute of Metals, London, 102-113.
- VERŐ J., KÁLDOR M. (1977): *Fémtan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Bp., 1-205.
- VISY ZS. (1997): *Wagendarstellungen der pannonischen Grabsteine*. Pécs, 1-142.

