

olvadékot hevítse. A fotonok tehát először a „felhő” anyagával kerülnek kölcsönhatásba. A felhő alapvető optikai tulajdonságai (abszorpció, reflexió, transzmisszió) az összetételétől, hőmérsékletétől és nyomásától függenek. Tudjuk, hogy az elektronsűrűség és a hőmérséklet növekedésével a reflexió mértéke nő. Ennek eredményét árnyékolhatásként szokás jellemezni. A hegesztés során ezt úgy tapasztaljuk, hogy azonos körülmények között, a lézersugár teljesítményének növekedése a varratmélység csökkenését eredményezi. Ez azért van, mert a túlhevített „felhő” a lézersugár nagyobb részét reflektálja, nem engedi a gőz-plazma csatomába jutni. A reflexió hatás növekedése a lézersugár hullámhosszúságával négyzetesen növekszik. Ezért ez a hatás, az ipari lézerek közül legerősebben a CO₂ lézersugár esetén tapasztalható.

Kísérleti eredményeink azt igazolták, hogy a hegesztési varratmélység szempontjából ideális gőz-plazma állapot a megfelelő összetételű munka-

gáz keverékkel még a CO₂ lézersugár hegesztés esetén is biztosítható.

Irodalom

- [1] *Conrad M. Banas*: NASA Contractor Report, NASA CR-132386, Electron Beam, Laser Beam And Plasma Arc, Welding Studies 1974
- [2] *A-H. I. Mourada, A. Khoureshidb, T. Sharefb*: Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties, Materials Science and Engineering A 549 (2012) 105–113.
- [3] *Sana Bannour, Kamel Abderrazak, Hatem Mhiri, Georges Le Palec*: Effects of temperature dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy, Optics & Laser Technology 44 (2012) 2459–2468.
- [4] *P. Sathiya, Mahendra Kumar Mishra, R. Soundararajan, B.*

Shanmugarajan: Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel, Optics & Laser Technology 45 (2013) 46–55.

- [5] *Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Qianwu Hu*: Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding, Journal of Materials Processing Technology 184 (2007) 177–183.
- [6] *M. Keskitalo, K. Mäntyjärvi, J. Sundqvist, I. Eriksson, A. F. H. Kaplan*: The influence of shielding gas on the properties of laser welded stainless steel, NOLAMP 14, Gothenburg, August 26–28., 2013
- [7] *Anna Fellman*: The effect of shielding gas composition on welding performance and weld properties in hybrid CO₂ laser–gas metal arc welding of carbon manganese steel; Journal of Laser Applications, February 2006, VOLUME 18, NUMBER 1, 12–20.

CSANÁDYNÉ BODOKY ÁGNES ÉS TÁRSAI*

Ganz Ábrahám vasúti kerekeinek titkai anyag-tudományi vizsgálatok tükrében**

A közleményben Ganz Ábrahám öntődéjében 1867-ben készített, sok éven át futott kéregöntésű, kettős-falú vasúti kerék anyagát tanulmányoztuk korszerű anyag-tudományi módszerekkel (OES, OM, SEM, TEM, EDS, EBSD, XRD, XRF [ESCA], SNMS, mikrokeménység-mérés) és a kapott eredményeket elemeztük. Az OES vizsgálatok kimutatták, hogy a kerékben mindenütt megtalálható ~0,059% antimon (Sb), ami többszöröse az öntvényekbe az egyéb anyagokkal bejutó átlagos mennyiségnek (<0,01%). Az Sb SNMS technikával a több mm-es kéregben is megtalálható volt, kivéve a kéreg felszínének legkülső, 1 µm-nél kisebb rétegét. A 20. századi sokoldalú vizsgálatok szerint a kerékben kimutatott antimon mennyisége ideális, stabilizálja a perlitet; kedvezően hat az öntöttvas

mechanikai tulajdonságaira és így használhatóságára. A felület szerkezetének vizsgálatával (XRD, TEM, ED) bizonyítottuk, hogy a kéreg felszínén észlelt kiugró keménység (~600 HV) a nagymértékű képlékeny deformációval járó használat (sín-kerék érintkezés) következtében a perlitből kialakuló „nanokompozit” következménye, aminek kialakulását az öntvény anyagában kimutatott nagy széntartalom (4,09%) is elősegítette. A használat során egyre finomodó szerkezet is hozzájárult a kerekek hosszú élettartamához.

Ganz Ábrahám vasúti kerekek sikerének titka az ismert újszerű konstrukción és az azzal összefüggő előállítás technológián (kéregöntés) kívül a fém jelenleg ismertettől összetételében és az ezekből kialakuló szerkezetében is rejlik.

* Csanády Andrásné, MTA doktora; Gábor János, gépészmérnök (Ganz Holding Zrt.); Jenel Péter, PhD és Prof. Gubicza Jenő, MTA doktora, (ELTE, Anyagfizikai Tanszék); Prof. Szabó Péter János, MTA doktora és Fábian Réka, PhD (BME, Anyagtudomány és Technológia Tanszék); Radnóci György, MTA doktora, tud. tanácsadó és Tóth Attila Lajos, PhD, CSc (MTA Energlakutató Központ, MFA); Langer Gábor, PhD, CSc (Debreceni Egyetem, Szilárdtest Fizikai Tanszék); Krafcsik Olga, PhD (BME, Fizika Tanszék); Prof. Verő Balázs, MTA doktora (Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.)

** Csanádyné Bodoky Ágnes előadása a Ganz-év alkalmából hangzott el az Öntődei Múzeumban, az OMBKE Öntészettörténeli és múzeumi szakcsoport ülésén, 2015. május 13-án

1. Bevezetés

Ganz Ábrahám (1814–1867) a 19. századi magyar ipari fejlődés fellendítésének meghatározó személyisége gazdasági sikereit legfőképpen a vasúti kerekek korábbi konstrukciójától eltérő megoldásaival, jobb minőséget és tartósságot szavatoló technológiájának kidolgozásával, a technológia megújításával érte el. Az Angliában már az 1820-as években a vasúti kerekeknél alkalmazott, „kéregöntés” eljárását tökéletesítette és Bécsben az 1850-es évek közepén (1854, 1855, 1856) szabadalmaztatta [1]. Az Angliában leírtak szerint a „... kéregöntés... úgy történik, hogy a kerékabroncs külső felületének előállításához a fémet egy hideg, henger alakú vasdarabra folytatjuk. Ekkor a hideg vas okozta hőelvonás olyan keménységet kölcsönöz a fémnek, hogy reszelővel sem lehet megmunkálni...” [2]. Ganz szabadalmaztatott kerékkonstrukciója már nem küllőkkel és abronccsal készült. A kéregöntés az összefüggő, üreges tárgyként öntött kerekek sínekkel érintkező felületeinek biztosított gyorsabb hűlést. Ezt a hűtőhatást a homok öntőformába elhelyezett, a homoknál jobb hővezetést biztosító fémbetéttel (kokillával, mai szóhasználatnál hűtővassal) érte el. A kokillák belső felületét a korabeli gyakorlat szerint úgynevezett „kokillamázsal” [3] kezelték és ezzel gátolták az olvadék feltapadását. Ganz Ábrahám nemcsak kialakította az új típusú kéregöntésű vasúti kerekek gyártásához szükséges technológiai feltételeket, hanem a kokillamáz összetételére is szokatlan, egyedi változatot javasolt. Az 1857-es, Bécsben beadott szabadalmi leírásából ismeretes, hogy ennek legfontosabb összetevője az „antimonpor” volt. Ezzel sikerült a gyártáshoz elengedhetetlen szabadalmat megszereznie. A szabadalomban az antimont, mint a vas egészét keményítő adalékot is szabadalmaztatta [1].

Az angol technológiát Amerikában is hamar megvalósították [4]. Észak-Amerikában már korán rátértek abroncs nélküli kerekek gyártására, amelyekből Európába, sőt Magyarországra is került valamennyi a vasúti hálózatok kiépítése során [5, 6]. Az Egyesült Államokban beadott, vasúti kerekek előállítására vonatkozó 1872-

es keltezésű szabadalom az egyéb európai leírásoktól eltérő technológiai megoldásokat alkalmaz [7].

A Ganz Ábrahám műhelyében készített kéregöntött kerekek számos előnyt nyújtottak a korábban gyártott abroncsos kerekekkel szemben. A kiváló formatartású kerekek súlya és sínkoptató hatása kisebb, élettartama hosszabb, hőállósága és hidegtűrése jobb, mindezekből következően alkalmazásuk sokkal gazdaságosabb volt. Ez tette lehetővé, hogy egy adott időszakban ő nyerje el az európai piacok túlnyomó többségét [5].

Ganz munkássága idején csak kevés és kezdetleges anyagvizsgáló módszert használtak. Az öntvények ellenőrzésének egyedüli lehetőségét a töretek szemrevételezése kínálta. Ganz Ábrahám a megfelelő eszközökkel szereshető adatok hiányában csak kísérleti megfigyeléseken alapuló sejtésekre támaszkodhatott. Az, hogy milyen módon került kapcsolatba az antimonnal, nem tudható. Mindenesetre a Fe-Sb ötvözet akkor már ismert volt, ezt a korabeli német és angol szakkönyvek tanúsítják.

A 21. században az anyagtudományok lehetőséget teremtenek arra, hogy a 19. században hosszadalmas kísérletezéssel, tapasztalati úton kifejlesztett technológiák eredményeit részletesen megvizsgáljuk és néhány anyagtudományi kérdést tisztázzunk.

Az eltelt mintegy 150 év során rendkívül gyors fejlődés ment végbe a természettudományok (pl. kémia és fizika) területén. Az elmúlt évtizedekben nagyon sok kísérlet és sokoldalú vizsgálati tevékenység tárta fel, többek között az Sb szerepét is az öntöttvasban [8, 9, 10, 11]. Ezek a megállapítások napjainkban sem veszítették érvényüket [12]. Ma már tudható, hogy az Sb kedvező hatása erősen függ a vasöntvényben található mennyiségétől. A legkedvezőbb tulajdonságokat egy kifejezetten kis mennyiségű Sb (~0,05%) eredményezi, amelynek elsődleges szerepe, hogy stabilizálja a perlitet. Az Sb a vasnál 17%-kal nagyobb atomi átmérőjével beépül a vas kristályszerkezetébe, és ezúton megnöveli a keménységet, javítja a kopásállóságot, gátolja a szemcse-növekedést és az oxidálódást, szegregációra való hajlama következtében csökkenti a felületi sza-

bad energiát. A mechanikai tulajdonságok javításában az Sb mutatja a legjobb eredményeket a vizsgált egyéb hasonló fémek között (Sn, Pb stb.). Európában kis mennyiségben, számos helyen alkalmazzák szürkevas öntvények előállításához. Ez a kis mennyiség növeli a perlit hőhatásokkal szembeni stabilitását és ezzel pl. 704 °C-ig végzett ciklikus vizsgálatok esetében mintegy megkétszerezi a szürkevas élettartamát. Kedvező hatással van a képződő grafit morfológiájára is. Bizonytalan mennyiség (Sb<0,01%) a gyártás különböző fázisaiban a különböző eredetű nyersanyagokból és adalékokból mindig bekerülhet a gyártmányba, ezt figyelembe kell venni, mivel könnyen előfordulhat Sb-túladagolás. Az Sb túl nagy mennyiségei károsak, mivel jelentékenyen rontják a szívósságot, fokozzák a törési hajlamot. Az Sb-bevitelt általában az öntőüst aljára elhelyezett nagyon finom antimonporral valósítják meg.

2. Kísérleti célok és eredmények

Vizsgálatunk célja, hogy az elmúlt évtizedekben felhalmozott ismeretek és a mai vizsgálati eszközeink segítségével választ keressünk arra, hogy a Ganz-öntődobban kéregöntéssel előállított kerék jó minőségét mivel magyarázhatjuk? A lehető legsokoldalúbban jellemezzük ezt az eddigiekben kevésbé ismert ipartörténeti emléket. Mit tudhatunk meg a kerék összetételéről, esetleges Sb-tartalmáról? A kéreg és a kerék belső (tömbi) része milyen eltérő tulajdonságokat mutatnak, és ezeknek a különböző tulajdonságoknak milyen anyagszerkezeti, összetételi okai vannak? A feladat megoldását nehezítette, de másrészt új felismerésekkel gazdagította, hogy egy 1867-ben a Ganz-öntődobban készült, de sok éven át használt kereket vizsgáltunk. Így azonban a használat okozta változásokra és folyamatokra, az azokat befolyásoló adottságokra is fényt deríthettünk.

A vizsgálatokhoz olyan mintát (majd abból további mintákat) kellett kivágni az osztatlan agyú, kettősfalú öntött kerékből (1 és 2. ábra), hogy a tulajdonságokat tanulmányozni lehessen a kéregöntött felületre merőlegesen is, továbbá, hogy magát a kéreg-



■ 1. ábra. A mintavételhez használt kerék



■ 2. ábra. A Ganz-szabadalomban a kettősfalú kerék keresztmetszetének rajza

öntött (a fémbetétet hűtött, majd terheit felületet) is lehessen vizsgálni. Ez nehéz feladatnak bizonyult, tekintettel a kb. 140 kg-os kerékre [5] és annak keménységére.

Minden vizsgáló eszköznek más a minták méretével kapcsolatos elvárása, így további darabolás is szükségessé vált.

A különböző, egymást kiegészítő vizsgálati módszereket (Optikai emissziós spektrometria: OES; fénymikroszkópia: FM; pásztázó elektronmikroszkópia: SEM + energiadisziperzív röntgenspektrometria: EDS + visszaszórt elektrondiffrakció: EBSD; transzmissziós elektronmikroszkópia: TEM + elektrondiffrakció: ED + energiadisziperzív röntgenspektrometria: EDS; röntgendiffrakció: XRD; röntgen-foto-elektron spektroszkópia: XRS (ESCA); szekunder semleges részecske tömegspektrometria: SNMS; mikrokeménység-mérés) néhány fontos kérdés megválaszolására összpontosítottuk.

- Mi volt a kémiai összetétele a Ganz-féle keréknek? Mennyi C és Si, milyen és mennyi egyéb ötvöző, vagy szennyező található a mintában? Van-e különbség a kéreg és a belső (tömbi) rész összetételében? Megtalálható-e az Sb a kerékben és hol?

- Milyen szövetszerkezeti elemeket találunk a kéregben és a belső részben, hogyan jeleníthetők meg ezek fénymikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos metallográfia segítségével?

- Van-e különbség a kéreg és a belső (tömbi) öntvényrész átlagos szemcseméretében és kialakul-e a kéregben kitüntetett orientáció?

- Hogyan változik a kerék anyagának keménysége a felszíntől számított

mélység függvényében? A kérgi rész mikroszkópokkal mért vastagságát hogyan tükrözik a keménységmérés eredményei?

- Mi a magyarázata a tartós használat, a sín-kerék kölcsönhatás során kialakuló rendkívüli keménységértékeknek?

A feltett kérdésekre adott válaszokat két alfejezetben ismertetjük:

2.1. A minta összetételének, szövetszerkezetének, kristályszerkezetének, továbbá a kéreg és belső (tömbi) rész különbségeinek vizsgálata

2.1.1. A minta tömb anyagának összetétele

A Magyarmet Öntöde jóvoltából egy korszerű optikai emissziós spektrométerrel (OES) (METEK SPECTROLAB, LABLAVM10) a kerék tömb anyagának összetételét igen pontosan meg lehetett határozni (a megadott értékek tömegszázalékokat jelentenek):

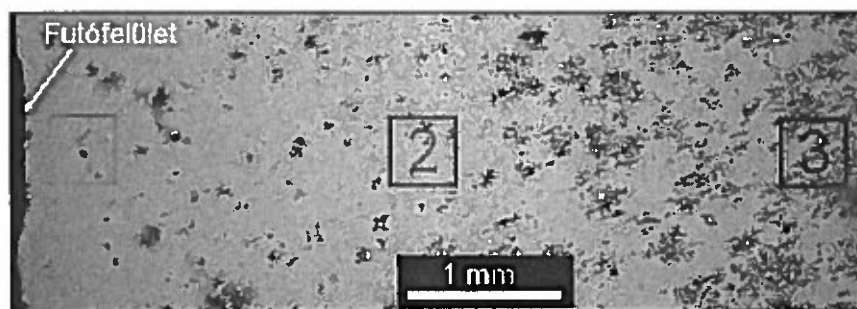
C: 4,09; Fe: 93,6; Si: 1,15; Mn: 0,56; P: 0,067; S: 0,24; Cr: 0,08; Mo: 0,015; Ni: 0,053; Al: 0,001; Co: 0,02; Cu: 0,108; V: 0,009; W: 0,014; Nb: 0,023; Ti: 0,018; Pb: 0,0012; Sn: 0,00094; As:

0,0392; Ca: 0,00057; Sb: 0,059; Ta: 0,0067; B: 0,0028; N: 0,0239; O: >>0,012

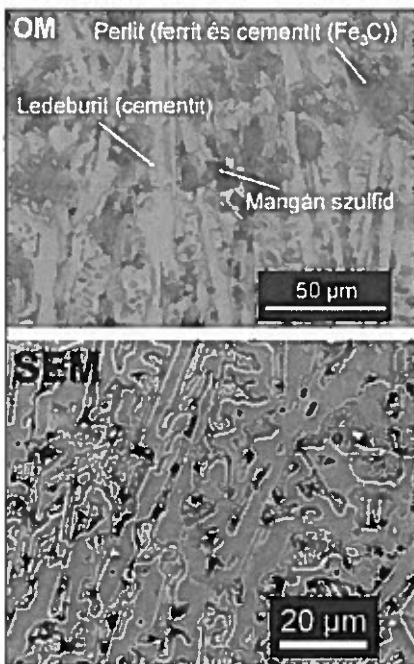
Az összetétel a meghatározó elemek (Fe, C, Si, Mn, P, S) tekintetében teljességgel megfelel az ún. szürkevasnak nevezett Fe-C ötvözet összetételének (MSZ EN 1561:2000), antimontartalma: 0,059%.

2.1.2. A minta keresztmetszeti összetételének és szövetszerkezetének vizsgálata a kéreg felületétől az öntvény belseje felé haladva

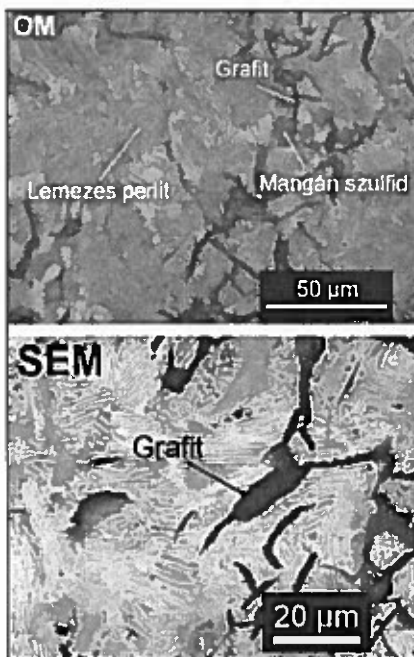
Szabad szemmel szemlélve az öntvénytöröt kérgi része fehéres, míg a belső (tömbi) része szürke. A minta csiszolt keresztmetszetén is megkülönböztethető volt szabad szemmel a néhány mm-es felületi kéreg az utána következő átmeneti résztől, majd a minta lassabban hűlt belső (tömbi) részétől. Egy polírozott minta különböző területei összetételét (kéreg, átmeneti zóna, belső (tömbi) rész) SEM-ben (JSM 25 S III. és Röntec analízátorral) vizsgáltuk (3. ábra). Az egyes területek összetétele teljesen azonos volt, kivételt képezett, ha az elektronsugár útjába véletlenül esett egy MnS



■ 3. ábra. Egy SEM BEI (visszaszórt elektronokkal készített) felvételen a részletes EDS-analízis kiválasztott területtel a kéregben (1), az átmeneti zónában (2) és a belső (tömbi) részben (3)



■ 4a ábra: A kéreg nitállal maratott, optikai mikroszkóppal (OM) készített szövethépe, és 4b ábra: szekunder elektronmikroszkópos (SEM) felvétele (cementit, perlit, helyenként MnS)



■ 5a ábra: A belső (tombli) rész nitállal maratott, optikai mikroszkóppal (OM) készített szövethépe, és 5b ábra: szekunder elektronmikroszkópos (SEM) felvétele (lemezes perlit, grafit, helyenként MnS)

kiválás került. Jól észlelhetőek voltak a S, a C, a Mn, a Fe az Al, a Si, a P különböző csúcsai.

OM-os (Olympos PMJ3) vizsgálatainkat, a csiszolt és 2%-os nitáiban maratott keresztmetszeti csiszolatok-

ról készült szövethépeket a 4. és 5. ábrák mutatják.

A kéreg szövetszerkezeti felvételei megfelelnek a Greiner–Klingensteinféle szövethépe diagramban (C+Si összmenyisége és a falvastagság/hűlési sebesség/közötti összefüggés) az öntöttvas összetételére vonatkozó szövetszerkezeteknek. A gyors hűlés hatására a kéregben ledeburit és perlit azonosítható, ami az egyes szövetelemek keménységértékeivel (HV 1 N mikrokeménység-vizsgálat) is igazolható és az irodalom szerint is várható volt. [13, 14] (4. ábra) A kéregnél lassabban hűlt öntvény belső (tombli) részében lemezes perlit és grafit, (5. ábra) továbbá mindkét részben, itt-ott MnS zárványok voltak észlelhetőek. A mikroszkópos felvételek alapján és a mikrokeménység-mérés (6. ábra) szerint is a kérgi rész vastagsága egyaránt 3–4 mm.

Egy EDAX-TSL feltétellel felszerelt SEM-ben (Philips XL-30) visszaszórt elektrondiffrakció módszerével (EBSD) vizsgáltuk a kéreg és a belső (tombli) rész szemcseszerkezetét és orientációs viszonyait. A kéreg finomabb szemcseméretét a színes EBSD-felvételek látványosan bizonyították. A kéregről és a belsőbb részről készített pólusábrák alapján textúra nem volt észlelhető.

2.1.3. A felületről kiindulva, porlasztással, a mélység függvényében végzett kémiai összetétel-vizsgálat

Tekintettel arra, hogy az EDS-vizsgálat kimutatási határa (~0,1%) nem elegendő kis mennyiségű Sb kimutatására, érzékenyebb módszereket is kellett keresni annak érdekében, hogy az Sb-t észlelhessük a kéregben is, vagyis az OES-nél kisebb léptékű téri eloszlását is vizsgálhassuk. Az OES belső (tombli) részösszetételi vizsgálata már kimutatta az Sb jelenlétét. Ezért a felületről kiindulva XPS (ESCA)- és SNMS-vizsgálatokat végeztünk. XPS esetében 4 órás porlasztás nem volt elegendő arra, hogy az Sb megjelenjen a spektrumban. Ezt utóbb a 3x10 órán át végzett SNMS-vizsgálatok (INA-X, SPECS GmbH, Balzers QMG 422, d=2 mm foltátmérő) érthetővé tették. Az Sb ~15 órás porlasztás után, csak kb. 0,7 µm mélységben vált megfigyelhetővé és onnan fokozatosan érte el még a kérgi részben (2-3 mm mélységben) egy másik SNMS-mé-

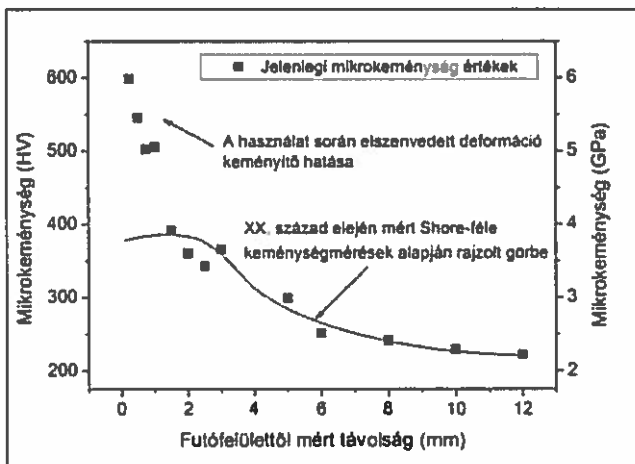
réssel a belső (tombli) csiszolaton is észlelt szintet.

Vizsgálataink szerint az Sb a kéreg legkülső részéből egy µm-nél kisebb tartományból hiányzott. Ez egyaránt következménye lehet az öntés közben lejátszódó (pl. párolgás) vagy a használat során végbemenő folyamatoknak (a felület felmelegedése stb.).

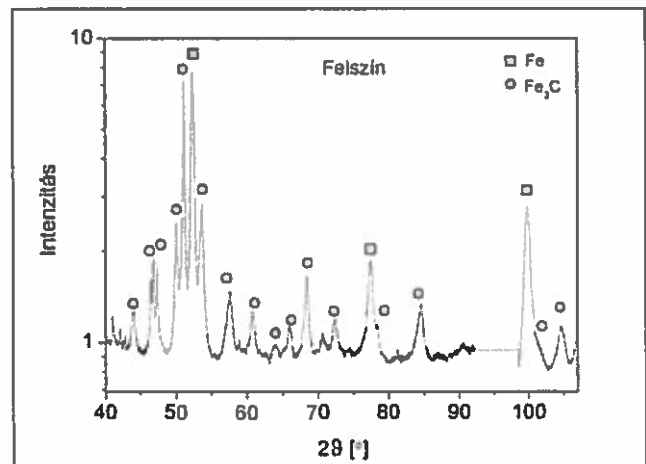
Feltehető a kérdés, ha a kéreg legkülső részében a vizsgált területen nem található meg az Sb, a kokillamázban volt-e az antimon, és ha igen, mi történt vele az öntéskor. A gondolkodást segíti az antimon bevezetőben emlegetett tulajdonságainak számbavétele: a kis olvadáspont, a szublimációs hajlam, a vasban mutatkozó nagymértékű oldékonyság stb., továbbá az a sok közlemény, ami a 20. században az öntöttvasban lévő antimonnal kapcsolatban végzett vizsgálatokból született, mégis a kérdést nem tudjuk megválaszolni. Az azonban eléggé nyilvánvaló, hogy a kokillamáz nehezen biztosítható a megbízható Sb-adagolást.

Az OES-vizsgálat szerint a vizsgált kerékben meglepő módon közel az a mennyiségű Sb van, amelyikről később, a 20. században tisztázták, hogy optimális a kerék szövetszerkezeti és mechanikai tulajdonságai szempontjából. Ganz Ábrahámot az Sb ilyen kis mennyiségeinek kedvező hatásához csak kísérletei vezethették el, hiszen az ő idejében vizsgálatokkal igazolt ismeretek még nem léteztek. Ganz egy 1843-ban végzett kísérlete során vesztette el egyik szemét, amikor abba forró vas fröccsent [15]. Feltételezhetjük, hogy ekkor már Sb-porral kísérletezhetett. Arra a kérdésre, hogy miként biztosították az üzemben 1867-ben, a később szinte ideálisnak bizonyult Sb-szintet (a szabadalomban leírt kokillamázal, vagy az öntőüst aljára helyezett antimonporral stb.) nem tudunk válaszolni.

Bizonyára voltak a szabadalom szerinti technológiával is kísérleti sorozatok, de Kerpely Antal professzor már 1870-ben, a Ganz-műhelyben tett látogatásáról írt beszámolójában az antimonos kokillamáz használatát kétségbe vonta [16]. Később, 1901-ben a fenti feltételezés helyességét a gyártási eljárásra vonatkozó protokollok is igazolták, ezekben nem szerepelt az antimonos kokillamáz használata [17].



6. ábra. Mikrokeménység (HV) a futófelülettől való távolság függvényében



7. ábra. A minta felszínén, nagyfelbontású kobaltanódos diffraktométerrel készült röntgendiffraktogram [(Fe₃C) és bcc α-vas]

2.2. A kerékhasználat során bekövetkezett változások és ezek értelmezése

A bevezetésben leírtak és a 2.1. fejezet vizsgálati eredményei fontosak voltak annak magyarázatához, hogy a kerékhasználat során mutatkozó, a korabeli konkurenciával szemben előnyt biztosító tulajdonságokat, élettartam stb. [5] milyen összetétel és szerkezet alapozta meg, de a jobb megértéshez még további vizsgálatokra is szükség volt.

2.2.1. Keménységmérés

Azt a kérdést, hogy miképpen változik a kerék anyagának keménysége a felszíntől számított mélység függvényében, egy Zwick Roell ZHμ mikrokeménység-mérővel (20 N-os terhelés) tisztáztuk. Az eredményeket a 6. ábra mutatja.

A kéreg keménysége (eltekintve a külső 0,5-1 mm-től) ~370 HV, majdnem kétszerese a grafitosan dermedt belső (tömbi) részen mért értéknek (~200 HV). Az ábrán látható Shore-féle keménységmérések alapján rajzolt görbe Bánhegyi László 1967-es munkájából [13] származik. Ezt a szkleroszkóppal (rugalmasan visszapattanó acélszerszámmal) végzett mérési eljárást egykor keménységek összehasonlítására használták. A kerék legkülső részén általunk mért keménység (~600 HV) azonban sokkal nagyobb, mint a 20. század elején közölt adatok. A különbség oka, hogy a korábbi mérések egy új keréken történhettek, míg az általunk vizsgált kerék felülete a használat során, a sínnel

való kölcsönhatás eredményeképpen vált még sokkal keményebbé.

A korábban bemutatott OM- és SEM-felvételek (4. és 5. ábrák) megmutatták a kerék belsejének és külső kérgének szövetszerkezetét. A képeken látható kéregméret összhangban van a keménység alapján meghatározott méretekkel. A keménységi adatok tendenciája azonban a kéreg külső felületének a kéreg felépítésétől is eltérő szerkezetére utaltak. Ez tette szükségessé, hogy ezt a kérgi részt, ennek szerkezetét különös gonddal, a korábbiaknál nagyobb részletességgel vizsgáljuk meg.

2.2.2. A kéreg felszíni rétegének vizsgálata

2.2.2.1. Röntgendiffrakció és a vonal szélesedés elemzése

A kéreg felszíni részében RD-val két fázist lehetett azonosítani (7. ábra) a bcc α-vas, ferrit fázist és az ortorombos kristályszerkezetű cementit (Fe₃C).

A röntgendiffrakciós felvételek elemzésével a „kristallitok” (koherens szórócentrumok) méretei a vas 110 csúcsából Scherrer-módszerrel számítva, a felszínen, a felszíntől 2 mm-re, majd 10 mm-re mérve 35, 85 ill. 105 nm-nek, ugyanezek a méretek a Fe₃C 121 indexű csúcsából becsülve 25, 100, ill. 85 nm-nek adódtak.

2.2.2.2. Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok

A minta felszínének legfelső rétegét ionmaratással preparáltuk és TEM-mel (Philips CM 20, 200kV, NanoprobeNoran EDS) is megvizsgáltuk. A



8. ábra. A kéreg felszínén kialakult nanokompozit ferritszemcséi az őket elválasztó cementitlemezekkel



9. ábra. A kéreg felszínén kialakult nanokompozitban, a ferrit/cementit határán induló és sűrűsödő diszlokációkkal

TEM-ben a kiválasztott fázisokról készített diffrakciós felvételeken ugyanazt a két fázist azonosítottuk, mint röntgendiffrakcióval. A felvételek azonban érdekes szerkezetet mutattak. Egy ~10 µm terület átnézeti felvételén az látható, hogy az ionmaratással elvékonyított mintában finom cementitlemezeket tartalmazó „kompozit szerkezet” alakult ki (8. ábra). Ezt a szerkezetet nagyobb nagyítással, világos és sötét látóterületű felvételeken megvizsgálva a cementitlemezek vastagságára esetenként ~100 nm körüli értékeket kaptunk. A cementitben alig található diszlokáció, míg a ferritben igen sok van. A diszlokációk jelentős része a ferrit/cementit fázishatárhoz kötődik, és a ferritszemcsékbe nyúlik tovább (9. ábra).

Figyelemre méltóak a minta átlagáról és az egyes fázisokról külön-külön is készített EDS-analízisek. A SEM-ben a nagyobb területekről készített EDS-spektrumok jellegzetes szennyezői (Si, P, Mn stb.), ha egyenként analizáltuk a fázisokat csakúgy, mint a TEM-ben az egyes kis méretű fázisokról készített analízisekben is, csak a ferritszemcsékben észlelhetők. A cementitben csak a Fe, C és kevés Mn jelenik meg. (A kis mennyiségű antimon ilyen lokális elemzéseit jelenleg EDS-sel nem megvalósíthatók.)

Mind a röntgen-, mind a TEM-vizsgálatok alapján arról győződhetünk meg, hogy a kerékhasználat során felkeményedett szerkezet hasonló mechanizmussal jött létre, mint amilyen folyamatok egyéb perlités szerkezetek bizonyos mechanikai kezeléseit (nagy-mértékű képlékenyalakítás (SPD), mechanikai ötvözés, koptatás stb.) során, különböző mértékben lejátszódnak [18, 19]. Az erőteljes mechanikai behatás, a plasztikus deformáció okozta szerkezetváltozás mindezeknél hasonlóképpen megy végbe. A kerék felszínén a kéregöntéssel kialakult ledeburitos-perlités szerkezet is átalakul a kerék-sín érintkezésekben fellépő mechanikai hatások (képlékeny alakítás) következtében. Bőséges irodalom foglalkozik napjaink acél vasúti kerekeinél fellépő folyamatokkal, amelyek azonban kis (<1% C), legtöbbször ~0,6-0,7% C-tartalmú, általában ötvözött anyagok. Ezek esetében is megfigyelték a felületen a mikroszerkezet és keménység változását, a folyamatokat

szimulációval is megjelenítették [20].

Néhány éve már egyes különleges célból előállított perlités anyagok nagy energiájú kezelésének kémiai folyamatait nagy érzékenységű atomszonddákkal [18] is vizsgálják. A folyamat legvalószínűbb magyarázata szerint a diszlokációsűrűség fokozatosan nő a ferritszemcsékben, a cementitek C-tartalma pedig a cementit/ferrit határon kialakuló diszlokációk segítségével egyre jobban beoldódik a ferritmátrixba. Miközben leépülnek a cementitkomponensek, egyre nagyobb cementit/ferrit fázishatár-sűrűség alakul ki, és a ferritmátrixban megnő a C-tartalom. Az intenzív mechanikai hatás következtében a határfelületeken kémiai keveredés, azaz mechanikai ötvöződés játszódik le. A felkeményedéshez hozzájárul mind a megnövekedett C-mennyiség a ferritben, mind az egyre növekedő diszlokációsűrűség [21]. Egyértelműen kimutatható volt, hogy a C-koncentráció a leépülő cementit/ferrit határokon kiugró értékeket mutatott.

A hosszú éveken át a síneken gördülő, nagy terhelésnek kitétt és a kéregöntés következtében ledeburit-perlités szövetszerkezetű Ganz-féle öntöttvas kerekek felszínén ható plasztikus deformáció is olyan hatással volt, mint az egyéb nagy energiájú alakítási módszerek, azaz szintén létrehoz egy ferrit-cementit nanokompozitot. Erre az átalakulásra a Ganz-kerék összetétele és szövetszerkezete következtében különösen alkalmas volt, összetételének nagy, 4,09% C-tartalma elősegítette a fent vázolt folyamatot, mint azt különböző széntartalmú anyagokkal végzett vizsgálatok is igazolták [22]. Ez is hozzájárulhatott ahhoz, hogy ezeknek a kerekeknek hosszabb volt az élettartama, mint a korabeli egyéb gyártmányoknak.

3. Összefoglalás

Egy ilyen komplex használati tárgy esetében, mint egy vasúti kerék, nehéz mindazokat a szempontokat, előnyeinek feltehető okait, titkait, számba venni, amelyek gazdasági sikeréhez vezettek. Több ilyen ismertünk már korábban, mindenekelőtt a konstrukció és kéregöntés szerepét, de a szakirodalom szerint azok az anyagtudományi részletek, amelyeket most tártunk fel, szintén figyelemre méltó tényezők.

Az összetételben megtalált stabilizáló hatású Sb jelenléte, a közel eutektikus szövetszerkezethez tartozó nagy C-tartalom és szerepük a használat során. Nem kérdéses azonban, hogy Ganz Ábrahám rendkívüli sikereihez mindezeket túl a szerencse is hozzájárult.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondunk *Fitos Zoltán* elnök vezérigazgatónak, aki engedélyezte a Ganz Holding Zrt. tulajdonában lévő 1867-ben készült vasúti kerékből a vizsgálatokhoz szükséges minta kivágását, és *Fekete Józsefnek* a Ganz Holding Zrt. üzemvezetőjének a mintakivágás elvégzését. Köszönettel tartozunk *Tóth Péter* laboratóriumvezetőnek (Bűnügyi Szakértői és Kutató Intézet) a kerék felületének röntgenfluoreszcens spektrométeres (XRF) vizsgálatáért.

Irodalom

- [1] Kovács L.: Ganz Ábrahám szabadalmi (német és magyar nyelven), 2007 HU ISSN 1417, 1058 Budapest, 2007, Öntödei Múzeumi Füzetek 18., továbbá Budapest Fővárosi Levéltár
- [2] Wood, N.: A practical Treatise on Railroads, and Interior Communications in General, 1st. edition, London, printed for Longman, 1828, Chap.I. and Chap., III. pp 79–82, 2nd edition 1832. A vonatkozó szabadalmakat W. Losh és G. Stephenson jegyzik.
- [3] Hartmann, C. F. A.: Lehrbuch der Eisenhüttenkunde, 2. Band, 1834, Schallenguss des Eisens, Berlin, bei August Rücker, S. 51.
- [4] Earle, Th.: A Treatise on Railroads and Internal Communications, Philadelphia, 1830, Soldby John Grigg, p 59.
- [5] Ueber Schallengussräder für Eisenbahnfahrzeuge, In: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 6. Jg. (1862) Dezember, 612.
- [6] Kovács L.: Ganz Ábrahám, Öntödei Múzeumi Füzetek 16, 2006, 17.
- [7] Wheeldon Frederick, Richard: Wolverhampton, England: Improvement in the modes of casting wheels and pinions, US 131486 A, 1872, Sept. 17.

- [8] *Henke, F.*: Spurenelemente im Gusseisen, Giesserei Praxis, 1971. Apr. 25.139–149.
- [9] *Matijasevic, S. et al.*: Ferritic Surface Layers on Gray Iron Castings, AFS Transactions, Vol. 82 (1975) 571–592.
- [10] *Narasimha Swamy, G.S. et al.*: Factors Influencing the Ferritic Layer on the Surface of Gray Iron Castings, AFS Transactions, Vol. 83 (1975)531–550.
- [11] *Aborn, R. H.*: What Antimony May Do for You in Gray and Ductile Iron? Transactions of the Amer. Foundry Soc. 84 (1976) 503–506.
- [12] *Zhe, L., et al.*: Influence of cooling rate and antimony addition content on graphite morphology and mechanical properties of a ductile iron, China Foundry, Vol. 9/2, (2012)114–118.
- [13] *Bánhegyi L.*: Ganz Ábrahám, In: Műszaki Nagyjaink II. köt. (1. kiadás 1967, 2. kiadás 1983) szerkesztette Szőke Béla, Gépipari Tudományos Egyesület kiadása, 43–89.
- [14] *Verő J., Káldor M.*: Fémtan, Tankönyvkiadó, Budapest, 1977, 143–155.
- [15] *Szekeres J.*: Ganz Ábrahám (1814–1867), Budapest, 1967, Sokszorosított a Ganz Villamosági Művek Házi Nyomdája
- [16] *Kerpely A.*: Bányászati és Kohászati Lapok III évf. 15. és 16.sz. (1870) 15–18, ismételt közlés Bányászati és Kohászati Lapok, 141. évf., 3 sz. (2008) 22–24.
- [17] Protokoll in Baumaterialienkunde, Die Entwicklung der Schalen-gussräder-Fabrikation, deren Vorteile betrifft Sicherheit und Ökonomie der Betriebe (Besuch der Teilnehmer am Budapester Kongress der Materialprüfungstechniker bei der Firma Ganz, aufgenommen 1900. jun.22.) (1901) Vol. 6, 21 sz. 331–334; 22 sz. 351–353; 23 sz. 365–368.
- [18] *Sauvage, X., Lefebvre, W., Genevois, C., Ohsaki, S., Hono, K.*: Complementary use of TEM and APT for the investigation of steels nanostructured by severe plastic deformation, Scripta Materialia, Vol. 60 (2009) 1056–1061.
- [19] *Takahashi, J., Kobayashi, Y., Ueda, M., Miyazaki, T., Kawakami, K.*: Nanoscale characterisation of rolling contact wear surface of pearlitic steel, Materials Science and Technology, Vol. 29/ 10 (2013)1212–1218.
- [20] *Molyneux-Berry, C.,- Davies, C., Bevan, A.*: The influence of Wheel/Rail Contact Conditions on Microstructure and Hardness of Railway Wheels, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, 2014, ArticleID 2097752, 16 pages, <http://dx.doi.org/0.1155/2014/209752>
- [21] *Li, Y. J., Choi, P., Borchers, C., Westerkamp, S., Goto, S., Raabe, D., Kirchheim, R.*: Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite, Acta Materialia, 59 (2011) 3965–3977.
- [22] *Ueda, M., Uchino, K., Kobayashi, A.*: Effects of carbon content on wear property in pearlitic steels, Wear, 253/1-2, (2002) 107–113.

Koszorúzás Sopronban

A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya keretében működő Anyagtudományi és Technológiai, illetve a Szál- és Kompozittechnológiai Tudományos Bizottság 2015. december 4-én a Nyugat-magyarországi Egyetem meghívására kihelyezett ülést tartott. Az ülést a két tudományos bizottság elnökei, *dr. Gácsi Zoltán* és *dr. Bárány Tamás* közösen vezették le.

Az ülést *dr. Faragó Sándor*, a Nyugat-magyarországi Egyetem rektorának köszöntője vezette be, majd *dr. Alpár Tibor*, a Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar dékánja tájékoztatta a jelenlévőket a kar helyzetéről és a közeljövőben bekövetkező változásokról.

A szakásoknak megfelelően ezután tudományos előadások kerültek sorra, amelyek a karon folyó kutatási tevékenység magas színvonaláról tanúskodtak.

Az előadások közül kiemeljük *dr.*

Alpár Tibor: Faalapú kompozitok, *dr. Dívós Ferenc*: Roncsolásmentes faanyagvizsgálat, valamint *Csóka Levente*: Multifunkcionális cellulóztermékek című anyagát.

A délelőtti szekció után a kihelyezett ülés résztvevői megkoszorúzták *dr. Verő József* emléktábláját, amelyet múlt év júniusában *dr. Szőke László* kezdeményezésére helyeztek el és avattak fel. A koszorúzáson megjelent Verő professzor legidősebb fia, *dr. Verő József* is a feleségével együtt. A koszorú elhelyezése előtt *dr. Verő Balázs* emlékezett vissza a soproni évekre. Mivel a Metallográfia Tanszék épületének falán *dr. Verő József* emléktáblája mellett professzortársa, *dr. Tarján Gusztáv* emléktáblája is el van helyezve, a visszaemlékezésben a soproni egyetem professzori karának baráti közösségéről beszélt megemlítve többek között *dr. Györfi János*, *dr. Magyar Pál*, *Tettamanti Jenő* nevét is.

A koszorút *dr. Gácsi Zoltán* és *dr. Verő Balázs* közösen helyezték el (I. kép).

Verő Balázs



■ Koszorúzás Verő József emléktáblájánál