

Bírálat

Mészáros István okl. villamosmérnök

„Egyes anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságok kapcsolatának értelmezése”
című értekezéséről

Mészáros István okl. villamosmérnök „Egyes anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságok kapcsolatának értelmezése” címmel nyújtotta be értekezését az MTA doktora cím elnyerése érdekében.

Az értekezés témáját tudományos szempontból előremutatónak ítélem, hiszen a roncsolásmentes anyagvizsgálat módszereinek a már eredetileg is ferromágneses illetve valamely külső hatásra részben ferromágnesessé váló anyagok szövetszerkezeti szinten bekövetkező változásának nyomonkövetésében újszerű megközelítéseket igényelt, és az elvégzett kísérleti és modellezési tevékenység jelentős mértékben hozzájárult a degradációs (károsodási) és fázisátalakulási folyamatok egyes részleteinek tisztázásához.

A téma aktualitását az is aláhúzza, hogy a kidolgozott mérési és értékelési eljárásokkal ipari körülmények között is, vagyis folyamatukban követhetők a károsodási folyamatok.

Az értekezés a formai követelményeket lényegében kielégíti. Jelölt különös gondot fordított a szakirodalmi adatok precíz megadására, a saját és a hivatkozott irodalmak egyértelmű jelölésére. A közölt diagramok egyértelműen értelmezhetők, a megértést jól támogatják a Mellékletben közölt képernyő képek és szövevképek. Az értekezésben néhány angol feliratú ábra is szerepel, bár ezek a megértést nem zavarják, de célszerű lett volna az egységesség kedvéért az ábrákat magyar feliratokkal ellátni.

Az értekezés szövege jól érthető, helyenként azonban betűhibák is előfordulnak és írásjelek hiányoznak (például a 3. oldalon: „Alkalmazott”). Az értekezésben használt jelölések, rövidítések felsorolását célszerű lett volna a fogalom definiálásával, körülírásával is kiegészíteni, illetve az egyes mennyiségek mértékegységét is megadni. A jelölések, rövidítések felsorolása nem teljes körű.

Megítélésem szerint az értekezésben bizonyos részek – ha nem is szó szerint – de tartalmilag többször is szerepelnek. Az ismétlődő részek esetleges elhagyása vagy más szempontok szerinti megfogalmazása a 132 oldal + függelék terjedelmű dolgozat javára vált volna. Az egyes méréstechnikai fejlesztés eredményeinek ismertetésekor felsorolja például, hogy az adott módszert milyen anyagok és milyen jelenségek vizsgálatakor alkalmazza, majd a károsodási és fázisátalakulással kapcsolatos vizsgálatainak ismertetésekor ismételtelen közli az alkalmazott vizsgálati módszert. Hasonló jellegű ismétlést jelent az egyes fejezetekben ismertetett eredmények szinte változtatás nélküli megismétlése a 7. fejezet Összefoglalásában.

Az értekezés felépítése hűen jellemzi Mészáros István okl. villamosmérnök műszerfejlesztői, modellalkotói tevékenységét és fémtani kutatásainak vonulatát. Ezt tükrözi az értekezés felépítését összefoglaló rész is. A részletek mellőzésével az értekezés három nagyobb egységre tagolódik, nevezetesen:

- A mágneses mérések méréstechnikai fejlesztése;
- A mérési eredmények értelmezése, a mágnesezési görbe modellezése;
- Szerkezeti acélokban lejátszódó károsodási és TRIP, illetve saválló acélokban lejátszódó fázisátalakulási folyamatok nyomon követése mágneses és fémtani vizsgáló módszerekkel.

Ez a felépítés Jelölt szempontjából érthető, a bíráló szemszögéből is elfogadható. Mégis úgy érzem, szerencsésebb lett volna az önmagában színvonalas, számos új tudományos megállapítást tartalmazó munkát az értekezések klasszikus felépítése szerint összeállítani.

Az adott szerkezetben Jelölt nem vezeti rá a bírálót, olvasót a célkitűzésekre, nem világos, hogy ezek a célkitűzések mi alapján fogalmazódtak meg. A klasszikus felépítés szerint a célkitűzés általában a vonatkozó szakirodalom értékelése után következik, és a szakirodalomban található ellentmondások, problémák megoldásának szándékát célszerű a célkitűzésben megfogalmazni.

Ettől a kritikai megjegyzéstől függetlenül – ugyanúgy, ahogy az értekezés felépítését – a célkitűzéseket is elfogadhatónak illetve reálisnak tartom, és a célkitűzésben megfogalmazott (lásd 7, 8. oldal) egyes területek mindegyikére tudományos eredmények elérésével válaszolt Jelölt.

Mielőtt Mészáros István okl. villamosmérnök értekezésének tartalmi ismertetésére és egyben bírálatára rátérnék, megemlítem, hogy a fejezetek decimálszámozása nem konzekvens, illetve nem szokás olyan fejezetcímet megadni, amelyet nem követ szöveges rész (lásd például az 1. szerinti bevezetést).

Az 1.1. fejezetben a szerző a roncsolásmentes anyagvizsgálati módszereket tekinti át, és ezek között kijelöli a mágneses vizsgálati módszerek két típusának helyét, az ún. hibakereső (NDT) és a szövetszerkezeti változások kimutatására alkalmas (NDE) eljárások alkalmazási területét. Ez utóbbi esetet azzal jellemzi, hogy az NDE eljárások egy részében nemcsak a külső gerjesztésre adott választ, hanem a gerjesztés és az arra adott válasz kapcsolatát is mérjük illetve értékeljük. A mágneses NDT és NDE módszerek egyre növekvő jelentőségét szakirodalmi adatok számszerű feldolgozása révén mutatja be.

A Bevezetés kulcsmondata véleményem szerint a következő: „Megítélésem szerint csak akkor használhatjuk fel anyagvizsgálati célokra a makroszkópikus anyagtulajdonságok és a mágneses jellemzők közötti összefüggést, ha megértjük ezek közös anyagszerkezettani, fémtani hátterét”. Jelölt tudományos eredményeinek megítélésakor lényegében azt kellett tehát vizsgálnom, hogy ez a törekvés milyen mértékben teljesült munkássága eredményeképpen.

Hiányolom, hogy az NDT/NDE módszerek alkalmazhatósági körének bemutatásakor csak a károsodási folyamatokat veszi figyelembe, de nem utal pl. a fázisátalakulás során lejátszódó folyamatokra. Az 1.2. fejezetben mutatja be a szerző dolgozatának felépítését, amellyel kapcsolatban már kifejtettem véleményemet az előzőekben. A hét fejezetre tagolt értekezés egyes, a kísérleti eredményeket bemutató fejezetei azonos felépítésűek, az egyes fejezetek rövid irodalmi áttekintéssel kezdődnek, majd a vizsgálati eredményeket közli Jelölt.

Az eredmények értékelése után – szinte tézisszerűen – összefoglalja megállapításait. Ez a tárgyalási mód kissé töredezetté teszi az értekezést, talán célszerűbb lett volna például egy olyan átfogó irodalmi áttekintést adni, hogy az acélokban lejátszódó fémtani folyamatok közül előreláthatóan melyik folyamatok és miért vizsgálhatók mágneses módszerekkel. Jelölt értekezésének felépítése miatt bírálatom a szokásosnál nagyobb terjedelmű.

A 2. fejezetben fogalmazza meg Jelölt a célkitűzéseit, amelyek összhangban vannak az adott szakterület nemzetközileg elfogadott trendjével. Ahogy azt már kiemeltem, az értekezés alapvető célja az acélok szövet- és hibaszerkezete, valamint azok mágneses tulajdonságai közötti kapcsolat vizsgálata, továbbá a vizsgálati eredmények értelmezése, tudományos megállapítások megfogalmazása volt.

Tematikailag három területre koncentráltak Jelölt vizsgálatai, nevezetesen a hő hatására és/vagy képlékeny alakítás hatására bekövetkező fázisátalakulásokra, illetve egyes melegsziárd acélokban az üzemeltetés során lejátszódó károsodási folyamatok kutatására. Ezeknek a céloknak az eléréséhez ki kellett fejleszteni a mágneses vizsgálati technikákat, illetve a mért mágnesezési görbék elemzési módszereit. Mészáros István okl. villamosmérnök doktori értekezésének célja tehát három, egymással szorosan összefüggő szintből épül fel.

Az értekezés következő nagyobb egysége (3. fejezet) a mágneses mérés technikai és metodikai fejlesztésekről számol be. Ezekkel a fejlesztésekkel Jelölt egy sokoldalú vizsgálatokra alkalmas

mágneses laboratóriumot hozott létre a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén. A megvalósított AC magnetométert, a rezgőmintás magnetométert (PMVSM), a korszerűsített DC magnetométert kutatói és oktatói munkájában széleskörűen és sikeresen alkalmazta.

A Jelölt által kifejlesztett rezgőmintás magnetométer működése lényegesen eltér a szokásos megoldásoktól, hiszen a minta a mágneses tér erővonalával párhuzamosan rezeg. Ennek az elrendezésnek számos előnyét sorolja fel Jelölt. A kifejlesztett PMVSM berendezést a habitusvizsgálat során az ATTB alkotásként ismerte el.

A kifejlesztett AC, DC és PMVSM magnetométerek a korszerű mérés technikai követelményeket messzemenően kielégítik, vonatkozik ez az elektronikai megoldásokra és a számítógépes megjelenítésre és kiértékelésre is. Ebben a munkában Jelölt jól kamatoztatta villamosmérnöki képzettségét.

A 3.4. fejezetben a Barkhausen zaj mérésére kifejlesztett eszközt ismerteti Jelölt, amely alkalmas a zajjal statisztikai kiértékelésre is. Ennek a mérés technikai fejlesztésnek a kapcsán tárgyalja Jelölt a zaj keletkezésének mechanizmusát, a doménfalak reverzibilis és irreverzibilis mozgását. A doménfalak mozgása az irreverzibilis szakaszban korlátozott, ugrásszerű módon történik, és minden egyes ugráshoz egy-egy zajesemény rendelhető hozzá.

Szerencsés lett volna a mágneses doménszerkezetről bővebb információt adni, véleményem szerint itt ismét az értekezés szokásostól eltérő felépítésének következményeivel találkozunk. Nem világos számomra, hogy a 3.5. fejezetben szereplő örvényáramú vezetőképesség mérési módszere az értekezésben bemutatott eredményekhez hogyan kapcsolódik, a későbbi fejezetekben ilyen mérésekről nincs szó.

A különböző mágneses módszerek teljesítőképességének megítélését megkönnyítette volna egy összefoglaló táblázat, amelyben összehasonlítási alapul a piacon elérhető berendezések adatai is szerepelnek. Szívesen olvastam volna néhány adatot az adott berendezéssel vizsgálható minták méreteiről, a mintákkal szemben támasztott követelményekről.

Jelölt a 3. fejezetet – amely mérés technikai és mérés metodikai fejlesztések eredményeivel foglalkozik – az ún. mágneses adaptív teszt (MAT) ismertetésével zárja. A MAT során lemágnesezett állapotból kiindulva határozzák meg a mágneses hiszterézis alhurkokat. Az így kapott jól definiált adattömegből egy szoftver segítségével választják ki azt a mágneses jellemzőt, amely legérzékenyebben és jól reprodukálhatóan tükrözi vissza az anyagokban lejátszódó szövet- és hibaszerkezeti változásokat.

A MAT módszer lényegében I. Tomas és Vértesy G. illetve Vértesy Gábor (lásd a 40. és 41. hivatkozást) eredménye, melyet Jelölt továbbfejlesztett, illetve későbbi fejezetekben ismertetett vizsgálatai során széleskörűen alkalmazott.

Kérem Jelöltet, hogy a Vértesy Gábor és szerzőtársa által publikáltakhoz képest egyértelműen adja meg a MAT továbbfejlesztésében elért eredményeit. Arra is választ kérek, hogy miért szükséges a nagyszámú mérési adat közül egy saját fejlesztésű szoftverrel kiválasztani a jelenséget legjobban leíró mágneses jellemzőt, ha eleve kijelentjük, hogy az alhurkok mérésekor a mágneses permeabilitást mérjük.

Az értekezés egészének ismeretében úgy gondolom, hogy a 3.7. alfejezetet szerencsésebb lett volna a mágnesezési görbe modellezésével foglalkozó fejezetbe integrálni.

A 4. fejezet képezi az értekezés egyik súlypontját, ebben a fejezetben ugyanis Jelölt a mágnesezési görbe modellezésével foglalkozik. Ebben a fejezetben a többfázisú hiperbolikus modell (MH-modell) fejlesztésével és validálásával kapcsolatos eredményeket ismerhetjük meg. Ez a fejlesztés kettős célú: Jelölt alkalmassá kívánja tenni a mágneses módszert heterogén szövetű mintákat alkotó

fázisok térfogatarányának meghatározására (Jelölt megfogalmazása szerint fázisanálízisére), továbbá az egyes mágneses elemek mágneses jellemzőinek egyedi meghatározására, és az eljárást mérőfej- és légrésfüggetlenné is kívánja tenni.

A hiszterézis jelenségének általános megfogalmazásából kiindulva a továbbiakban a mágnesezési görbék lehetséges típusairól (B-H, M-H) kapunk áttekintést.

A mágnességről mint fizikai jelenségről szóló részt szívesebben olvastam volna az értekezés elején, és azt is helyénvalónak tartottam volna, ha ez bővebb terjedelmű. A szövetszerkezeti és hibaszerkezeti – főleg azonban ez utóbbi – változások és a mágneses jellemzők közötti kapcsolat feltárása ugyanis feltételezi a mágnesség atomi szintű értelmezését, különösen ferromágneses anyagokban. Értelmezni kellett volna a kicserélődési kölcsönhatás fogalmát, és a doménfal jellegéről is szólni kellett volna.

Lényeges az a megkülönböztetés, ami a mágneses módszerekkel meghatározható jellemzőket szerkezettől független és attól függő, extrinsic és intrinsic jellemzőkre bontja.

A remanens indukció (B_r), a koercitív tér értéke (H_T), a relatív permeabilitás (μ_r) és a mágnesezési görbék alakja extrinsic jellemzők, így érthető, hogy az értekezésben extrinsic jellemzők változásának vizsgálata áll a középpontban.

Ezen a ponton definiálja Jelölt a normál mágnesezési görbe fogalmát, illetve kitér a meghatározásának módjára is. Ez a centrál minor hurkok csúcspontjait összekötő görbe.

Lényeges a szövetszerkezeti és hibaszerkezeti változások mágneses módszerrel való nyomonkövethetősége szempontjából a normál és a hiszterézismentes mágnesezési görbe helyes értelmezése, hiszen ez utóbbiak a mágnesezettség egyensúlyi állapotát jellemzik, míg a normál görbe a doménfalak akadályozott mozgása miatt nem egyensúlyi mágnesezettségi állapotot jellemez. Ezt az eltérést jól tükrözi a 4.4. ábra diagramja.

A normál mágnesezési görbe tehát extrinsic mágneses jellemző, és így meghatározásával az anyagszerkezeti változások jól követhetők. A hiszterézis jelenségek leírására szolgáló különböző megközelítési szintű módszerek ismertetése a fejezet hasznos kiegészítője, de ismételten csak arra tudok utalni, hogy ezt a részt is egy, a mágneses jelenségekről szóló irodalmi áttekintésben kellene szerepeltetni.

A mágneses hiszterézis jelenségének leírására szolgáló modelleket három csoportba osztja, nevezetesen

- a mikrofizikai
- az energiatikai és
- a makroszkópikus

modellek csoportjába.

Jelölt megállapítja, hogy a műszaki alkalmazásokhoz a viszonylag jól illeszthető makroszkópikus modellek alkalmasak, amelyek segítségével a mérhető fizikai mennyiségek és a szövetszerkezeti jellemzők között keresünk kapcsolatot. A makroszkópikus modellek a ferromágneses anyagok viselkedését nagyszámú, kétállapotú operátor segítségével írják le.

A $T(x)$ modellnek – amely a makroszkópikus modellek közé tartozik – az az alapgondolata, hogy bármely hiszterézishurok előállítható a hiszterézismentes görbe egyidejű, α_i vízszintes és β függőleges szimmetrikus eltolásával.

Mivel a $T(x)$ típusú modellek a hiszterézishurkot zárt alakú matematikai összefüggésekkel írják le, kiinduló pontként az értekezés (2) összefüggése szolgál, amelynek első tagja – amely lineáris kapcsolatot ír le – a reverzibilis, míg a második tagja az irreverzibilis mágnesezési folyamatokat írja le tangens hiperbolikus függvény segítségével és három illeszkedési paraméter figyelembe

vételével.

A mágnesezési görbe (2) szerinti felírása szükségessé tette a reverzibilis és irreverzibilis mágnesezési folyamatok értelmezését. A doménfalak kismértékű elmozdulása és a doménfalaknak a mozgásukat gátló akadályoktól való leszakadása jelenti a mágnesezési jelenségek előbb említett két típusát.

A $T(x)$ típusú modellek tehát szükségszerűen tartalmazzák a reverzibilis és az irreverzibilis mágneses jelenségek leírására szolgáló tagot vagy tagokat. Mivel a doménfalak különböző „erősségű”, típusú akadályokkal léphetnek kölcsönhatásba, az irreverzibilis jelenségek leírására célszerűnek tartotta Jelölt több tag figyelembe vételét is. Az eredeti $T(x)$ modell lényeges módosítását a reverzibilis jelenséget leíró lineáris tagnak tangens hiperbolikus taggal való kiváltása jelenti.

Ezzel kapcsolatban kérem Jelöltet annak bemutatására, hogy fizikailag miért tartja indokoltnak a tangens hiperbolikus függvény bevezetését, bár Jelölt a 25. oldalon erre vonatkozóan kvantummechanikai alapon nyugvó értelmezést. ad.

A lineáris kapcsolatnak a $\tanh$ függvénnyel való helyettesítése vezetett el az MH modellhez, amelynek részletes bemutatása és validálása az értekezés legfajszínűsőbb része. Jelölt előjáróban megjegyzi, hogy az általa kifejlesztett modell nagyon alkalmasnak bizonyult arra, hogy szét lehet választani a mágneses fázisokat, a mágneses kör elemeit, továbbá lehetővé vált egy, a légrésméretektől független mérési eljárás megválasztása is.

A 4.3.1. fejezet tartalmazza az MH modell leírását. A kiinduló pontot az jelentette, hogy a $T(x)$ modell alkalmazásával a normál mágnesezési görbe csak meglehetősen pontatlanul illeszthető annak kezdőpontjától kiindulva és eljutva a telítési állapotig. Különböző mágneses jellemzőjű FeSi acélokon végzett mérések azt mutatták, hogy normál mágnesezési görbékük a $T(x)$ modellel nem írható le kellő pontossággal. Ezt a hiányosságot küszöböli ki Jelölt az MH-modell megalkotásával. Az MH-modell előnyeit a normál mágnesezési görbe alapján meghatározott egyéb mágneses jellemzőkre kapott adatok helyes volta is megerősítette.

A továbbfejlesztett modell alkalmazhatóságát olyan mintákon is ellenőrizte, amelyek több, eltérő mágneses tulajdonságú és térfogathányadú – a Jelölt meghatározása szerint - „mágneses elemet” tartalmaznak. A modell kidolgozásakor feltételezte, hogy az ilyen rendszerekre érvényes a szuperpozíció elve, azaz lineáris rendszert képeznek. Továbbá figyelembe veszi, hogy ha a gerjesztés és a válasz időtől független, akkor a rendszert lineáris rendszernek lehet tekinteni. Az ilyen rendszereket valamilyen konstans együtthatós vagy differenciálegyenlet segítségével lehet leírni.

Az új modell általános alakját m számú mágneses elemet tartalmazó mintára fogalmazta meg, amely $(m-1)$ számú irreverzibilis és egy reverzibilis tagot tartalmaz (lásd 3-6 összefüggés).

Az m számú mágneses elemet tartalmazó minta normál mágnesezési görbéjének leírására szolgáló egyenletek után a két mágneses elemet tartalmazó mintára vonatkozó konkrét egyenleteket is megadja Jelölt. Ezt az összefüggést Jelölt már alkalmasnak ítélte a több fázist vagy szövetelemet tartalmazó mintáinak elemzésére. Megjegyzem, hogy a két mágneses elemet tartalmazó egyenlet elsősorban a Jelölt által készített speciális réteges minták mérési adatainak elemzését tette lehetővé, de például a TRIP acélok vizsgálatakor már három mágneses elemre vonatkozó egyenletre volt szüksége.

Kérdésem továbbá, hogy a mágnesezési görbe MH modellezésének kezdetekor milyen alapon választja meg a mágneses elemek számát?

Az oxfordi egyetemmel folytatott együttműködés keretében számos mintán tesztelte, illetve validálta a többfázisú hiperbolikus mágnesezési görbemodelt. A minták jelentősen eltérő mágneses

tulajdonságú és ismert vastagságú rétegekből álltak. A mágneses méréseket az SMT elrendezésű AC magnetométerrel végezte. A mérési görbére a két mágneses elemet tartalmazó mintára vonatkozó modell alkalmazta. Az illesztés eredménye nagyon kedvező volt, valamint az illesztési paraméterek felhasználásával az eltérő mágneses jellemzőjű „elemek” mágneses tulajdonságai is visszafejthetők voltak, vagyis az ilyen rendszerekre vonatkozó normál mágnesezési görbének dekompozíciója fizikailag helyes eredményre vezetett.

A meggyőző eredményekkel kapcsolatban kérem Jelöltet, hogy pontosítsa a 4.3. táblázatban szereplő relatív térfogatarány „mért” és „számított” jelzőjének jelentését!

Kérdésem továbbá, hogy a réteges minták egyes elemei között milyen volt a kapcsolat, nem kellett volna-e az egyes rétegek közötti légréssel mint mágneses elemmel számolni? Feltételezhető, hogy a számítással illetve a dekompozíció módszerével meghatározott térfogathányadok közötti max. 5%-os eltérésben a mágneses elemként kezelhető légrés bizonytalan vastagságának van szerepe? Ha ez így van, akkor a nem réteges felépítésű mintákat alkotó mágneses elemek (fázisok, szövetelemek) térfogatarányának meghatározását várhatóan 5%-nál kisebb hiba terheli. Meggyőző lett volna, ha ezeket a méréseket erősen különböző térfogatarányú mágneses elemeket tartalmazó mintával is elvégezte volna.

A következő fejezet (4.3.3.) az MH modellen alapuló MBDE módszert (Model Based Data Evaluation) ismerteti.

Az MBDE módszer a következő lépésekből áll:

-
- szimmetrikus (belső) hiszterézis hurkok szisztematikus mérése,
 - a normál mágnesezési görbe meghatározása,
 - az MH modell szerinti normál mágnesezési görbe illesztése a mérési pontokra,
 - a mágnesezési görbék dekompozíciója,
 - az egyes komponensek hiszterézis- és normál mágnesezési görbéinek számítása, az irreverzibilis és reverzibilis fázisok arányának számítása.

Nem egészen világos számomra, hogy az eddig bemutatott mérési és értékelési eljárás miért kap itt új nevet. Mit jelent az irreverzibilis/reverzibilis „fázis” fogalma? Mit ért Jelölt az adott mondatban fázison?

A 4.3.4. fejezet a mérőfej és légrés-független mérési eljárás kidolgozását ismerteti. Ennek a vizsgálati eljárásnak a kidolgozását egyérterműen az ipari mérési igények kielégítése indokolja. Az ipari mérések esetén a mágnesező járomból, a vizsgálandó mintákból és a mérési elrendezésben szükségszerűen kialakuló légrésből álló összetett mágneskör jön létre. Az előző fejezetben bemutatott MBDE modell teszi lehetővé, hogy az összetett mágneses kör egyes elemeinek a normál mágnesezési görbéhez való hozzájárulását szét tudjuk választani.

Jelölt vizsgálatait különböző összetételű és állapotú mintákon és három eltérő anyagú járommal végezte el. A légrés 0-0,8mm-es tartományában a minta anyagának mágneses jellemzőire állandó érték adódott az MH- és MBDE értékelési eljárás segítségével. Ezek az eredmények a kidolgozott eljárás ipari, helyszíni körülmények között való alkalmazhatóságát bizonyítják.

A járom anyagától és a légrés nagyságától független módszer ismertetése a Bíráló figyelmét ismételten a réteges mintákon mért eredmények értékelésére irányítja. Jelölt csak a H_{CM} értékének függetlenségét mutatja be a 4.11. ábrán.

Kérdésem, hogy a többi mágneses jellemző értéke is függetlennek bizonyult a járom anyagától és a légrés vastagságától?

A 4. fejezetet az abban foglaltak lényegre törő összefoglalásával fejezi be a Jelölt.

A dolgozat harmadik része – amely a kidolgozott mérési és értékelési eljárásokat különböző típusú folyamatok nyomonkövetésére alkalmazza – képezi annak mintegy 2/3 részét, a 38. oldaltól kezdve. Mielőtt ennek a két fejezetre tagolódó résznek az értékelésére rátérnék, néhány általános megjegyzést fogalmazok meg.

Mindenképpen Jelölt javára irandó, hogy a kidolgozott módszerek alkalmazhatóságát eltérő jellegű folyamatok követésére, beleértve a fázisátalakulási és a károsodási folyamatokra is bemutatja. Kitűnik, hogy az egyes folyamatok vizsgálatakor az általa kidolgozott mérési és értékelési eljárások közül tudatosan választotta meg az éppen alkalmazottat. Ezt a kísérleti munkát – mivel a mágneses módszerek fémteni alkalmazása áll a disszertáció fókuszában – úgy is lehet tekinteni, mint egy útmutatót arra nézve, hogy melyik módszert milyen típusú fémteni folyamat vagy folyamatok követésére tartja Jelölt a legalkalmasabbnak. Talán ez a gondolat foglalja egységbe Jelölt munkáját.

Ugyanakkor ez a felépítés túlzottan tagolttá teszi ezeket a fejezeteket, az egyes károsodási folyamatokkal illetve fázisátalakulások vizsgálatával foglalkozó részek egy-egy önálló részletként jelennek meg, Jelöltnek az adott témakörben megjelent publikációi tükröződnek vissza ebben a megközelítésben. Az erős tagoltságból adódó töredezettséget kompenzálni lehetett vagy kellett volna az összefoglalásban, de ott is csak az eredmények ismertetésére szorítkozik Jelölt.

Egy szintetizáló jellegű összefoglaló minden bizonnyal növelte volna az egyébként számos új tudományos eredményt magába foglaló fejezet illetve az értekezés értékét.

Rátérve az egyes fejezetek tartalmi értékelésére, ismételten utalnom kell arra, hogy szerencsésebb lett volna a mágneses változásokat okozó folyamatokról a fejezet elején átfogó képet rajzolni, és az adott témakörhöz tartozó publikációk alapján kijelölni a vizsgálatok irányát, célját.

Az 5. fejezet 5.1. alfejezete a melegsziárd acélok degradációs (károsodási) folyamatainak mágneses módszerekkel való követését tárgyalja. A többi, hasonló jellegű alfejezettel egyezően ez is egy rövid szakirodalmi áttekintéssel kezdődik, hangsúlyozza az ilyen jellegű károsodási folyamatok roncsolásmentes módszerekkel való követésének jelentőségét. A károsodási folyamatokat az alábbi csoportokra osztja:

- mechanikai fáradás,
- hőfáradás,
- 550°C-nál nagyobb hőmérsékleten és nagy nyomáson lejátszódó kúszás,
- a hőfáradási és kúszási folyamatok kölcsönhatása,
- különböző típusú korróziós folyamatok.

(A „nagy nyomáson lejátszódó kúszás” megfogalmazást nem tartom szerencsésnek.)

A termikus és a kisciklusú fáradás folyamatainak egyedi és kölcsönhatásokban való tárgyalása és elemzése vezet el a megfelelő kísérleti technikák megválasztásához, nevezetesen az egyidejű termikus és mechanikai ciklusok ismétlődő alkalmazásával végzett termomechanikus fárasztáshoz, ami megfelelő beállítások esetén jól modellezheti az ipari körülményeket.

A továbbiakban Jelölt a kúszási folyamatomatot tárgyalja. Ez a tárgyalás alig haladja meg a kézikönyvek színvonalát. A kúszás közbeni mikromechanizmusok tárgyalása hiányos. Pl. a kúszás sebessége nemcsak az újrakristályosodási küszöbhőmérséklet közelében, hanem az esetleges fázisátalakulás során is rohamosan növekszik.

A harmadik, egyre gyorsuló alakváltozással jellemzett szakaszban lezajló folyamatok értelmezése pontatlan, például kontrakció az alakváltozás kis mértéke következtében általában nem figyelhető meg.

A terhelés, pontosabban a feszültség növekedését általában a mikroüregek megjelenésével magyarázzuk, hiszen a mikroüregek „keresztmetszetével” csökken a teherviselő keresztmetszet. Az

összetett igénybevétel közben lejátszódó folyamatokkal kapcsolatos modellek közül Jelölt csak egyet említ, nevezetesen az S.W. Nam-féle [10, 11] modellt. A modell rövid ismertetése után jut el Jelölt ahhoz a megállapításhoz, hogy a hibaszerkezetben bekövetkező változások a mágneses jellemzőkben, azok változásában is megmutatkoznak.

Hiányolom itt ennek magyarázatát, és ezzel kapcsolatban fogom megfogalmazni azt az átfogó kérdésemet, amelyre részletesebb választ várok.

A károsodási folyamatok vizsgálatát erőművekben széleskörűen alkalmazott, öt különböző minőségű, szabványos acéllal végezte. A vizsgálatok első részében a hőfárasztás hatását vizsgálta. A 15Mo3 -típusú ferrit-perlites acéllal végzett kísérletek során kisciklusú hőfárasztást hajtott végre úgy, hogy a teljes tönkremenetelt okozó igénybevételhez képest különböző mértékig fárasztotta a mintákat, és ezeken a mintákon végzett mágneses méréseket.

A kísérletek további részében négy szabványos minőségű acéllal (A193-B16, 10CrMo910, 12H1MF, 15H1MF) végezte Jelölt. Ezeknek a mintáknak a kiindulási állapotára az volt jellemző, hogy már bizonyos mértékű károsodást elszenvedtek.

A 15Mo3 acélok hőfárasztott mintáinak mágneses mérését az AC magnetométerrel, míg a Barkhausen-zajt a 3.4. pontban ismertetett berendezéssel vizsgálta. A mágneses mérésekből elsősorban a koercitív tér (H_c) értékét határozta meg a telítési hiszterézis görbékből. A mérések alapján megállapította, hogy a kifáradás folyamata a mintákon lezajló folyamatok szempontjából három részre osztható. Az első szakaszban ciklikus lágyulás következik be, ezt a H_c -érték csökkenése jelzi. A következő szakaszban a H_c értéke növekszik, amelyet Jelölt a hibasűrűség növekedésével magyaráz. A harmadik szakaszban már a mikrorepedések kialakulása feltételezhető, ami – az első szakaszhoz hasonlóan – a H_c csökkenésével jár együtt. A Barkhausen-zajra vonatkozó mérési adatok hasonló tendenciát jellemeznek.

Az 5.4. ábra szövegében fel kellett volna tüntetni, hogy melyik minőségre vonatkozik.

A második vizsgálatosorozatban a hőfárasztott 15Mo3 minőségű acélokon a mágneses méréseket az ipari körülmények között is alkalmazható saját fejlesztésű mérési elrendezésben végezte el Jelölt. A méréssel meghatározott normál mágnesezési görbéből az MH modell bemutatásakor ismertetett eljárással határozta meg a H_{CM} értéket. A telítési mágnesezettséget el nem érő feltételek mellett végzett mérések az első méréssorozat eredményeivel megegyező eredményre vezettek, igazolva a mérési eljárás alkalmazhatóságát.

A bemutatott mérési eredményekkel kapcsolatban szeretném Jelölt véleményét kérni arra nézve, hogy a módszert alkalmasnak tartja-e arra, hogy valamely ipari berendezés egyes alkatrészeiben végbement hőfáradás előrehaladásának mértékét és ezzel együtt a maradék élettartamot jelezze.

E kísérletsorozat ismertetése a hőfárasztott minták TEM-es vizsgálati eredményeinek közlésével fejeződik be. A kiváló minőségű felvételek jól reprezentálják a hőfárasztás folyamatának egyes szakaszaiban kialakult hibaszerkezetet. Ezen a helyen Jelölt kísérletet tesz a szövetszerkezeti és mágneses jellemzők változása közötti kapcsolat értelmezésére is. A 15Mo3 minőségű acél hőfárasztott mintáinak további vizsgálata során a hőfárasztásnak a mágneses anizotrópiára gyakorolt hatását vizsgálta. A 3mm élhosszúságú mintákon rezgőmintás magnetométerrel végezte a vizsgálatokat. Azt tapasztalta, hogy keresztirányú mérés esetén a kezdeti permeabilitás jelentősen csökkent a ciklusszám növekedésével, míg hosszirányú mintákban ez a változás nem volt tapasztalható. Így a ciklusszám növekedésével a mágneses anizotrópia megjelent, illetve növekedett. Az indukált mágneses anizotrópia kialakulásának okára Jelölt nem tér ki.

A negyedik, a hőfárasztással kapcsolatos kísérletsorozatban Jelölt három, különböző szabványos minőségű acéllal végzett kísérleteket. Nem világos itt, hogy mit ért Jelölt azon, hogy ezeket a vizsgálatokat korábbi kísérleti munkája folytatásának tekinti. A vizsgált acélok az erőművek főnyomóvezetékeinek anyagát reprezentálják, az állapotuk a kezdeti károsodás állapotának felelt

meg. Örömmel olvastam, hogy ezeknek a mintáknak a hőfárasztását a Dunaújvárosi Főiskola Gleeble 3800 típusú termomechanikus szimulátorán végezték el. A vizsgálatok kisciklusú hőfárasztó vizsgálatok voltak. A szimulátorban az egyes minták igénybevételi száma 0, 250, 500, 750 és 1000 volt. A várakozásnak megfelelően a minták fénymikroszkópos vizsgálata alapján szövetszerkezeti változást nem lehetett megfigyelni, és a keménységmérési adatok is csak csekély változásra utalnak.

A nehezen kimutatható szövetszerkezeti változások érzékelésére Jelölt a nemlineáris felharmonikusok mérési módszerét alkalmazta. A detektor tekercsben indukált, torzított jelben megjelennek a gerjesztő jel felharmonikusai, amelyek – valamilyen, nem részletezett módon – jellemzik a vizsgált minta szövetszerkezeti és hibaszerkezeti viszonyait.

A korábbi vizsgálatok során alkalmazott módszer az adott esetben nem bizonyult kellően érzékenynek, ezért új módszert fejlesztett ki, amelyet adaptív nemlineáris felharmonikusok módszerének nevezett el. Az optimális gerjesztési körülmények között végzett mágneses mérésekből Jelölt arra a következtetésre jutott, hogy az 5. és 7. felharmonikus relatív fázisszöge a ciklusszám függvényében változik legérzékenyebben, vagyis ennek alapján minősíthető a minta károsodásának mértéke.

A fejezetet az eredmények szinte tézisszerű összefoglalása zárja. A hőfárasztás hatására bekövetkező változások kimutatására kidolgozott adaptív nemlineáris felharmonikusok (ANLH) módszerével kapott eredményeket érdekesnek tartom, de a mágneses mérésekből származtatott információ (felharmonikusok, fázisszög) és a szövetszerkezetben lejátszódó változások kapcsolata mélyebb értelmezést igényel, az adott összefüggés fémtani-fizikai értelmezése további vizsgálatokat igényelne.

A 6. fejezet a fázisátalakulással járó folyamatokkal kapcsolatos mérések eredményeit foglalja össze, a szövetszerkezetben végbemenő és a mágneses tulajdonságokbeli változások közötti kapcsolatot értelmezi Jelölt. Mielőtt ennek a fejezetnek a tartalmi ismertetésére illetve bírálatára rátérnék, megállapítom, hogy ez a fejezet jobban áttekinthető, jobban szerkesztett mint az előzőek. Ezen túlmenően az is nyilvánvaló, hogy a Jelölt által kidolgozott több mágneses elemet tartalmazó rendszerre vonatkozó modellje és értékelési eljárása éppen az itt közölt eredmények alapján validálódik.

Ahogy azt már említettem, a szerteágazó vizsgálatok eredményeinek bemutatása sokféle szerkezetben is elképzelhető, szerencsésebbnek tartottam volna, ha az MH modell ismertetését nem az 5. hanem a 6. fejezetben közölték követték volna.

Ebben a fejezetben a TRIP acélokban, illetve erősen ötvöztött (ausztenites saválló, duplex -saválló, szuper duplex-saválló illetve növelt nitrogén és mangántartalmú duplex -saválló) acélokban mechanikai illetve termikus hatásokra bekövetkező, valamely ferromágneses fázis keletkezésével vagy éppen eltűnésével kapcsolatos folyamatok mágneses mérésekkel való követéséről számol be Jelölt.

A 6.1. alfejezet a TRIP acéllal kapcsolatos vizsgálati eredményeiről szól. Ezekben a nagy szilárdságú és emellett kedvező alakíthatósági jellemzőjű acélokban mintegy 12-15%-nyi maradék ausztenit van, képlékeny alakítás hatására ez részben vagy akár teljesen tetragonális martenzitté alakul. Végeredményben ez a fázisátalakulás váltja ki a minta mágneses jellemzőinek módosulását.

A TRIP acélok hőkezelésével, az egyes ötvözőelemek hatásaival és magával a TRIP mechanizmus ismertetésével kapcsolatos megállapítások helytállóak, de egyes helyeken pontatlanok. Például a Si nem általában, hanem a bénitképződés közben gátolja meg a karbidképződést, így segítve elő a még át nem alakult ausztenit karbontartalmának feldúsulását, akár 1t% -nál is nagyobb szintre.

A TRIP 700 minőségű, 1,8mm vastagságú lemezeken hidegalakítás hatására lejátszódó folyamatokat mutatja be Jelölt. A kiindulási szövetszerkezet jellemzésében nem világos, hogy miért éppen a ferrit és a maradék ausztenit térfogathányadára nézve ad meg konkrét adatokat.

A lemezanyagot szakítógépben alakította, az alakítás maximális mértéke 28,3%-os volt. Ez utóbbi érték feltehetően az egyenletes nyúlás értékének felel meg. Az alakított minták keménységének megmérésén túl a mágneses jellemzőket AC magnetométerrel SMT elrendezésben vizsgálta. A felvett normál mágnesezési görbéket az MH modellen alapuló MBDE eljárással végezte Jelölt, három irreverzibilis tagot feltételezve. Ennek az eljárásnak az alkalmazása lehetővé tette a TRIP acélt alkotó egyes szövetelemek arányának és egyedi mágnesezési görbéjének meghatározását.

A kísérletekben figyelembe vette a kiinduló állapotra vonatkozó szövetelem-arányokat. A tárgyalásnak ezen a pontján már a bénitre vonatkozó adat is szerepel. Ez az adat csak egyszerű számítás vagy mérés eredménye?

Nagyon lényegesnek tartom az egyes szövetelemek mágneses jellemzőinek a hidegalakítás hatására bekövetkező változásainak bemutatását. Ezek az eredmények a dolgozat kiemelkedő megállapításai.

A dekompozíciós illetve EBSD méréssel meghatározott tetragonális fázis (szerkezet) térfogathánya még a legnagyobb (28,3%) alakítás után is csak 6tf% körül volt.

Mivel magyarázza Jelölt a kiinduló állapotban jelenlévő maradék ausztenit és a létrejött martenzit térfogathányada közötti jelentős különbséget?

Az MH modell validáltságát jól szolgálta volna, ha a TRIP 700 acéllal pl. növelt hőmérsékleten alakított mintákon is végzett volna vizsgálatokat. Megjegyzem továbbá, hogy az egyes szövetelemek mágneses jellemzőinek illetve a martenzit mennyiségének a változását keménység-mérési adatokhoz való viszonyítás helyett szerencsésebb lett volna a TRIP 700 minőségű acél valódi feszültség-természetes nyúlás diagramja alapján tárgyalni.

A fázisátalakulás hatására bekövetkező szövetszerkezeti változások és a mágneses jellemzők közötti kapcsolat felderítésére irányuló vizsgálatok második nagy csoportját az erősen ötvöztött korrózióálló acélokon végezte el Jelölt, és az eredményeit a 6.2. alpontról kezdődően ismertette.

A korrózióálló acélok szövetszerkezeti viszonyait lényegében a Schaffler-Delong -féle szövet-diagram alapján tárgyalja a Cr- és a Ni-egyenérték figyelembe vételével. A korrózióálló acélok lehetséges öt csoportjába tartozó acélok közül Jelölt csak a tisztán ausztenites, és az ún. duplex saválló acélokból alakítás és hőkezelés hatására lejátszódó folyamatokat tanulmányozta. A DSS acélok között a ún. szuperduplex (SDSS) és az ún. lean duplex saválló acélokkal (LDSS) foglalkozott. Ez utóbbi acélokra növelt N és kisebb Ni tartalmuk a jellemző.

Az egyes ötvöztípusok korrózióállóságának tárgyalása véleményem szerint nem tartozik Jelölt disszertációjának témaköréhez, így ezt – az egyébként rövid részt – feleslegesnek tartom. A közölt ábra egyébként is csak a pittingkorrózióra vonatkozik, pedig a korrózióálló acéloknak más, ettől eltérő korróziós folyamatai is ismertek.

A korrózióálló acélok ausztenitje termodinamikailag nem stabilis, Jelölt ebből a megállapításból kiindulva tárgyalja a paramágneses ausztenitnek extrém gyors hűtés, alakítás vagy kisciklusú fáradás közben ferromágneses fázissá való részleges átalakulását.

A f.k.k. $\rightarrow$ t.k.k. jellegű fázisátalakulás – amelynek során α' -martenzit keletkezik – a korrózióálló acél mágneses jellemzőit is módosítja, melynek fémfizikai okát a kicserélődési energia megváltozásában jelöli meg Jelölt.

Kérdésem ezzel a megállapítással kapcsolatban az, hogy mi okozza a kicserélődési energia megváltozását és milyen irányú ez a változás? Mi az oka annak, hogy csak az α' -martenzit ferromágneses, míg a h.c.p. -martenzit (ϵ - martenzit) nem? Ez az eltérés értelmezhető-e a

kicserélődési energia megváltozásának mértékével?

A képlékeny alakváltozás mechanizmusának az ausztenit rétegződési hiba -energiáján alapuló tárgyalása korszerű megközelítést jelent. A később ismertetett vizsgálatok szempontjából helyénvalónak tartom a duplex acélok tárgyalásakor a σ -fázis megjelenésével kapcsolatos információkat, ugyanakkor megjegyzem, hogy a duplex saválló acélokban kialakuló fázisokat nem lehet minden esetben „vegyületeknek” nevezni, mert a „képleteik” nem értelmezhetők az azokat alkotó komponensek vegyértéke alapján (lásd 6.8.ábra). Ezen az ábrán egyébként angol feliratok szerepelnek.

A duplex saválló acélok szövetszerkezetében lejátszódó változások mágneses mérésekkel való nyomon követését Jelölt elsősorban a ferrit hőközlés hatására lejátszódó eutektikus átalakulásával hozza összefüggésbe. Feltehetően itt eutektoidos átalakulásról van szó (ferrit $\rightarrow$ szekunder ausztenit + σ fázis). (Lásd 73. oldal, a 6.8. ábra alatti sor!)

Az LDSS -acélok szövetszerkezete hasonló a DSS -acélokéhoz, de az ausztenit stabilitását elsősorban a N -ötvözással érik el. Ezekben a saválló acélokban még hosszú idejű, növelt hőmérsékletű igénybevétel esetén sem jön létre a mechanikai és korróziós szempontból káros hatású σ fázis. Az LDSS ausztenitjében az extrém gyors hűtés vagy hidegalakítás hatására Jelölt meghatározása szerint kialakul az ún. alakítási vagy lath-martenzit fázis.

Az LDSS acélokban kialakuló lath-martenzit mutatja-e azt a háromszintű hierarchikus struktúrát, ami a kis karbontartalmú szerkezeti acélok lath-martenzitjére jellemző?

A korrózióálló acélok általános jellemzése kapcsán hiányolom a δ -ferritre vonatkozó információkat, továbbá – pl. az ausztenites saválló acélokra vonatkozóan – ezek alapvető hőkezelési technológiájának ismertetését.

Az ausztenites korrózióálló acéllal (AISI 304) végzett kísérletek eredményeit a 6.2.1. alfejezet foglalja össze. Megemlítem, hogy abban a táblázatban, ahol Jelölt megadja a vizsgált acélok típusát és a bennük lejátszódó folyamatok jellegét, nem AISI 304-es, hanem AISI 306-os acél szerepel.

A vizsgálatok három kísérletsorozatot foglalnak magukban. Az első két kísérletsorozatban hengerelt illetve szakítógépben megnyújtott mintákat vizsgált, míg a harmadikban adott, 48%-os hideghengerlési fogyással alakított mintákat 700-1000°C hőmérséklet-tartományban 30-30 percig hűtött, majd szabad levegőn lehűtötte azokat.

Az így előállított mintákon mágneses méréseket és keménységmérést végzett. Az első mintasorozaton végzett mérések alapján megállapította, hogy az α' -fázis már a legkisebb alakváltozási mérték esetén is kimutatható, a keménység és az α' -fázis mennyisége fokozatosan, egymással párhuzamosan folyamatosan nő az alakítás mértékével.

A hasonló értelmű, a szakítógépben végzett nyújtással alakított mintákon pedig azt tapasztalta, hogy a ferromágneses fázis mennyiségének növekedése csak 20%-os relatív nyúlás után indul meg, és mennyisége az alakítás mértékével e küszöbérték felett már nem arányosan, hanem rohamosan nő. Ezt a viselkedést az ausztenitben a fázisátalakulás során kialakuló nyomófeszültség hatásának tudja be.

A kétféle módon alakított mintákkal kapcsolatban a Bírálóban joggal merülhet fel a kérdés, hogy az eltérő viselkedésnek végül is mi az oka? Feltehető, hogy az eltérő igénybevétel hatására lejátszódó alakváltozási mechanizmusban keresendő ez az ok. Kérem Jelöltet, tegyen kísérletet a mérési eredményeinek ilyen értelmű magyarázatára! Érdekes lenne az egytengelyű húzásra és a hengerlésre vonatkozó alakítási mértékeket valamely egyenértékű alakváltozásra is átszámítani.

A harmadik kísérletsorozat során megállapította, hogy az α' -martenzit ausztenitté való visszalakulása 500-800°C hőmérséklet-tartományban megy végbe, 800°C felett α' -martenzit már nem volt kimutatható a mágneses méréssel. A keménységnek az α' -martenzitnek az adott

hőmérséklet-tartományban mutatkozó eltérő viselkedését a szövetben lejátszódó komplex folyamatokkal helyesen értelmezi Jelölt.

Jelölt a szuper duplex acéllal végzett kísérletekkel kapcsolatos eredményeit a 6.2.2. fejezetben mutatja be. A vizsgálatok célja az SDSS acél szövetében jelenlévő fázisokban, nevezetesen a ferritben és az ausztenitben hőkezelés és alakítás hatására lejátszódó folyamatok mágneses mérésekkel való nyomon követése volt. Ennek a folyamatnak a lényege a ferritnek ún. szekunder ausztenitté és σ fázissá való szétbomlása.

A kiindulási szövetet alkotó két alapvető fázist, a ferritet és az ausztenitet speciális módszerrel való maratással tette jól megkülönböztethetővé. A 6.16. ábra szövegében azonban DSS minta szerepel. Az SDSS acéllal négy kísérletsorozatot hajtott végre Jelölt, ezek felsorolásszerűen a következők voltak:

- 60 perces izotermikus hőkezelés 500-900°C hőmérséklet-tartományban,
- 20 perces izotermikus hőkezelés 720-900°C-os hőmérséklet-tartományban,
- 900°C-on végzett izotermikus hőkezelés 1-180 perces időtartományban,
- eltérő mértékben hidegen alakított minták 40 percig való izotermikus hőkezelése 400-900°C hőmérséklet-tartományban.

Az első kísérletsorozat mintáinak mágneses mérését a rezgőmintás magnetométerrel végezte el Jelölt. A telítési polarizáció értéke – amely egyenesen arányos a mintákban jelenlévő ferromágneses fázis térfogathányadával – a hőmérséklet növekedésével folyamatosan csökkent. A minták ferrittartalma 42%-ról 8,3%-ra változott.

Az AC magnetométerrel végzett mérések eredményeinek értékeléséből Jelölt arra a következtetésre jutott, hogy a ferrit bomlási folyamata során annak mágneses tulajdonságai nem változnak. Ez a megállapítás azt jelenti, hogy a még át nem alakult ferritben nem játszódnak le olyan folyamatok, amelyek a mágneses jellemzőket módosítanák.

Kérdésem az, hogy a ferrit hibaszerkezetének és összetételének változatlan voltára van-e mérési adata Jelöltnek?

A 6.19. ábra adatainak értelmezését megkönnyítette volna a vonatkozó izoterm átalakulási diagram közlése.

A ferrittartalom változására vonatkozó mágneses mérési adatokat az EBSD mérések jól igazolták.

A 2. kísérletsorozat mintáinak mágnesezési görbéit DC magnetométerrel vette fel Jelölt. A ferrittartalom a hőmérséklet növekedésével monoton csökkent. A ferrit bomlási folyamatainak aktiválási energiáját is meghatározta Jelölt.

Kérdésem ezzel kapcsolatban az, hogy a megadott aktiválási energiaértéket végül is mi szabja meg?

A 3. kísérletsorozat mintáin a mágneses méréseket a rezgőmintás magnetométerrel végezte el Jelölt. A ferrittartalom átalakulása inkubációs idő nélkül elkezdődött és a vizsgálat teljes időtartama alatt folytatódott, mégpedig monoton módon.

Az egységesen 900°C-on különböző ideig hőkezelt minták fázisanalízisét röntgendiffrakciós módszerrel hajtotta végre Jelölt. Az XRD -mérések alátámasztották a mágneses megfigyeléseket, miszerint 900°C-on a ferrit bomlása inkubációs idő nélkül, azonnal megindult, és ezzel egyidejűleg a σ -fázis mennyisége fokozatosan nőtt.

A hőkezelt mintákon végzett keménységmérés a keménység növekedését mutatta, ami összhangban van a σ -fázis mennyiségének növekedésével és annak az elbomló ferritnél nagyobb keménységével.

A 3. kísérletsorozat mintáihoz kapcsolódó EBSD képek nagyon informatívak, szépek.

Ezzel a kísérletsorozattal kapcsolatban szeretném megkérdezni, hogy Jelölt mi alapján választotta meg az izoterma 900°C-os hőmérsékletét?

A negyedik sorozat mintáinak mágneses mérését Jelölt DC magnetométerrel végezte el. A hidegen hengerelt állapotú minták mágneses mérési adatai alapján megállapítja, hogy – a várakozásnak megfelelően – pusztán hidegalakítás hatására alakítási martenzit nem keletkezett az SDSS minták ausztenitjében, vagyis ezeknek az acéloknak az ausztenitje stabilisabb mint a szokásos, tisztán ausztenites acéloké.

Az SDSS mintákat alkotó két fázis, az ausztenit és a ferrit vegyi összetételére vonatkozó EDS adatok érdekesek, de az adott esetben a C-ra vonatkozó adatok nélkül ezek csak tájékoztató jellegűeknek tekinthetők. Szerencsés lett volna a Ni és a Cr egyenérték megadása, esetleg becslése.

Felhívom Jelölt figyelmét arra, hogy az egymással egyensúlyt tartó fázisok kémiai összetétele ma már termodinamikai elveken nyugvó szoftverekkel is számítható, lásd például a THERMOCALC szoftvert.

A rétegződési hiba energiájára vonatkozó számítást az előbbiek alapján csak közelítésnek tekinthetjük, megjegyezve, hogy az ausztenit stabilitásával kapcsolatos megállapításával ettől függetlenül egyet lehet érteni.

A 400°C-on végzett hőkezelés – a mágneses mérések tanúsága szerint – nem indította el a ferrit termikus bomlását, ellentétben a 900°C-on végzett hőkezeléssel. A mágneses mérések azt mutatták, hogy a telítési polarizáció értéke erősen függött az előzetes hidegalakítás mértékétől.

Az is kitűnt, hogy már kismértékű képlékeny alakítás is jelentősen növeli a ferrit termikus bomlási folyamatainak sebességét. Nem világos számomra Jelölt értelmezése a ferrit bomlási sebességével kapcsolatban.

A ferrit megnövekedett bomlási sebességét a hidegalakítás hatására az ausztenitben létrejövő ikerhatárok és illeszkedési hibák (= rétegződési hiba?) sűrűségének növekedésével hozza összefüggésbe. Szerintem ennek a jelenségnek nincs köze a DIFT-hez, ami a $\gamma - \alpha$ átalakulás kezdőhőmérsékletének az átalakuló fázisban alakítás hatására felhalmozódó többletenergiajával kapcsolatos.

A hidegalakítás hatásának a ferrit szekunder ausztenitre és σ -fázisra való eutektoidos bomlására gyakorolt hatásával kapcsolatban ismét felmerül a kérdés, hogy a korábbi kísérletsorozatban megadott aktiválási energia milyen folyamatra jellemző?

Valamely ferromágneses fázis megjelenésével együtt járó fázisátalakulásokkal kapcsolatos további eredményeket a 6.2.3. alfejezet tartalmazza. A mágneses és szövetszerkezeti vizsgálatokat egy ún. lean- duplex saválló acélon hajtotta végre Jelölt. A vizsgált LDSS acél gyártó cégi jele V2101MN.

Szállítási állapotban a szövetet 80tf% ferrit és 20tf% ausztenit alkotta. Az LDSS lemezanyagot max. 80%-os hengerlési fogyással alakította. Az eltérő mértékben alakított mintákból álló sorozat képezte a vizsgálatok kiinduló pontját.

A 6.8. táblázatban Jelölt közli az LDSS kémiai összetételét. Szerencsés lett volna a Cr- és a Ni- egyenérték kiszámítása, és ennek alapján az acél helyzetének kijelölése a Schäffler-Delong-diagramban. Ez azért lett volna érdekes, mert az LDSS acél növelt N és Mn tartalmú, és így lehetőség adódott volna a szövetdiagram helyességének ellenőrzésére is. A szemcseszerkezet jellemzésekor – még az erősen alakított állapotú mintákra vonatkozóan sem – szerencsés az „összetöredezett” jelző használata, hiszen az LDSS- acélok – az ausztenites és az SDSS-acélokhöz hasonlóan – jól alakíthatóak, alakváltozó képességük hasonló.

A különböző mértékben alakított LDSS acélból származó mintákon EBSD eljárással alakítási martenzitet nem lehetett kimutatni. Jelölt azt is megfigyelte, hogy az alakítás mértékének

növekedésével az ausztenit térfogathánya csökkent. Az alakítási α' -martenzitet képződésére a ferritnek minősített fázis szemcséinek rosszabb „képminőségéből” következtetett Jelölt. Meglepő, hogy ennek a fázisnak a megjelenése nem az ausztenithez kötött. Mi ennek a magyarázata?

A további elemzések, összehasonlítások alapját az LDSS minták keménységének az alakítás mértékének növekedésével bekövetkező változását visszatükröző mikrokeménység mérési adatok képezik. Az alakított minták mágnesezési görbéit az AC magnetométerrel határozta meg Jelölt, SMTM elrendezésben.

A normál mágnesezési görbék telítési polarizációja nőtt, amit Jelölt az ausztenit martenzites átalakulásával hoz kapcsolatba. Ez a megállapítása ellentmondani látszik a képminőség-térképek értékelése kapcsán tett megállapításával.

A normál mágnesezési görbe MH modellezését két irreverzibilis mágnesezési tagot figyelembe véve végezte el Jelölt. A két mágneses elemnek a ferritet és az α' -martenzitet tekintette. A dekompozíciós eljárással az α' -martenzitet mennyiségének, illetve a két ferromágneses fázis koercitív terének az alakítás mértékétől való függését határozta meg. Zavaró az értékeléskor, hogy a ferrit térfogathányadát változatlanoknak tekintette, holott kezdetben azt feltételezte, hogy az α' -martenzitet a ferritkristallitokban keletkezik.

Kérem ennek az összefüggés-rendszernek a kifejtését, tisztázását!

Érdekes az a megállapítása, hogy az α' -martenzitet csak 30%-os hidegalakítás után mutatható ki. Van-e saját mérési eredménye arra nézve, hogy 30%-nál kisebb alakítás esetén nem α' -, hanem ε -martenzitet keletkezik?

A két fázis koercitív terének az alakítás mértékének növekedése közbeni eltérő jellegű viselkedése ismét felveti azt a kérdést, hogy az α' -martenzitet végül is melyik fázisban keletkezik?

Az XRD -mérések az α' -martenzitet keletkezésével kapcsolatban információt nem tudtak szolgáltatni, az ausztenitnek a szövetből való eltűnése bizonyított, azt azonban a bemutatott diffraktogramok nem bizonyítják, hogy α' -martenzitet keletkezik, hiszen a ferrit és az α' -martenzitet reflexiói fedésben vannak. Valószínű, hogy a vonal mélyebb, részletesebb elemzése erre a kérdésre is választ adott volna.

Az alakított minták mágneses tulajdonságait DC magnetométerrel is megmérte. A mérésekhez a lemezanyag rétegezésével készített mintákat. Az első mágnesezési görbék azt mutatták, hogy a telítési polarizáció jelentősen növekedett az alakítás mértékének növekedésével, ami a ferromágneses fázis egyre nagyobb mértékű jelenlétét jelzi.

A DC magnetométeres mérések eredményének a keménységmérési eredményekkel való összevetése illetve az AC magnetométeres eredményekkel való szembesítése felveti azt a kérdést, hogy a 30%-os alakítási mértékig a keménység növekedése mögött a ferrit alakítási keménysége vagy a nem ferromágneses ε - martenzitet megjelenése-e az ok.

Az értelmezéssel kapcsolatos kérdéstől függetlenül fontos eredménynek tartom, hogy az AC- és DC- magnetométeres mérések alapján a ferromágneses α' -martenzitet mennyiségére jól egyező adatokat kapott Jelölt.

Végezetül megfogalmazom a bírálat 7. oldalán már jelzett kérdésemet, amelyre részletesebb választ várok Jelölttől:

Kérem, értelmezze a doménfalak és a kristályhibák közötti kölcsönhatás természetére vonatkozó ismereteket!

Jelölt tudományos eredményeit 9 tézisben fogalmazta meg, amelyekkel kapcsolatos állásfoglalásom az alábbi:

Az **1. tézist** – amely lényegében a többfázisú hiperbolikus modell kidolgozásának és alkalmazási lehetőségeinek tényét rögzíti – elfogadom, ha Jelölt a bírálatomban megfogalmazott kérdésre egyértelmű, és az MH modell újdonságtartalmát illetően pozitív választ ad.

Megjegyzem, hogy az értekezésben a ferrimágneses anyagokra vonatkozó eredményeket nem találtam, így a 1. tézis érvényességét csak a ferromágneses fázist vagy fázisokat tartalmazó anyagokra nézve látom bizonyítottnak.

A **2. tézisben** foglalt állítást a 4.3.4. fejezetben közölt eredmények alapján bizonyítotttnak tartom, de a közölt megfogalmazásban nem tudom elfogadni. Feltétlenül szerepelnie kellene a légrés méretére és a mágnesező járom anyagára vonatkozó információnak. Megítélésem szerint a légrés a mágneses kör „elemének” tekinthető, így a 2. tézisben az új állítást a járom anyagától és alakjától való függetlenség jelenti.

A **3. tézist** elfogadom, mert a hőfárasztás és a kúszás során lejátszódó hibaszerkezeti változások és a mágneses jellemzők közötti kapcsolatot értelmezi.

A **4. tézist** – amely a 15Mo3 ferrit/perlites acél károsodása során végzett vizsgálatok eredményeit rögzíti – elfogadom, mert a mágneses mérésekkel az elkülönített szakaszokban lejátszódó fémtani folyamatokat is vizsgálta illetve dokumentálta Jelölt. A 4. tézis második részében a mágneses anizotrópiával kapcsolatos állítást mint kísérleti eredményt elfogadom.

Az **5. tézist** elfogadom, mert az a mágneses jellemzők és a vizsgált acélok hibaszerkezete közötti, kísérletileg bizonyított állítást fogalmaz meg.

A **6. tézist** – amely a TRIP 700 minőségű acéllal kapcsolatban végzett mágneses, fémtani és mechanikai vizsgálatok eredményeit foglalja össze – elfogadom, mert a mágneses jellemzők változásait a képlékeny hidegalakítás során lejátszódó fázisátalakulással és a TRIP acél szövetében jelenlévő szövetelemek hibaszerkezetében bekövetkező változásokkal hozta Jelölt összefüggésbe.

A **7. tézist** – amely az AISI 304 típusú ausztenites saválló acél mágneses vizsgálata során kapott eredményeket foglalja össze – elfogadom, bár a ferromágneses martenzit mennyiségének az egytengelyű húzóigénybevétel hatására bekövetkező egyre fokozódó mértékű növekedése és az ausztenit-martenzit fázisátalakulással járó fajtérfogat-növekedés közötti közvetlen kapcsolat nehezen értelmezhető.

A **8. tézist** – amely a 2507 típusú szuperduplex acélra vonatkozó eredményeket foglalja össze – elfogadom, mert a mágneses jellemzők változását a lezajló fémtani folyamatokkal értelmezi.

A **9. tézist** – amely a V2101Mn típusú LDSS acéllal végzett kísérletek eredményeit tartalmazza – elfogadom, mert a mágneses mérések eredményeit a hidegalakítás során lejátszódó fázisátalakulással értelmezi. Az ebben a tézisben foglalt eredmények az MH modell validáltságát is bizonyítják.

Bírálatom összefoglalásaként megállapítom, hogy Mészáros István okl. villamosmérnök az MTA doktora cím elnyerése céljából benyújtott értekezésében a mágneses méréseknek a károsodási és fázisátalakulási folyamatok vizsgálatában, a mágneses mérés technika fejlesztésében és a mágneses mérések értékelésében és értelmezésében jelentős eredményeket ért el, és ezeket kilenc tézisben fogalmazta meg. Jelölt tevékenységében kiemelkedő jelentőségű műszerfejlesztő munkássága, amellyel a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén a korszerű igényeket kielégítő mágneses laboratóriumot hozott létre és vezet.

Ezeket a lehetőségeket eredményesen kamatoztatja oktatói és kutatói munkájában. Ez utóbbiban széleskörű nemzetközi kapcsolatrendszert alakított ki. Mindez egyértelműen bizonyítja Mészáros István okl. villamosmérnök iskolateremtő képességét.

Mindezek alapján javaslom az értekezés nyilvános vitára való bocsátását.

Budapest, 2015. január 6.

Dr. Verő Balázs
az MTA doktora, professor emeritus