

Bírálat

Tárgy:

Mészáros István „Egyes anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságok kapcsolatának értelmezése” című doktori értekezése.

Az értekezés mágneses roncsolásmentes eljárással meghatározható jellemzők és az anyagszerkezet tulajdonságai közötti összefüggések értelmezésével foglalkozik. A témaválasztás időszerűségét a mérnöki létesítmények, szerkezetek hosszú távú üzemeltetésének (élettartam gazdálkodásának) egyre növekvő igénye és az ezzel együtt járó egyre szélesebb körű elterjedése igazolja. A roncsolásmentes vizsgálati eljárásoknak kiemelt szerepük van az élettartam gazdálkodás terén. Nem véletlen, hogy világszerte intenzív kutató munka folyik olyan eljárások kifejlesztésére, amelyek ipari körülmények között képesek a berendezések szerkezeti anyagaiban az üzemi igénybevétel és a környezeti hatások okozta anyagszerkezeti változások (általánosságban az öregedési folyamatok) monitorozására. Az értekezésben összefoglalt kutatási eredményeket azért tartom jelentősnek, mert összhangban vannak e világméretű tendenciával és hozzájárulnak e terület tudományos ismeretanyagának a bővítéséhez.

A Jelölt – értekezésében – 132 oldalon, tizenegy fő fejezetre tagolva dolgozza fel a választott témát. Az értekezés felépítése áttekinthető, nyelvezete elfogadható, ábrái és táblázatai kifejezőek. Az értekezés 133 általános és 98 saját hivatkozást tartalmaz. A Jelölt az új tudományos eredményeit kilenc tézisben foglalja össze.

Miután a mágneses tulajdonságok mérése roncsolásmentes módon történik, az értekezés bevezetése, **1. fejezet**, értelemszerű módon elhelyezi a mágneses tulajdonságok vizsgálatát a roncsolásmentes vizsgálatok palettáján. A Jelölt a roncsolásmentes vizsgálatokat két csoportra osztja: az első csoportba a hibakereső vizsgálatokat (*Nondestructive Testing, NDT*), a másodikba a szövet-, illetve hibaszerkezet vizsgálatokat (*Nondestructive Evaluation, NDE*) teszi. Az értekezés szintjén elfogadható ez a csoportosítás, de meg kell jegyezni, hogy az elterjedt terminológia az NDT-t és az NDE-t a roncsolásmentes vizsgálat egy-egy területeként (bizonyos értelemben fejlődési fokozataként) definiálja. Az NDT elsősorban a minőségellenőrzési célokat szolgáló roncsolásmentes vizsgálatot takarja (*Quality Control Nondestructive Testing, QC NDT*), míg az NDE a kvantitatív roncsolásmentes vizsgálatot (*Quantitative Nondestructive Evaluation, QNDE*). Az utóbbit a biztonságos élettartamra (*safe life*) történő méretezési eljárást a törésmechanika elterjedésével felváltó hibatűrő (*damage tolerance*) tervezési koncepció megjelenése hívta életre évtizedekkel ezelőtt. Mind az NDT mind az NDE jellemzően „hibakereső” vizsgálat. A roncsolásmentes vizsgálaton belül, mint annak egy fontos területe, természetesen ismertek az anyagszerkezet roncsolásmentes jellemzésére szolgáló eljárások is (*Nondestructive Materials Characterization*).

Az értekezés **2. fejezete** a célkitűzéseket foglalja össze. A Jelöltnek négy alapvető célkitűzése volt:

- (1) a mágnesezési görbék leírása,
- (2) a mágneses méréskiértékelési eljárások fejlesztése, valamint a kapott eredményeinek két konkrét validálási kísérlet sorozattal történő igazolása, azaz
- (3) melegszilárd acélokban a növelt hőmérsékletű üzemeltetés során végbemenő károsodási folyamatok, illetve szerkezeti változások vizsgálata és
- (4) egyes mágnesezhető ötvözetekben lezajló fázisátalakulási folyamatok anyagszerkezettani hátterének a vizsgálata és értelmezése.

A célkitűzések világosak és elfogadhatók. Mégis hiányérzetem van abban a tekintetben, hogy nem előzte meg a célok rögzítését egy szakirodalmi áttekintés, amely kritikailag értékelte volna a kutatott tudományterületet, azonosította volna azokat a foltokat, ahol fellelhető tudáshiány, majd erre építve, azaz a létező tudáshiány csökkentését, esetleg megszüntetését megcélózva fogalmazódtak volna meg a célok.

Az értekezés **3. fejezetében** a Jelölt bemutatja azokat a mágneses mérés technikai és metodikai eljárásokat, amelyeket kifejlesztett vagy továbbfejlesztett (optimalizált), illetve alkalmazott több évtizedes kutató munkája során. A bemutatott technikák és eljárások meggyőző módon igazolják a Jelölt széleskörű tevékenységét a mágneses roncsolásmentes vizsgálatok területén. A bemutatott eljárások közül a fémhabok vizsgálatához alkalmazott örvényáramú vezetőképesség mérés a későbbiekben nem jelenik meg az értekezésben, így az értekezés szempontjából irreleváns; feltüntetését feleslegesnek tartom.

A **4. fejezetben** olvasható az értekezés tárgyát képező mágneses elméleti kutató munka lényegi része. A Jelölt először összefoglalja az anyagok mágneses viselkedésével és a mágneses hiszterézis jelenséggel kapcsolatos, valójában már ismert alapokat (4.2 alfejezet). Miután az értekezés a mágneses és az anyagszerkezeti tulajdonságok kapcsolatának értelmezéséről szól, ezért itt indokoltnak tartottam volna egy, a mágneses tulajdonságokkal foglalkozó résszel egyenszilárdságú anyagszerkezeti rész beillesztését. Ez később (az 5. és a 6. fejezetben található diszkussziókban) jó hivatkozási alap lehetett volna.

Ugyancsak a 4.2 alfejezetben tekinti át és elemzi a Jelölt a mágnesezési görbék műszaki szempontból legfontosabb modelljeit, úgymint a mikrofizikai, az energetikai és a makroszkopikus (vagy fenomenologikus) modelleket. Az utóbbi modellcsoportot tartja a leghasználhatóbbnak mérnöki alkalmazásokhoz. A makroszkopikus modellek egyike az oxfordi Takács Jenő által bevezetett $T(x)$ modell, amely az irreverzibilis mágnesezési folyamatot $\tanh$ függvényekkel közelíti. A mágnesezési görbe modellek elemzéséből Jelölt azt a következtetést vonja le, hogy minden modellnek és azok gyakorlati esetekre történő alkalmazhatóságának vannak korlátai. Ez tette szükségessé – véleménye szerint – új hiszterézis modell megalkotását, ami az általa kidolgozott többfázisú hiperbolikus (*Multiphase Hyperbolic, MH*) modell. Hiányolom annak részletesebb kifejtését, hogy mik voltak a modellek említett korlátai (különös tekintettel a $T(x)$ modellre).

A 4.3 alfejezet első részében részletes ismertetésre kerül az MH modell. A Jelölt bemutatja az MH modell egyenleteit két mágneses elemet tartalmazó rendszer esetére is. A modell ugyanis alkalmazható eltérő mágneses viselkedésű térfogatrészek (ún. mágneses elemek) szétválasztására. Ugyanebben az alfejezetben található meg az MH modell tesztelésének eredményei, amelyek – tekintettel a minták elegendően nagy számára – meggyőzőek. A

validálás további területe a mágneses elemek szétválasztása volt. Ehhez a Jelölt hat eltérő mágneses tulajdonságú ötvözetet (öt eltérő kémiai összetételű és/vagy eltérő hőkezeltőségű, illetve hidegen hengerelt acél mintát és egy nikkelbázisú ötvözet mintát) használt. Az ismert keresztmetszetű lemezmintákból különböző kombinációban rétegzett mintákat állított elő. Az elvégzett mérések jó egyezést mutattak az MH modell hiszterézis görbéiből számolt értékekkel. A bemutatott eredmények alapján számomra nem vált világossá, hogy az eltérő mágneses elemek térfogatarányának ismerete hiányában is végrehajtható-e a bemutatotthoz hasonló megbízhatósággal a dekompozíció. Lehetséges, hogy az illesztési paraméterek részletesebb magyarázata erre választ adott volna.

A dekompozíciós eljárásnak akkor lehet valódi jelentősége, ha nem a validáláshoz alkalmazott, makroszkopikus méretű lemezrétegek dekompozícióját végezzük el vele, hanem egy adott ötvözetben ismeretlen térfogatarányban előforduló fázisokét és/vagy szövetelemekét (pl. hosszú ideje üzemelő szerkezet anyagában bekövetkező változások követése mágneses tulajdonságok helyszínen történő mérése segítségével). Ebben az esetben a keresett mágneses elemek mikroszkopikus kiterjedésűek, ami több nagyságrend eltérést jelent a validálási esethez képest. Kérem, hogy a Jelölt ismertesse, hogy mennyire befolyásolja az eljárás alkalmazását a mágneses elemek térbeli kiterjedése? A validálás két mágneses elemre terjedt ki. Ezzel kapcsolatos kérdésem az, hogy kettőnél több mágneses elem esetén is alkalmazható-e a modell?

A 4.3 alfejezet további részében a Jelölt az MH modell, illetve az arra épített MBDE (*Model Based Data Evaluation*) értékelési eljárás segítségével igazolja, hogy a valóságban előforduló mérési körülmények között, azaz a gerjesztő mágneses járom és a vizsgálandó darab közötti, ellenőrizetlen méretű légrés esetén, a légrés méretének hatása kiküszöbölhető (az igazolás max. 0,8 mm légrés méretig történt, lásd a 4.11. ábrát). Az igazoláshoz a Jelölt különböző keménységű hőkezelt ötvözetlen acél mintákat használt.

Az értekezés **5. fejezete** erőművekben alkalmazott melegszilárd acélok mágneses tulajdonságainak alakulását mutatja be az üzemi igénybevétel okozta jellemző károsodási módok hatására. A fejezet első részében (5.1 alfejezet) a Jelölt összefoglalja a hőfáradás és a kúszás mechanizmusát, illetve röviden tárgyalja a két károsodási forma egyidejű jelentkezése esetén lejátszódó fémtani folyamatokat is.

Négy hőfárasztó sorozatot végzett; ezek közül hármat egy hőfárasztó célberendezésen, a negyediket egy termomechanikus szimulátoron (Gleeble 3800); az eredményeket az 5.2.1 alfejezet ismerteti. A célberendezésen az előre meghatározott tönkremenetelhez (azaz élettartamhoz) képest különböző szintig fárasztott mintákon különböző mágneses tulajdonságokat (koercitív tér, Barkhausen zaj, mágneses anizotrópia) mért, és alkalmazta az MH modellt, illetve az MBDE értékelést. A mágneses mérések eredményei egyezést mutattak a ciklikus igénybevétel hatására lejátszódó, ismert fémtani (diszlokációs, illetve repedéskeletkezési) folyamatokkal. A Jelölt igazolta, hogy az MH modell α_1 illesztő paramétere alkalmas a hőfáradás során lejátszódó anyagszerkezeti változások leírására. Az egyezést alátámasztják a transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatok bemutatott eredményei.

A negyedik mérési sorozat mintáin a Jelölt egy nagyérzékenységű mérési elrendezéssel a nemlineáris felharmonikusokat mérte, amivel nyomon kívánta követni a fáradási folyamat előrehaladásával együtt járó fémtani változásokat. A Gleeble 3800 szimulátoron igen jól vezérelhető és regisztrálható a fáradási folyamat valamennyi paramétere, ezért itt célszerűnek

tartottam volna megadni legalább a ciklusonkénti alakváltozás amplitúdót, mint az igénybevétel jellemzőjét. Ennél a mintasorozathoz is különböző ciklusokig történt a fárasztás, de – ellentétben az első három mintasorozattal – nem derül ki, hogy a megjelölt 250, 500, 750 és 1000 ciklus hogy aránylik a tönkremeneteli ciklusszámhoz. Hiányolom, hogy a Jelölt nem adja meg pontosan, hogy a próbatest mely részéből származnak az 5.11 ábrán bemutatott szövetképek csiszolatai.

A Jelölt a negyedik mérési sorozat mintáin a nemlineáris felharmonikusok mérésének egy általa továbbfejlesztett változatát, az ún. adaptív nemlineáris felharmonikusok módszerét (ANLH) alkalmazta. Megállapította, hogy a mért felharmonikusok közül különösen az 5. és a 7. felharmonikus paraméterei mutattak korrelációt a fáradási folyamattal. Az értekezés az ANLH módszerrel kapcsolatosan egy – publikálás alatt álló – cikkre hivatkozik. Végzett-e a Jelölt kísérlet sorozatot nagyszámú, különböző mágneses tulajdonságú (eltérő kémiai összetételű, hőkezeltsgű) mintával, hogy felmérje az ANLH módszer teljesítőképességét?

Az 5.2.2 alfejezet a kúszási károsodás folyamán lejátszódó változások mágneses jellemzésével foglalkozik. A Jelölt koercitív tér és Barkhausen zaj mérési eredményeket, valamint normál mágnesezési görbéket mutat be. Bevezetett továbbá egy szerkezet érzékeny mágneses jellemzőt (Θ), amelyet az MH modellel közelített hiszterézis görbéből számolt ki. Θ változása a kúszás előrehaladásával összefüggésbe volt hozható a kúszási folyamat jól ismert szakaszaival. Az eredményeket ebben az esetben is igazolták a TEM vizsgálatok eredményei.

Az értekezés **6. – legterjedelmesebb – fejezete** képlékeny alakváltozás és hőkezelés hatására végbemenő fázisátalakulási folyamatok mágneses jellemzésével foglalkozik. Ehhez Jelölt TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) acélból és háromféle korrózióálló acélból (ausztenites, szuperduplex és lean-duplex) készített mintákat választott. Ezek az acéltípusok jól reprezentálják a korszerű járműgyártásban és a komplex létesítményekben (pl. erőművek, vegyiművek) napjainkban alkalmazott, illetve fejlesztés alatt álló szerkezeti anyagokat. A 6. fejezet egyes alfejezetei tankönyvszerűen áttekintik az előzőekben említett acélok legfontosabb tulajdonságait. Szerencsés lett volna a TRIP acélok bemutatása esetében ábrát is közölni. Az ausztenites korrózióálló acélok ismertetésében különösebb indoklás nélkül jelenik meg a lyukkorrózióval szembeni ellenállással kapcsolatos PREN mérőszám. Megjegyzem, hogy a rövidítés magyarázata helyesen *Pitting Resistance Equivalent Number*, ellentétben az értekezésben írottal.

A Jelölt a különböző mértékben alakított TRIP acél mintákon az MH modell, illetve az MBDE értékelési módszert alkalmazva megállapította a különböző szövetelemek / fázisok relatív térfogat arányát. A mágneses méréssel kapott eredményeket EBSD vizsgálatokkal is igazolta. Következtetéseket vont le az alakítás eredményeként bekövetkező martenzites átalakulás kinetikájára, valamint a szilárdságnövelés okára nézve.

Az ausztenites szerkezetű korrózióálló acél mintákon végzett kísérletek érdekes eredménye volt, hogy a koercitív tér nem mutatott monoton növekedést az α' martenzit tartalom képlékeny alakítás függőségéhez hasonlóan, hanem egy adott érték felett (19 tf% martenzit) állandó értéket vett fel. A jelenségre az értekezésben nem találtam magyarázatot. A Jelölt összehasonlította a hengerlés és a szakítógépen létrehozott nyújtás előidézte martenzites átalakulás eredményét és arra a következtetésre jutott, hogy a hengerlés általa „komplex” képlékeny alakváltozásnak nevezett folyamata lényegesen nagyobb α' fázist hoz létre, mint az egytengelyű húzás. A jelenségre azt a magyarázatot adta, hogy a keménység növekedésében a martenzites átalakulás mellett részt vesz a diszlokáció sűrűség növekedés is.

A szuperduplex korrózióálló acél mintákon végzett kísérletekkel Jelölt a ferrit bomlásának körülményeit vizsgálta különböző hőkezelések hatására. AC- és DC-, valamint rezgőminta magnetométerrel végzett kísérleteket. Meghatározta a ferritbomlás (termikusan aktivált folyamat) aktiválási energiáját; megállapította, hogy a hőkezelést megelőző képlékeny hidegalakítás gyorsítja a ferrit bomlását és a σ fázis precipitációját, de adott értéket meghaladó alakíttottság (a vizsgált esetben ez 65% volt) már nem növeli a bomlás sebességét. A lean-duplex acélok mágneses tulajdonságainak vizsgálata azt mutatta, hogy alakítási martenzit csak bizonyos mértékű képlékeny alakítás elérését követően jelenik meg (a vizsgált esetben ez 30% volt), majd lezajlik a teljes ausztenit hányad átalakulása. A 30% alatti képlékeny alakítás alatt a ferrit szemcsék deformációja (a diszlokáció sűrűség növekedése) okoz keménység növekedést és ezzel együtt járó koercitív tér növekedést.

A **7. fejezet** (Összefoglalás) nem tartalmaz új információt a 4., az 5. és a 6. fejezet végén található összefoglaló alfejezetekhez képest, tulajdonképpen az ott írtak szinte szó szerinti ismétlése.

Az értekezésben foglalt tudományos eredmények általános értékét nem csökkentve, szükségesnek tartom felhívni Jelölt figyelmét a következő hiányosságokra:

- Az értekezés nyelvezete nem mindenütt felel meg a magyar nyelv szabályainak. Több esetben mellékmondat alkalmazása helyett új mondat kezdődik; előfordulnak nyelvtani hibák, elütések és indokolatlan szóismétlések; néhány táblázatban tizedes vessző helyett tizedes pont van. Ezek a hiányosságok a magyar nyelvtan következetes alkalmazásával, a szöveg gondos átolvasásával és a nyelvtani ellenőrző program bekapcsolásával egyszerűen kiküszöbölhetők lettek volna.
- A 4.1 alfejezet negyedik francia bekezdésében nyúlás amplitúdó helyett feszültség amplitúdó írandó.
- Az 5.21 ábra szövegében a hőfárasztott kifejezés helyett kúsztatott írandó.
- Több helyen megjelenik a szénacél kifejezés. Ilyet az MSZ EN 10020:2001 szabvány (Acélminőségek fogalom meghatározásai és csoportosítása) nem ismer. Helyette ötvözetlen acél írandó.
- Következetlen a 6. fejezet számozása, mert hiányzik a 6.1.1 alfejezet.
- Első sorban a 6. fejezetben, helyenként keveredik a fázis és a szövetelem fogalom.
- A 6.6 és a 6.8 ábrák szövege angol nyelvű; elegánsabb lett volna a magyar szövegezés. A 6.6 ábra tengelyein szerepelő Cr- és Ni-egyenérték képletekben az egyes ötvözőelemek együtthatói nem egyeznek meg a szövegben írt együtthatókkal.
- A 6.2.1 alfejezetben AISI 306 helyett feltehetően AISI 304 írandó. Ugyanitt a 6.4 táblázatban célszerű lett volna megadni a minta karbon tartalmát is.
- A 77. oldalon található [121] hivatkozás a 81. oldalon az összefoglalás ugyanazon (megismételt) mondatában: [120]. Nyilván csak az egyik hivatkozás a helyes.

Továbbá nem tudok elmenni egy szóhasználat és egy látszólag terminológiai, de a valóságban tartalmi pongyolaság mellett:

- A bevezető fejezetben megjelenik és később az értekezésben központi szerepet játszik az anyaggárosodás fogalma. Ezt Jelölt jellemzően „leromlás”-nak nevezi (de e mellett olvasható az értekezésben degradáció, károsodás, elhasználódás és elhasználódottság is). A „károsodás” kifejezés alkalmazását tartom helyesnek.
- Az 1. fejezet bevezeti a roncsolásmentes vizsgálat kulcsfontosságú fogalmát, a „hibát”. Akkor járunk el helyesen, ha mindaddig anyagfolytonossági hiányról beszélünk, amíg azt

jogszabály vagy szerződés által hivatkozott szabvány, kód, előírás, stb. alapján nem minősítjük, és a minősítés eredményeként a nem megfelelő kategóriába nem soroljuk. Kisarkítva: a folytonossági hiány műszaki, a hiba jogi kategória. Javaslom a „folytonossági hiány” és „hiba” kifejezések ennek megfelelő következetes alkalmazását.

Tézisek:

Az értekezés **8. fejezete** tartalmazza Jelölt új tudományos eredményeit, kilenc tézisben megfogalmazva.

- Az **1. tézist elfogadom** az értekezésben közölt formájában.
- A **2. tézist** nem tekintem tudományos eredménynek, hanem az 1. tézisből következő méréstechnikai, illetve kiértékelési eljárásnak, **ezért nem fogadom el.**
- A **3., 4. és 5. tézist elfogadom** az értekezésben közölt formájukban.
- A **6. tézist elfogadom.** Az elfogadás feltétele, hogy Jelölt oszlassa el a jelen bíráló 3. oldalának első bekezdésében jelzett bizonytalanságomat.
- A **7., 8. és 9. tézist elfogadom.**

Összegezve:

A Jelölt hosszú időn keresztül szisztematikus kutatómunkát végzett a fémes anyagok mágneses tulajdonságainak roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal történő megismerése és a mágneses tulajdonságok és az anyagszerkezet, illetve az anyagban alakítás és/vagy hőkezelés hatására végbemenő átalakulások közötti összefüggések feltárása és értelmezése területén. Mágneses méréstechnikai és módszertani fejlesztései eredményeként laboratóriumi eszközparkot és módszereket hozott létre, amelyek ígéretesek lehetnek ipari alkalmazási körülmények között is. Eredményeit doktori értekezésben foglalta össze, amely megítélésem és ismereteim szerint hiteles adatokat tartalmaz.

Mindezek alapján javaslom Mészáros István MTA doktori értekezésének nyilvános vitára bocsátását.

Bicske, 2015. 01. 05.

Dr. Trampus Péter
az MTA doktora