

Válasz opponensi bírálatra

Opponens: Dr. Trampus Péter, egyetemi tanár, az MTA doktora

Mindenekelőtt nagyon köszönöm Trampus Professzor Úr alapos és gondolatébresztő opponensi véleményét, értékes megjegyzéseit és kérdéseit.

Köszönöm bírálómnak a dolgozatomban előforduló elírásokkal és pontatlan szóhasználattal kapcsolatos észrevételeit. Ezek mindegyikével egyetértek. Különösen köszönöm, hogy felhívta a figyelmemet az „anyagkárosodás”, illetve „anyagfolytonossági hiány” kifejezések pontos használatára.

A bírálóban feltett kérdésekre válaszaimat az alábbiakban adom meg. Válaszaim sorrendje a kérdések bírálóbeli sorrendjét követi.

Válaszok

Kérdés 1.

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 mágnesezési görbék leírására számos modellt dolgoztak ki. Dolgozatomban ezeket három nagy csoportba osztottam; mikrofizikai modellek, energetikai modellek és makroszkopikus vagy fenomenologikus modell típusok.

A hiszterézis modellek egyik meghatározó hazai szakértője Iványi Amália, áttekintő művében a mágneses hiszterézis leírására kidolgozott modelleket az alábbi csoportokba osztotta: analitikus modellek (Rayleigh-, Frölich-modell), dinamikus modellek (Duhem-, Hodgson-modell), Langevin típusú modellek (Langevin-Weiss, Jiles-Atherton modell), Preisach-modell, Stoner-Wohlfarth modell és Chua-típusú modellek [1].

A hiszterézises folyamatokkal foglalkozó konferenciákon elhangzott előadások és tudományos publikációk alapján – megítélésem szerint – napjainkban a Preisach-, Jiles-Atherton és a Stoner-Wohlfarth modellek, illetve ezek továbbfejlesztett változatai a legnépszerűbbek [2].

E modellek viszonylag nehezen alkalmazhatóak mérésiértékelési célokra, sok esetben nehéz az illesztő paramétereik fizikai értelmezése továbbá illesztésük nagy számítás igényű.

A többfázisú hiperbolikus modell (MH-modell) illesztése egyszerű, többváltozós regressziós feladat. Illesztő paramétereinek nagy részének fizikai tartalma van, ami megkönnyíti a modell segítségével számított mennyiségek használatát a mérések kiértékelésében és az anyagvizsgálatban.

Az MH-modell néhány anyagvizsgálati alkalmazási lehetősége:

- Telítési állapothoz tartozó paraméterek, görbék extrapolálása
- *Mágneses elemek* pl. fázisok szétválasztása, mágnesezési görbéik meghatározása (mágnesezési görbék dekompozíciója)
- Egyes fázisátalakulási folyamatok vizsgálata
- Mágneses körök elemeinek szeparálása (NDE alkalmazások)
- Permeabilás értékek és görbék meghatározása
- Mágnesezési görbék adatainak bevitele véges elemes térszámító programokba
- Egyéb hiszterézises folyamatok leírása
- Mágneses mérések kiértékelése (MBDE)

A $T(x)$ modell [3] esetén azt tapasztaltam, hogy csak meglehetősen pontatlanul illeszthető a normál mágnesezési görbe – origótól a telítésig terjedő – teljes tartományára. Ennek alapvető oka az, hogy a $T(x)$ modell a reverzibilis mágnesezési folyamat leírására lineáris függvényt használ, ami a telítési jelenség leírását lehetetlenné teszi. Ezért a $T(x)$ modellben szereplő, a reverzibilis mágnesezési folyamat leírására szolgáló lineáris tagot a fizikailag indokolhatóbb tanh függvényre módosítottam, és a megkülönböztethetőség céljából a modell e változatát hiperbolikus modellnek neveztem el.

Ez követően a hiperbolikus modell alkalmazhatóságát tanulmányoztam jelentősen eltérő mágneses jellemzőkkel rendelkező, lágymágneses ötvözeteken. Megállapítottam, hogy a modell e verziója csak a mágneses szempontból homogén – egy ferromágneses fázist tartalmazó – ötvözetek mágnesezési görbéinek leírására alkalmas. A mágneses szempontból inhomogén, azaz több eltérő mágneses tulajdonságú fázist tartalmazó ötvözetek esetén a hiperbolikus modell e változata már nem adott kielégítő eredményt.

A többfázisú hiperbolikus modell (MH-modell) alkalmas a több ferromágneses tulajdonságú fémtani fázist vagy szövetelemet tartalmazó ötvözetek mágnesezési görbéinek leírására is.

Kérdés 2.

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.

Az MH-modell alkalmazása és illesztése során ismernünk kell a mágneses elemek számát, ami egy vizsgált ötvözet esetén az abban előforduló „mágnesezhető” (azaz ferro- és ferrimágneses) fázisok számát jelenti. A modell felírt alakjában szereplő irreverzibilis komponensek számának meg kell egyeznie a vizsgált ötvözetben található „mágnesezhető” fázisok (szövetelemek) számával.

Ennek megfelelően a modellnek a két irreverzibilis és egy reverzibilis mágneses járulékot tartalmazó alakja (amit a dolgozatomban szereplő (7)-(10) egyenletcsoport ír le) alkalmazható a két „mágnesezhető” fázist (vagy szövetelemet) tartalmazó fémtani rendszerek leírására.

Az egyenletekben szereplő π és Φ jelű mennyiségek a mágneses elemek súlytényezői, amikből azok relatív térfogat aránya (V_{irrev1} , V_{irrev2}) számítható (a (10) egyenletek alapján).

A π és Φ jelű mennyiségek a modell illesztésekor végrehajtott többváltozós regresszió eredményeként adódnak.

Tehát az MH-modell alkalmazása során nem szükséges a mágneses elemek térfogatarányának ismerete azt a modell illesztése során eredményül kapjuk.

Összefoglalva; az MH-modell alkalmazásához az ötvözetben lévő „mágnesezhető” fázisok vagy szövetelemek számának ismerete szükséges, azok térfogatarányának előzetes ismeretére azonban nincs szükség, azt eredményül kapjuk.

Kérdés 3.

A dekompozíciós eljárásnak akkor lehet valódi jelentősége, ha nem a validáláshoz alkalmazott, makroszkopikus méretű lemezzrétegek 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?

Az MH-modell validálásához laboratóriumi körülmények között könnyen előállítható mintákat készítettem [4]. Ezek jelentősen eltérő mágneses tulajdonságú lemezminták rétegezésével épültek fel. E minták előnyösek voltak, mert az azokat felépítő lemezek mágnesezési görbéit külön-külön is meg tudtam mérni és a lemezcsoomagban a relatív térfogat arányukat a keresztmetszetük alapján pontosan tudtam számolni.

A modell további validálása valódi fémtani rendszerekre a TRIP és Lean-duplex (LDSS) acélokon történt.

A dolgozatom 6.1.2 fejezetében ismertetett vizsgálatok során az MH-modellt képlékenyen alakított TRIP 700 típusú acélmintára végeztem el. Itt az ötvözetben előforduló három ferromágneses szövetelemnek (ferrit, martenzit, bénit) megfelelően a modellben három irreverzibilis tagot (és egy reverzibilis) használtam. A modellel végzett számítások eredményeként meg tudtam határozni a szövetelemek relatív mennyiségét (6.3 ábra) és azok koercitív terét (6.4 ábra). E mintasorozat 18 darab mintáján végzett visszaszórt elektron diffrakciós (EBSD) mérésekkel is meghatároztam a ferrit, ausztenit és martenzit fázisok relatív térfogat arányát. Az alakítás hatására keletkező martenzitnek az MH-modell alapján számított és az EBSD méréssel meghatározott mennyiségeit tartalmazza dolgozatom 6.3 táblázata. Az eredmények jó egyezést mutatnak, azaz az alakított TRIP acél minták esetén az EBSD mérések igazolták a modell alapján számított martenzit fázisarányának helyességét.

A képlékenyen alakított LDSS mintákon végzett kísérletek (6.2.3 fejezet) során a minták mágneses tulajdonságait két független méréssel határoztam meg. Az első mérési sorozatban AC magnetométert, a másodikban DC magnetométert használtam.

Az AC magnetométerrel felvett normál mágnesezési görbékre illesztettem az MH-modellt, amit az ötvözetben található két ferromágneses fázisra (ferrit, martenzit) alkalmazva írtam fel (két irreverzibilis és egy reverzibilis komponenst feltételezve). A modellel végzett számítások eredményeként kapott martenzit mennyiségét továbbá a ferrit és martenzit fázisok koercitív terének alakulását az alakíthatóság függvényében mutatják a 6.40 és 6.41 ábrák.

A DC magnetométeres mérésekből származó telítési polarizáció értékek alapján is meghatároztam az alakítás hatására kialakuló martenzit mennyiségét (6.48 ábra).

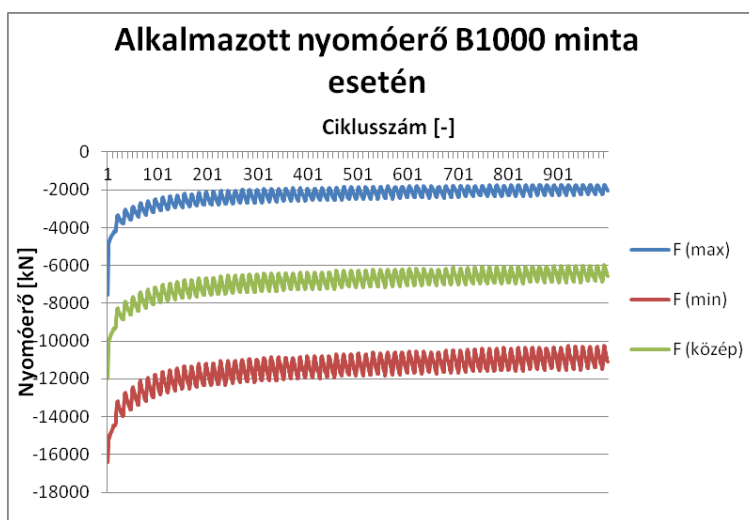
Az AC magnetométeres mérések adatai alapján az MH-modell felhasználásával végzett fázis dekompozíciós eljárással meghatározott α' -martenzit fázisarány (6.40 ábra) és az előbbiektől független DC magnetométeres mérésekkel, a telítési polarizáció adataiból meghatározott α' -martenzit fázisarány (6.48 ábra) jó egyezést mutat. A kétféle, egymástól független méréssel, illetve kiértékeléssel kapott jól megegyező értékek igazolják az MH-modellre épülő dekompozíciós eljárás helyességét és alkalmazhatóságát ötvözetek fázisarányának meghatározására vagyis validálják azt.

Összefoglalva; az MH-modell validálását a modell mintákon túlmenően elvégeztem két és három ferromágneses szövetelemet tartalmazó valódi ötvözetmintákon is.

Kérdés 4.

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 Gleeble szimulátorban végzett hőfárasztó vizsgálatok során az erő és alakváltozás adatokat rögzítettük. Dolgozatomban ezek terjedelmi okból nem szerepelnek. Az 1. ábra a B1000 jelű minta vizsgálata során regisztrált terhelő erő a ciklusszám diagramot mutatja.



1. ábra A B1000 jelű minta Gleeble szimulátorban végzett hőfárasztó vizsgálata során regisztrált terhelő erő a ciklusszám diagram.

A Gleeble szimulátorban végzett hőfárasztó vizsgálat során – technikai okból – nem végeztünk törésig való fárasztást. Ezért a tönkremeneteli ciklusszámot e sorozatnál nem ismerjük.

Az 5.11 ábrán bemutatott szövetképek az eredeti állapotú és az 1000 ciklust elszenvedett minták keresztirányú csiszolatait mutatják. A csiszolatok a minták közepén készültek.

Kérdés 5.

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, hőkezeltességű) mintával, hogy felmérje az ANLH módszer teljesítőképességét?

Az ANLH méréssel foglalkozó, nevezett cikk dolgozatom leadása óta megjelent, pontos publikációs adatai az alábbiak:

I. Mészáros, J. Ginsztler: Magnetic Testing of Power Plant Steel Deterioration, MATER SCI FORUM **792** (2014) pp. 183-188

Az ANLH mérés alkalmazásával, illetve tesztelésével kapcsolatban még további kísérleti eredményekről sajnos nem tudok beszámolni. Céлом a mérési eljárás további alkalmazása és fejlesztése. Ennek érdekében egy képlékenyen alakított majd hőkezelt duplex korrózióálló acél anyagú minta sorozatot készíték elő. E vizsgálatok eredményei egy éven belül várhatóak.

Kérdés 6.

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 koercitív tér és a mechanikai keménység eltérő viselkedést mutathat egy ferromágneses tulajdonságú új fázis (például α' -martenzit) létrejöttének hatására.

A vizsgált AISI 304 típusú ausztenites korrózióálló acél lágyított, kiindulási állapotában kizárólag ausztenit szemcséket tartalmaz így paramágneses tulajdonságú. Képlékeny alakítás hatására az ausztenit krisztallitokon belül apró, sokszor szub-mikroszkopikus α' -martenzit szemcsék jelennek meg s jelentik az egyetlen ferromágneses fázist az adott ötvözetben. Így e fázis koercitív tere adja a tömbi anyag koercitív terét. Más szavakkal, az α' -martenzit fázis koercitív tere – a jelen ötvözet esetén – megegyezik a vizsgált ötvözet koercitív terével. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy abban a tartományban ahol az α' -martenzit mennyisége jelentős (a 19 tf% - 69 tf% tartományában, ami megfelel a 28% és – a maximális mértékű – 62%-os alakíttottság tartományának) a tömbi minta koercitív tere állandó mintegy 38 A/cm értékű. Értelmezésem szerint, ez az érték megegyezik az ötvözetben kialakult α' -martenzit fázis koercitív terével.

Ismételten köszönöm Trampus Professzor Úr szakértő, gondos bírálói munkáját.

Budapest, 2015. február 20.

Mészáros István

Hivatkozott közlemények

- [1] A. Iványi: Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, Akadémiai Kiadó 1997.
- [2] Journal of Physics (Conference Series) Vol. 268, 2011, 5th International Workshop on Multi-Rate Process and Hysteresis (MURPHYS 2010), Pécs, Hungary, 31 May-3 June 2010.
- [3] J. Takacs: Mathematics of Hysteresis Phenomena (Wiley-VCH Verlag, Weinheim) 2003.
- [4] J. Takacs and I. Mészáros: Separation of magnetic phases in alloys. PHYSICA B 403 (2008) pp. 3137-3140
- [5] I Mészáros: Magnetic Measurement and Model Based Characterisation of Phase Transformation in Lean Duplex Stainless Steel, MATER SCI FORUM 721: 96-101 (2012)
- [6] I Mészáros: Magnetic characterization of phase transformations in TRIP steels, J ELECTR ENG 59: 86-89 (2008)
- [7] I Mészáros: Study of Phase Transformation in TRIP Steels, In: Stépán G, T. Szalay, Á. Antal, I. Gyurika (szerk.) Gépészet 2010: Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2010. p. 006. (ISBN:978-963-313-007-0)