

dc_839_14

EGYES ANYAGSZERKEZETI ÉS MÁGNESES TULAJDONSÁGOK KAPCSOLATÁNAK ÉRTELMEZÉSE

Akadémiai doktori értekezés tézisei

Mészáros István

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar*

*Budapest
2014*

dc_839_14

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Energia közlés hatására az anyagok szerkezetében változások következhetnek be. A szerkezeti anyagok használata, üzemeltetése során létrejövő nemkívánatos szerkezeti átalakulások, azaz leromlási folyamatok energia közlés eredményeként értelmezhetők. A létrehozott hatás szempontjából meghatározó az energia közlés módja, továbbá a közölt energia mennyisége és teljesítménysűrűsége.

1.1 Melegszilárd acélok leromlási folyamatai

A melegszilárd anyagokban a hosszú idejű, nagy hőmérsékletű üzemeltetés leromlási folyamatokat eredményezhet, amelyek repedések kialakulásához, illetve teljes tönkremenetelhez vezethetnek [1], [2]. Ezért az ilyen körülmények között üzemeltetett szerkezeti anyagok állapotának monitorozása alapvető fontosságú.

A hőerőművekben alkalmazott melegszilárd acélok elhasználódását döntően a következő igénybevételek, illetve fémtani folyamatok valamint ezek kölcsönhatásai okozzák [2], [3], [4], [5], [6], [7], [9], [8], [10], [11], [12], [13]:

- mechanikai fáradás,
- a ciklikus hőterhelés következtében létrejövő ún. hőfáradás,
- nagy hőmérsékleten (550-600 °C) és nagy nyomáson üzemelő csővezetékek esetén kúszás,
- a hőfáradási és kúszási folyamatok kölcsönhatása,
- különböző típusú korróziós folyamatok.

Gazdasági szempontból tehát alapvető fontosságú, hogy az energetikai ipar nagy értékű berendezéseit (csővezetékek, hőcserélők, kazánok, nyomástartó edények) a leghosszabb ideig tudjuk biztonságosan üzemeltetni. A leromlási folyamatok kezdeti szakaszában az alkatrészek élettartama regeneráló hőkezelés segítségével meghosszabbítható, a makrorepedések kialakulásáig eltelt idő megnövelhető. Ez szükségessé teszi a berendezések folyamatos állapotellenőrzését és szükség esetén regenerálását. Ezért napjainkban egyre nagyobb az igény olyan roncsolásmentes vizsgálati eljárásokra, amelyek megbízható információt szolgáltatnak a melegszilárd acélokból készített szerkezeti elemek elhasználódásának mértékéről, s így lehetővé teszik azok maradék élettartamának pontosabb becslését.

1.2 Egyes ötvözetek fázisátalakulási folyamatai

A szerkezeti és korrózióálló acélok egyes típusaiban képlékeny alakváltozás, illetve hőbevitel hatására fázisátalakulási folyamatok mehetnek végbe, amik a mechanikai és korróziós tulajdonságok jelentős romlásához vezethetnek.

A TRIP-acélok három szövetelemet tartalmaznak, ezek a ferrit, a bénit és az ausztenit. A szövetelemek aránya eltérő lehet, azonban a leggyakoribb eset az 50 tf% ferrit, 35 tf% bénit

és 15 tf% metastabilis maradék ausztenit [40]. A TRIP acélokra jellemző nagy szilárdságot és kiemelkedően jó alakíthatóságot a szövetben visszamaradó maradék ausztenitnek hidegalakítás hatására fokozatosan történő martenzitté történő átalakulásával magyarázhatjuk.

A hagyományos *ausztenites korrózióálló acélok* ausztenit fázisa termodinamikailag nem stabilis. Ez okozza az ausztenites korrózióálló acéloknak azt a tulajdonságát, hogy a paramágneses ötvözet gyors hűtés, képlékeny hideg alakítás vagy kisciklusú fárasztó igénybevétel [S38], [S58], [S59] hatására ferromágnesessé válik. Ennek fémtani oka az ún. alakítási- vagy α' -martenzit megjelenése [37], [38], [39]. Ez a fázisátalakulás fkk $\rightarrow$ tkk kristályszerkezeti változással jár, ami a mágneses kicserélődési energia megváltozásához és így a para $\rightarrow$ ferromágneses átalakuláshoz vezet. Az ausztenites korrózióálló acélokból létrejövő martenzitnek két típusát ismerjük az ϵ - és az α' -fázist, mindkettő diffúzió nélküli, azaz martenzites fázisátalakulással keletkezik [41], [42], [43], [44], [S30], [45], [46], [48].

A szoros illeszkedésű hexagonális (hcp) rácsú ϵ -fázis paramágneses, amíg a térben középpontos köbös (tkk) α' -fázis ferromágneses tulajdonságú. A fázisátalakulás végbemehet $\gamma \rightarrow \epsilon$, $\gamma \rightarrow \alpha'$, $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ kinetika szerint [47].

Az ϵ és az α' -fázisok termodinamikailag metastabilisak, emelt hőmérsékleten mindkettő teljes mértékben visszaalakul ausztenitté. Az ϵ -fázis 150-400 °C, amíg a nagyobb stabilitású α' -martenzit 400-800 °C hőmérsékleti tartományban transzformálódik vissza ausztenitté [49].

A *duplex (DSS) korrózióálló acélok* korrózióval szembeni ellenálló képessége lényegesen jobb, mint az ausztenites acéloké, különösen kloridiont tartalmazó környezetben,

A duplex acélok szövetszerkezete alapvetően két fázist tartalmaz; ferritet és ausztenitet.

Hőbevitel hatására következik be a metastabilis ferrit eutektikus bomlása szekunder ausztenitté és szigma fázissá ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$). A szigma fázis tetragonális rácsú, rideg, paramágneses tulajdonságú vegyületfázis, aminek megjelenése nagymértékben rontja a duplex rozsdamentes acélok mechanikai és korrózióállósági tulajdonságait. Ezért komoly gyakorlati jelentősége van azoknak – az elsősorban mágneses – vizsgálatoknak, amelyekkel e folyamat roncsolásmentesen tanulmányozható.

A *lean-duplex korrózióálló acélok (LDSS)* szövetszerkezete a duplex típusokhoz hasonlóan kettős, alapvetően ferrit és ausztenit fázisokat tartalmaz eltérő, de leggyakrabban 40-60% vagy 50-50% arányban. Ebben az acél típusban az ausztenitet stabilizáló nikkelt mangán és/vagy nitrogén ötvözéssel helyettesítik [50], [51], [52].

Azonban az LDSS acélok ausztenitje a DSS acélokhöz képest termodinamikailag kevésbé stabilis, így az ausztenites korrózióálló acélokhöz hasonlóan képlékeny hidegalakítás vagy extrém gyors hűtés hatására martenzites fázisátalakuláson mehet át így létrehozva az ún. alakítási- vagy lath-martenzit fázist. A martenzites fázisátalakulás az LDSS acélokból is az ausztenites korrózióálló acél esetén már tárgyalt három lehetséges kinetika szerint mehet végbe, azaz: $\gamma \rightarrow \epsilon$, $\gamma \rightarrow \alpha'$, $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ [53], [54].

1.3 Mágneses anyagvizsgálat

Az anyagvizsgálati eljárások során az anyaggal előre megtervezett módon energiát közlünk és annak erre a külső gerjesztésre adott válaszát vizsgáljuk. A lehetséges gerjesztési módok száma és változatossága óriási.

A mágneses roncsolásmentes vizsgálatok lehetőségét az anyag mágneses és egyéb tulajdonságai közötti kapcsolatok teremtik meg. Számos esetben találhatunk, ugyanis összefüggést az anyagok mágneses jellemzői és egyéb például szilárdsági, fáradási, kúszási, korróziós tulajdonságai között, ami lehetővé teszi egyes anyagtulajdonságok indirekt, roncsolásmentes meghatározását. A makroszkópikus anyagtulajdonságok és a mágneses jellemzők között felismert összefüggést akkor használhatjuk fel anyagvizsgálati célra, ha megértjük ezek közös anyagszerkezetani, illetve fémtani hátterét.

Napjainkban a leromlási folyamatok nyomon követésében, illetve a mérnöki szerkezetek maradék élettartam becslésében egyre jelentősebb az NDT, illetve NDE vizsgálatok szerepe ezen belül is növekszik a mágneses vizsgálati eljárások jelentősége [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

1.4 A kutatási munka rövid célkitűzése

Kutatási tevékenységem alapvető célja az ötvözetek szövet, illetve diszlokációs szerkezete és mágnes tulajdonságai közötti összefüggések feltárása és értelmezése volt. A hőbevitel és/vagy képlékeny alakítás hatására bekövetkező fázisátalakulási folyamatok és egyes melegszilárd acélokban hőfárasztó, illetve kúszási igénybevétel hatására történő leromlási folyamatok mágneses vizsgálatok segítségével történő nyomon követését tűztem ki célul.

Feladatomban tekintettem egy mágneses anyagvizsgáló laboratórium létrehozását, az anyagvizsgálati, valamint kutatási feladatokhoz szükséges mágneses mérési összeállítások, illetve mérőberendezések megtervezését, felépítését és kalibrálását.

Munkám során további célom volt olyan új, mágneses méréseken alapuló roncsolásmentes vizsgálati módszerek és metodikák fejlesztése, amelyek alkalmasak a ferromágneses viselkedésű acélokban végbemenő szerkezeti változások kimutatására és egyes mechanikai tulajdonságok indirekt, roncsolásmentes meghatározására. Ehhez kapcsolódóan, illetve ennek részeként a ferromágneses szerkezeti anyagok mágnesezési görbéinek matematikai leírására alkalmas modell kidolgozását tűztem ki célul.

2. A KUTATÁSI MUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA

Dolgozatomban összefoglaltam a mágneses mérések anyagvizsgálati alkalmazásaival kapcsolatos kutatásaim eredményeit. Munkám során az ötvözetek szövet- és hibaszerkezetében hőbevitel és/vagy képlékeny alakítás, illetve egyes igénybevételek hatására bekövetkező változások és anyag mágnes tulajdonságai közötti kapcsolatokat vizsgáltam és értelmeztem.

Eredményeim a mágnesezési görbék modellezéséhez, ennek alkalmazásához továbbá az egyes a vizsgálat tárgyát képező acélokban hőkezelés vagy képlékeny alakítás hatására lezajló fázisátalakulási folyamatokhoz, illetve erőművekben alkalmazott melegszilárd acélok

leromlási folyamatainak vizsgálatához kapcsolódnak. Az említett fémtani folyamatok nyomon követését minden esetben mágneses mérésekre alapulóan végeztem, amelyeket a szerkezetvizsgálatok és egyes mechanikai tulajdonságok mérése egészített ki. Az eredmények, megítélésem szerint, hozzájárulhatnak a fenti fémtani folyamatok jobb megértéséhez, továbbá a melegsízárd acélok élettartamának pontosabb becsléséhez és így azok további biztonságos üzemeltetéséhez.

Dolgozatomban tárgyalt kutatásaim során az alábbi anyagminőségekkel foglalkoztam: 15Mo3, 10CrMo910, 12H1MF, 15H1MF, 1Cr-0,5Mo-0,25V (ASTM A193-B16) melegsízárd acélok, TRIP 700 acél, AISI 304 ausztenites korrózióálló acél, 2507 szuperduplex korrózióálló acél, V2101Mn lean-duplex korrózióálló acél.

A fázisátalakulási folyamatok vizsgálatai során tanulmányozott acél típusokat és folyamatokat foglaltam össze az alábbi táblázatban.

Vizsgált ötvözet	Típusa	Kezelés	Fázisátalakulás
TRIP acél	TRIP 700	Képlékeny hidegalakítás: megnyújtás	Alakítási martenzit keletkezése $\gamma \rightarrow \text{martenzit}$
Ausztenites korrózióálló acél	AISI 304	Képlékeny hidegalakítás: megnyújtás, hengerlés	Alakítási martenzit keletkezése $\gamma \rightarrow \alpha'$
		Hideghengerlés + hőkezelés	Alakítási martenzit visszaalakulása ausztenitté, $\alpha' \rightarrow \gamma$
Szuperduplex korrózióálló acél	SDSS 2507	Hőkezelés	Ferrit termikus bomlási folyamata $\delta \rightarrow \gamma' + \sigma$
		Hideghengerlés + hőkezelés	
Lean-duplex korrózióálló acél	V 2101MN	Képlékeny hidegalakítás: hengerlés	Alakítási martenzit keletkezése $\gamma \rightarrow \alpha'$

Kutatási munkám eredményeit az alábbiakban nyolc témakörre bontva foglaltam össze.

2.1 Mágnesezési görbék modellezése, és a kidolgozott modell alkalmazásai

[S16], [S19], [S10], [S13], [S17], [S45], [S9], [S37], [S18], [S60], [S8], [S14], [S47]

A természetben és a társadalomban számos hiszterézises viselkedésű jelenséget, illetve folyamatot találunk és ismerünk. Ezek közös jellemzője, hogy a folyamatot leíró két mennyiség – amit tekinthetünk gerjesztésnek és válasznak – között matematikai értelemben nem egy-egy értelmű a kapcsolat, s koordináta rendszerben ábrázolva a két mennyiséget hurok jellegű, nemlineáris összefüggést kapunk. A hiszterézises viselkedés mindig

gerjesztésre adott késleltetett választ jelent, amit műszaki értelemben fázistolásként kezelhetünk. Más megfogalmazás szerint a hiszterézises viselkedésű rendszernek „memóriaeffektusa” van, vagyis a rendszer válaszjele függ annak „előéletétől”, tehát attól, hogy milyen úton jutott el a rendszer a pillanatnyi állapotába. Ismert, hogy a ferromágneses anyagokban ébredő mágneses indukció (B), illetve a mágnesezettség (M) és a külső mágneses tér (H) közötti kapcsolat nemlineáris, hiszterézist mutat [26], [27], [28], [32]. Az átmágneseződési folyamat és a mágnesezési görbék modellezésére számos lehetőség nyílik [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36].

Kidolgoztam a többfázisú hiperbolikus mágnesezési görbe modellt (MH-modell) [S16], [S19], ami széleskörűen, előnyösen alkalmazható a roncsolásmentes anyagvizsgálatban. Elkészítettem a modell illesztéséhez szükséges szoftvert, működését számos mintán teszteltem, alkalmazhatóságát, érvényességét igazoltam [S10], [S13].

Kidolgoztam egy az MH-modellre épülő méréskiértékelési eljárást (MBDE) [S16], [S19], ami eltérő tulajdonságú *mágneses elemek*et tartalmazó szerkezetek esetén lehetővé teszi, a *mágneses elemek* mágnesezési görbéinek és azok relatív térfogatarányának meghatározását. *(A mágneses elemek lehetnek; rendezett mágneses szerkezetű (ferro-, illetve ferrimágneses tulajdonságú) fémtani fázisok, illetve szövetelemek vagy más esetben egy mágneses kör eltérő ferromágneses anyagból készült részei.)*

Eltérő mágneses tulajdonságú minták rétegezésével előállított modell mintasorozaton [S16], [S19], továbbá TRIP [S17], [S45] és lean-duplex korrózióálló acél [S9] mintasorozaton igazoltam, hogy a mágneses mérések eredményeiből az eltérő tulajdonságú ferromágneses fázisok, illetve szövetelemek relatív térfogataránya és azok egyedi mágneses tulajdonságai meghatározhatóak. E vizsgálatok eredményei igazolták az MH-modell alkalmazhatóságát és validálták azt.

A nagyméretű nyomástartó edényeken, csővezetéseken végzett mágneses roncsolásmentes (on-line) vizsgálatok esetén a vizsgált darabot, annak felületére helyezett mágnesező járommal, AC gerjesztéssel mágnesezzük, aminek következménye, hogy a hordozható mérőfejjel végzett mérések eredménye függ a mágnesező járom tulajdonságaitól és légrés nagyságától egyaránt. Kidolgoztam egy új, az MH-modellre alapuló méréskiértékelési eljárást, ami lehetővé teszi, hogy a mérőfejjel végzett mágneses mérések eredményét függetlenné tegyük a mérőfej adottságaitól és a mágnesező pólusok és a minta felülete közötti légrés (lift-off) nagyságától. Így a mérőfej geometriájától és anyagától, továbbá a mérőfej és a minta közötti légrés (lift-off) hatásától függetlenül meghatározhatóak a vizsgált minta mágnesezési görbéi [S18], [S37], [S47].

Az MH-modellt sikeresen alkalmaztam hőfárasztott [S37], [S18], [S60], illetve kúszatott minták [S8], [S14] mért mágnesezési görbéinek kiértékelésére.

Az MH-modellen alapuló dekompozíciós eljárás alkalmazhatósága igazolja, hogy a több, eltérő tulajdonságú mágneses elemet tartalmazó rendszerek, illetve ötvözetek esetén az azokat felépítő mágneses elemek mágnesezési görbéi a relatív térfogataránnyal súlyozva összegződnek és közöttük egyéb kölcsönhatást nem szükséges feltételeznünk, vagyis a több mágneses elemet tartalmazó szerkezetekre, illetve fémtani rendszerekre érvényes a szuperpozíció elve.

Az MBDE eljárás alkalmazásának eredményei illusztrálják, hogy e kiértékelési eljárás segítségével számos olyan – a ferromágneses fázisok tulajdonságaira és relatív mennyiségükre vonatkozó – információt kaphatunk, ami a hagyományos szerkezetvizsgálati módszerekkel (metallográfia, SEM, EBSD) kapható eredményeket kiegészítheti. Így az MBDE eljárás alkalmazása hozzájárul a fázisátalakulási folyamatok során történő szerkezeti változások nyomon követéséhez, illetve a fémtani folyamatok kinetikájának jobb megismeréséhez.

2.2 Hőfáradási folyamatokból levonható következtetések

[S22], [S52], [S36], [S60], [S37], [S18], [S49], [S20], [S7], [S2]

15Mo3 típusú gyengén ötvözött, ferrit-perlites melegsilárd acélon végzett hőfárasztó vizsgálat (merek befogás, hőmérséklettartomány: 20-550 °C) eredményei alapján az alábbi megállapításokat tettem.

A hőfárasztási folyamat során a ciklusszám növekedésével három eltérő fémtani háttérű szakasz különíthető el. Az első, mintegy 300 ciklusban a koercitív tér csökkenése és a Barkhausen-zaj RMS értékének növekedése figyelhető meg, azaz ciklikus lágyulás következik be. Ezt követően, hozzávetőlegesen 300 és 1200 ciklus között a H_c növekszik, amit a diszlokációk számának növekedésével, illetve ezek sorokba rendeződésével hoztam kapcsolatba. A ciklusszám további növekedésének hatására már létrejönnek a mikro-, illetve 1200 ciklusszám felett már a felületen is látható makroszkopikus repedések. Ez feszültség relaxációval jár és így növeli a Barkhausen-zaj RMS értékét és a koercitív tér csökkenését okozza [S22], [S52], [S36].

Igazoltam, hogy az MH-modell α_1 jelű illesztő paramétere alkalmas a hőfárasztó igénybevétel által okozott szerkezeti változások jellemzésére [S60], [S37], [S18]. Az α_1 jelű paraméter meghatározása nem teszi szükségessé a mért minta mágnes telítését, azaz relatíve kis gerjesztéssel végzett mérések eredményeiből a leromlási folyamat követésére alkalmas szerkezetérzékeny jellemző származtatható. Alkalmazása elsősorban az ipari körülmények között a mérendő minta felületére helyezett mérőfejjel végzett mérések során előnyös. Ezzel olyan roncsolásmentesen végezhető mérési és kiértékelési eljárás alapját fejlesztettem ki, ami alkalmas, – akár ipari körülmények közötti – mérések végzésére a melegsilárd acélok kúszási károsodásának nyomon követésére, illetve azok maradék élettartam becslésének pontosabbá tételére.

Megállapítottam, hogy az eredetileg mágnesesen izotróp 15Mo3 típusú melegsilárd acélban a hőfárasztó igénybevétel olyan szerkezeti változásokat okoz, ami mágneses anizotrópiát indukál, aminek értéke a fárasztó ciklusok számának növekedésével növekszik [S49], [S20], [S7].

Kidolgoztam az adaptív nemlineáris felharmonikusok mérési eljárást (ANLH) és alkalmaztam hőfárasztó igénybevételnek (merek befogás, hőmérséklettartomány: 200-550 °C) kitett 10CrMo910, 12H1MF, 15H1MF melegsilárd acél mintákra. Igazoltam, hogy az ANLH eljárás lehetőséget ad a szerkezeti változások nagy érzékenységgű detektálására. Megállapítottam továbbá, hogy a hőfárasztás által okozott szerkezeti változások hatására az 5. és 7. felharmonikusok relatív fázisszögei monoton növekednek. A degradáció mértékének

jellemzésére elsősorban az 5. felharmonikus relatív fázisszögét találtam alkalmasnak. A mérés során kiválasztott ideális gerjesztési szint alkalmazásával (1000 fázisú ciklus hatására) az 5. felharmonikus relatív fázisszögei rendre 77%, 65%, 47%-ot növekedtek a 10CrMo910, 15H1MF, 12H1MF típusú melegszilárd acélok esetén [S2].

Megítélésem szerint a kapott eredménynek jól hasznosíthatóak a növelt hőmérsékleten üzemelő melegszilárd acélok tönkremeneteli folyamatainak vizsgálata során.

2.3 Kúszási folyamatokból levonható következtetések

[S36], [S52], [S7], [S14], [S8]

15Mo3 típusú acél 550 °C hőmérsékleten, 65 MPa terhelőfeszültséggel továbbá 1Cr-0,5Mo-0,25V (ASTM A193-B16) típusú acélon 650 °C hőmérsékleten, 25 MPa terhelőfeszültséggel végzett kúszatási kísérleteim során az alábbi megállapításokat tettem.

A kúszási igénybevétel a 15Mo3 típusú minták esetén a folyamat első 600 órája során, az 1Cr-0,5Mo-0,25V acél esetén a teljes kúszási idő alatt a minták koercitív terének csökkenését okozza, azaz mágneses lágyulási jelenség jön létre, amit a diszlokációs szerkezet változásával magyaráztam. A kúszási folyamat során ugyanis a diszlokációk a szemcsék belsejéből a szemcsehatár felé mozognak, aminek révén, a szemcsén belüli mágneses doménfal mozgás könnyebbé válik.

Bevezettem egy új szerkezetérzékeny mágneses jellemzőt (Θ) a kúszási folyamat által okozott leromlás jellemzésére, aminek meghatározása kisteres mágneses mérések eredményei alapján az MH-modell alkalmazásával történik. Igazoltam, hogy a Θ értéke szoros lineáris korrelációt mutat a telítési mágnesezési görbéből meghatározható koercitív tér értékével.

A Θ értékének meghatározásához szükséges mérések mágnesező jármot tartalmazó hordozható mérőfejjel elvégezhetőek mivel nem szükséges a vizsgált minta telítésig való mágnesezése. Ezzel olyan roncsolásmentesen végezhető mérési és kiértékelési eljárás alapját fejlesztettem ki, ami alkalmas, – akár ipari körülmények közötti – mérések végzésére a melegszilárd acélok kúszási károsodásának nyomon követésére, illetve azok maradék élettartam becslésének pontosabbá tételére.

2.4 TRIP acél fázisátalakulási folyamatából levonható következtetések

[S17], [S45], [S5]

A többfázisú hiperbolikus (MH) modellre alapuló kiértékelési eljárással meghatároztam a képlékenyen alakított TRIP acél mintákban a jelen lévő három ferromágneses tulajdonságú szövetelem (ferrit, bénit, martenzit) mágnesezési görbéit és relatív térfogat arányukat, azaz a minta tömbi mágneses tulajdonságaiból a felépítő szövetelemek mágneses tulajdonságaira következtettem.

EBSD vizsgálattal megmértem a martenzit fázis mennyiségét az alakított TRIP acél mintasorozat minden tagján. Megállapítottam, hogy a martenzit fázis mennyiségére vonatkozó eredmények jó egyezést mutatnak az MH-modellre alapuló kiértékelési eljárással meghatározott értékekkel. Így az alakított TRIP acél mintákat modellanyagként használva EBSD vizsgálatok segítségével sikeresen validáltam az MH-modellre alapuló kiértékelési eljárást.

Az MH-modellre alapuló kiértékelési eljárás eredményei alapján megállapítottam, hogy a TRIP 700 típusú acél képlékeny hidegalakítása során az ausztenit→martenzit fázisátalakulás folyamatos. A keletkező martenzit fázis mennyisége monoton növekszik a legnagyobb alkalmazott (28,3%-os) alakítási mértékig, ahol mennyisége eléri a mintegy 6 tf% értéket. Meghatároztam az egyes szövetelemek koercitív terének képlékeny alakítás során történő változását. Megállapítottam, hogy a bénit és a martenzit koercitív tere az alakítottság növekedésével nem változik, átlagos koercitív terük rendre mintegy 926, illetve 1222 A/m értékre adódott. Megállapítottam továbbá, hogy a ferrit fázis koercitív tere monoton növekedést mutat, s a kezdeti 223 A/m értékről az alakítás hatására mintegy 750 A/m-re emelkedik. Ezt a ferrit fázis képlékeny alakváltozásával magyaráztam, ami részben a külső terhelő feszültség, másrészt az ausztenit→martenzit fázisátalakulás során bekövetkező térfogat növekedés által a ferrit szemcsékre gyakorolt nyomófeszültség eredménye. A képlékeny alakítás hatására bekövetkező keménység növekedés oka kettős, egyrészt a ferrit fázis keménységének növekedése másrészt a martenzit fázis megjelenése, illetve mennyiségének növekedése.

2.5 Ausztenites korrózióálló acél fázisátalakulási folyamatából levonható következtetések

[S30], [S33], [S24], [S39], [S31], [S51], [S55]

Az AISI 304 típusú ausztenites korrózióálló acélban képlékeny alakítás és hőkezelés hatására történő fázisátalakulások vizsgálata során az alábbi megállapításokat tettem.

Megállapítottam, hogy a hideghengerléssel alakított minták α' -martenzit tartalma és Vickers keménysége monoton növekedést mutat az alakítottság növekedése során, az α' -martenzit tartalom 69 tf% értékig növekszik. A hengerlés során az α' -martenzit tartalom már a kezdeti, azaz legkisebb alakváltozástól növekedést mutat, és közel egyenletesen növekszik a teljes képlékeny alakítási tartományban.

Megállapítottam, hogy az egytengelyű húzó igénybevétel által létrehozott képlékeny hidegalakítás hatására a ferromágneses fázis mennyiségének növekedése csak 20%-nál

nagyobb mértékű alakváltozás esetén indul meg, mennyisége az alakítás mértékének növekedésével folyamatosan emelkedő meredekséggel növekszik egészen 12 tf% értékig. Ezt a jelenséget a $\gamma \rightarrow \alpha'$ fázisátalakulás során bekövetkező fajtérfogat növekedéssel magyaráztam. A martenzit fázis térfogat növekedése ugyanis a szomszédos ausztenit szemcsékre azok folyáshatáránál nagyobb nyomófeszültséget gyakorol, ami pozitív visszacsatolásként növeli a martenzites fázisátalakulás sebességét.

A megnyújtással és a hengerléssel végzett kísérletek eredményeinek összevetéséből azt a következtetést vontam le, hogy a keménység növekedésének hátterében két eltérő fémtani folyamat, a diszlokáció-sűrűség növekedése és az α' -martenzit mennyiségének növekedése áll. E két keménység, illetve szilárdság növelő mechanizmus a kialakult martenzit tartalom függvényében elkülöníthető. Mindkét vizsgált képlékeny alakítási mód esetén megállapítható, hogy mintegy 12 tf% α' -martenzit tartalomig a keménység, illetve szilárdság növekedését elsősorban az ausztenit képlékeny alakváltozása következtében történő diszlokáció-sűrűség növekedése okozza. 12 tf% α' -martenzit tartalom fölött azonban a keménység további növekedését döntően az α' -martenzit mennyiségének emelkedése eredményezi.

Megállapítottam, hogy a hengerlés által létrehozott komplex képlékeny alakváltozás lényegesen nagyobb mennyiségű α' -martenzit fázist hoz létre, mint az egytengelyű húzó igénybevétel. Hengerléssel 69 tf%, megnyújtással maximálisan 12 tf% α' -martenzit jött létre a kísérleteim során. Azonos mértékű, 40%-os képlékeny alakítás hengerlés esetén 40 tf%, megnyújtás esetén 16 tf% α' -martenzit kialakulását eredményezte.

Megállapítottam, hogy az egységesen 47,8% mértékben hideghengerléssel alakított, majd izotermikusan 30 percig hőkezelt ausztenites ötvözetben az α' -martenzit ausztenitté történő visszaalakulása és a keménység csökkenése eltérő hőmérséklet tartományban megy végbe. A keménység csökkenése 550 °C hőmérsékleten indul és 1000 °C-on fejeződik be, amíg a martenzit visszaalakulása az 500-800 °C hőmérséklet tartományban történik. E jelenséget a visszaalakult ausztenit szemcsék nagy diszlokáció-sűrűségével és bennük található nagy mennyiségű ikersík és illeszkedési hiba szilárdságnövelő hatásával, másrészt a hőkezelés során 500 °C hőmérséklet fölött létrejövő karbid szemcsék diszlokáció mozgást nehezítő hatásával magyaráztam.

2.6 Szuperduplex korrózióálló acél fázisátalakulási folyamatából levonható következtetések

[S4], [S27], [S15], [S29], [S6], [S42], [S53], [S32], [S48], [S62], [S61], [S38], [S57], [S56]

2507 típusú szuperduplex korrózióálló acél (SDSS) mintákon négy kísérletsorozatban végzett vizsgálataim alapján az alábbi megállapításokat tettem.

60 perces izotermikus hőkezelés során a ferrit eutektoidos bomlási folyamata 500 °C hőmérsékleten kezdődik intenzívvé azonban csak 700 °C felett válik. A diffúziós fázisátalakulás legnagyobb sebességgel 800 °C hőmérsékleten zajlik, ami megfelel az izotermikus átalakulási diagram orrpontjának. A ferrit fázis mennyiségi csökkenése a keménység növekedésével jár együtt, amit a $\delta \rightarrow \gamma' + \sigma$ fázisátalakulás (delta-ferrit szekunder ausztenitté és szigma-fázissá történő bomlása) kinetikájával magyaráztam. A ferrit

dekompozíciója ugyanis az ausztenit-ferrit szemcsehatárokon indul, a ferrit rovására növekedő szekunder ausztenit szemcsék belsejében diszperz eloszlású, apró σ -fázis kiválások keletkeznek, amelyek a szekunder ausztenit szemcsék és így az ötvözet keménységét nagymértékben növelik. A 700 és 900 °C hőmérsékleten hőkezelt mintákon elvégzett EBSD vizsgálatok fázistérképei alátámasztják a ferrit bomlási folyamatának kinetikáját. [S27], [S29], [S32], [S53], [S15]

A 720-900 °C hőmérséklet tartományban egységesen 20 percig izotermikusan hőkezelt SDSS minták mágneses telítési polarizáció értékei alapján meghatároztam a ferrit termikusan aktivált bomlási folyamatának aktiválási energiáját, ami 177 kJ/mol értékre adódott.

Megállapítottam, az ötvözet mágneses telítési polarizációja független a képlékeny hidegalakítás mértékétől a 0-85% tartományban, átlagos értéke 0,397 T. Tehát a nagymértékű képlékeny hidegalakítás sem hoz létre benne alakítási martenzit fázist, azaz a vizsgált SDSS ötvözet ausztenit fázisa stabilis. A vizsgált ötvözet ausztenit fázisának stabilitását indokolja annak nagy (47,2 mJ/m²) rétegződési hiba energiája. [S6], [S42]

Az előzetesen eltérő mértékben hidegen hengerelt és egységesen 40 perc időtartamú 900 °C hőmérsékletű izotermikus hőkezelésnek alávetett SDSS minták mágneses telítési polarizáció értékei alapján megállapítottam, hogy a hőkezelést megelőző képlékeny hidegalakítás gyorsítja a ferrit termikus bomlási folyamatát, illetve a szigma-fázis precipitációját. [S6], [S42]

Kismértékű alakítottság már jelentős mértékben gyorsítja a ferrit bomlását, azonban az alakítottság további növekedése már egyre kevésbé befolyásolja a bomlási folyamat sebességét. A rendelkezésre álló eredmények alapján arra következtettem, hogy a 65%-nál nagyobb mértékű alakítás már nem jár a ferrit bomlási sebességének további növekedésével. [S6], [S42]

Az előzetes képlékeny alakításnak a ferrit termikus bomlási sebességére gyakorolt hatását az alakítás hatására az ausztenit szemcsék belsejében létrejövő ikerhatárok és illeszkedési hibák sűrűségének növekedésével magyaráztam. Az említett felületszerű rácshibák hatása kettős. Egyrészt azok metszéspontjai, kristálycsíráként szolgálnak, elősegítik a szigma-fázis nukleációját, másrészt a szigma-fázis létrejöttéhez szükséges króm és molibdén diffúziója gyorsabb a felületszerű hibák mentén. [S6], [S42]

2.7 Lean-duplex korrózióálló acél fázisátakulási folyamatából levonható következtetések

[S3], [S6] [S9], [S11], [S12], [S40], [S41], [S42], [S43], [S44]

A vizsgált V2101Mn típusú lean-duplex korrózióálló acélra vonatkozóan az alábbi megállapításokat tettem.

A ferromágnes tulajdonságú alakítási martenzit (α' -martenzit) fázis 30%-os mértékű képlékeny alakítás fölött jelenik meg az ötvözetben. 30%-os alakítottság fölött az α' -martenzit mennyisége monoton növekszik egészen 19,6% értékig, aminek alapján megállapítható,

hogy az alkalmazott legnagyobb mértékű (80%) képlékeny alakítás hatására az ötvözetben lévő közel teljes ausztenit fázis α' -martenzit fázissá transzformálódik.

Az MH-modellre alapuló kiértékelési eljárással meghatároztam a vizsgált lean-duplex korrózióálló acélban jelen lévő ferrit és α' -martenzit fázisok mágneses telítési polarizációját, ezek rendre 0,942 T és 0,911 T értékre adódtak.

Megállapítottam, hogy az ötvözet α' -martenzit fázisának koercitív tere az alakítás mértékétől függetlennek tekinthető, nagysága 79,5 A/cm értékre adódott. Ennek alapján feltételeztem, hogy a kialakuló martenzit szerkezete nem változik a képlékeny alakítás során.

Az ötvözet ferrit fázisának koercitív tere a relatíve kis alakváltozási tartományban (30% alatt) jelentős emelkedést mutat. Ebből arra következtettem, hogy ebben az alakváltozási tartományban a képlékeny alakítás során döntően a ferrit szemcsék deformálódnak, diszlokáció-sűrűségük és ezzel együtt koercitív terük is növekszik.

A Vickers-keménység és az α' -martenzit fázis mennyiségének kapcsolata alapján megállapítottam, hogy 30%-os alakítottság alatt a keménység növekedésének hátterében döntően a ferrit alakváltozási keményedése áll. Az e fölötti (30%-80% közötti) alakváltozási tartományban a keménység növekedését az α' -martenzit mennyiségi növekedésével magyaráztam.

2.8 Mágneses mérés technikai és metodikai fejlesztések

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszékén több új, digitalizált adatgyűjtéssel és feldolgozással működő korszerű mérési összeállítást terveztem és építettem. Ezek az alábbiak; AC-magnetométer [S1], [S5], [S6], [S32], rezgőminta magnetométer [S23], [S26], [S27], [S48], [S49], [S50], [S15], [S7], DC-magnetométer [S3], [S4], [S6], [S11], [S12], [S46], [S41], Barkhausen-zajmérő berendezés [S35], örvényáramú vezetőképesség mérő [S34], [S54], korszerűsített nyílt mágneskörös DC-koerciméter [S46], mágneses adaptív teszt optimalizálása, mérőfej hatásának vizsgálata [S25], [S28].

Kutatásaim során mágneses méréseimet nagyrészt e mérési összeállításokkal végeztem. A kifejlesztett mágneses mérőeszközök jól használhatónak bizonyultak oktatási tevékenységem során is.

3. TÉZISEK

A ferro- illetve ferrimágneses anyagok mágnesezési görbéinek matematikai modellezése, a kidolgozott modell alkalmazása valamint, TRIP, ausztenites, szuperduplex és lean-duplex korrózióálló acélokban képlékeny alakítás és/vagy hőkezelés hatására lezajló fázisátalakulási folyamatok, továbbá egyes erőművekben alkalmazott melegsziárd acélok leromlási folyamatainak vizsgálatai során új tudományos eredményekre jutottam. A vizsgálat tárgyát képező acélok mágneses tulajdonságainak mérésével nyert jelentős mennyiségű adat, szerkezeti jellemzőik továbbá egyes mechanikai tulajdonságaik kapcsolatának kiértékelése és értelmezése alapján születtek az alábbi tézisek.

1. Tézis

A ferro-, illetve ferrimágneses anyagok mágnesezési görbéinek leírására kidolgoztam a többfázisú hiperbolikus modellt (MH-modell), ami a mágnesezési görbét tangens hiperbolikus függvények lineáris kombinációjaként állítja elő. A modell előnyösen alkalmazható a mágneses roncsolásmentes anyagvizsgálatban.

Kidolgoztam egy, az MH-modellre épülő kiértékelési eljárást, ami eltérő tulajdonságú *mágneses elemeket** tartalmazó szerkezetek esetén lehetővé teszi a felépítő *mágneses elemek* mágnesezési görbéinek és azok relatív térfogatarányának meghatározását.

Eltérő mágneses tulajdonságú minták rétegezésével előállított modell mintasorozaton, továbbá TRIP és lean-duplex korrózióálló acél mintasorozaton – mint modellanyagokon – igazoltam, hogy a mágneses mérések eredményeiből a ferro- vagy ferrimágneses fázisok, illetve szövetelemek relatív térfogataránya és azok egyedi mágneses tulajdonságai meghatározhatóak. E vizsgálatok eredményei igazolták az MH-modellből számított eredmények helyességét, a modell alkalmazhatóságát, azaz validálták azt. [S16], [S19], [S10], [S13], [S17], [S45], [S9]

**A mágneses elemek lehetnek; rendezett mágneses szerkezetű (ferro-, illetve ferrimágneses tulajdonságú) fémtani fázisok, illetve szövetelemek vagy más esetben egy mágneses kör eltérő ferromágneses anyagból készült részei.*

2. Tézis

Kidolgoztam egy, az MH-modellre alapuló mérésiértékelési eljárást, aminek segítségével a mérőfej geometriájától, anyagától továbbá a mérőfej és a minta közötti légrés (lift-off) nagyságától függetlenül meghatározhatóak a vizsgált minta mágneses tulajdonságai. [S37], [S18], [S47], [S60]

3. Tézis

Az MH-modell alapján új szerkezetérzékeny mágneses jellemzőket vezettem be a hőfárasztó (α_1) és a kúszási (Θ) igénybevétel által okozott szerkezeti változások jellemzésére. E jellemzők meghatározása nem teszi szükségessé a mért minta mágneses telítését. Alkalmazásuk elsősorban az ipari körülmények között, a mérendő minta felületére helyezett

mérőfejjel végzett mágneses roncsolásmentes vizsgálatok során előnyös. [S8], [S14], [S37], [S60]

4. Tézis

15Mo3 típusú ferrit-perlites melegszilárd acélon végzett mágneses vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a hőfáradási folyamat (merev befogás, hőmérséklettartomány 20-550 °C) során a ciklusszám növekedésével három eltérő fémtani háttérű folyamat különíthető el. Az első, mintegy 300 ciklus során a koercitív tér (H_c) csökken, azaz ciklikus lágyulás történik. 300 és 1200 ciklus között a diszlokáció sűrűség növekedése és a szubszemcsék méretének csökkenése miatt a H_c növekszik, majd e fölött – a repedések keletkezésével egyidőben – ismét csökken.

Mérésekkel igazoltam, hogy az eredetileg mágnesesen közel izotróp 15Mo3 típusú acélban a hőfárasztó igénybevétel által okozott szerkezeti változások mágneses anizotrópiát indukálnak, aminek értéke a fárasztó ciklusok számával növekszik. [S22], [S52], [S36], [S37], [S49], [S20], [S60], [S7]

5. Tézis

15Mo3 típusú acél 550 °C hőmérsékleten, 65 MPa terhelőfeszültséggel, továbbá 1Cr-0,5Mo-0,25V (ASTM A193-B16) típusú acél 650 °C hőmérsékleten, 25 MPa terhelőfeszültséggel végzett kúszatási kísérletei alapján az alábbi következtetésekre jutottam.

A kúszási igénybevétel a 15Mo3 típusú minták esetén a folyamat első 600 órája során, az 1Cr-0,5Mo-0,25V acél esetén a teljes kúszási idő alatt a minták koercitív terének csökkenését okozza, azaz mágneses lágyulási jelenség jön létre. A kúszási folyamat során ugyanis a diszlokációk a szemcsehatár felé mozognak, így a szemcsén belüli diszlokáció sűrűség csökken, ami a mágneses doménfal mozgást könnyebbé teszi. [S8], [S14], [S36], [S37]

6. Tézis

A többfázisú hiperbolikus (MH) modellre alapuló kiértékelési eljárás alkalmasnak bizonyult a képlékenyen alakított TRIP 700 típusú acél mintában a jelen lévő három ferromágneses tulajdonságú szövetelem (ferrit, bénit, martenzit) koercitív terének és relatív térfogat arányának meghatározására.

Mágneses méréseim eredményei alapján megállapítottam, hogy a vizsgált TRIP acél képlékeny hidegalakítása során az ausztenit→martenzit fázisátalakulás folyamatos. A keletkező martenzit fázis mennyisége monoton növekszik a legnagyobb alkalmazott (28,3%-os) alakítási mértékig, ahol mennyisége eléri a mintegy 6 tf% értéket.

A bénit és a martenzit koercitív tere az alakítottság növekedésével nem változik, átlagos koercitív terük rendre mintegy 926, illetve 1222 A/m értékre adódott, azonban a ferrit fázis koercitív tere monoton növekedést mutat, a kezdeti 223 A/m értékről – 28,3% mértékű képlékeny alakítás hatására – mintegy 750 A/m-re emelkedik. Ezt a ferrit fázis képlékeny

alakváltozása magyarázza, amit egyrészt a külső terhelő feszültség, másrészt az ausztenit→martenzit fázisátalakulás során bekövetkező térfogat növekedés által a ferrit szemcsékre gyakorolt nyomófeszültség eredményez. [S17], [S45], [S5]

7. Tézis

Az AISI 304 típusú ausztenites korrózióálló acél mágneses vizsgálatai során kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy;

- a, Egytengelyű húzó igénybevétel hatására az α' -martenzit fázis keletkezése 20%-os mértékű képlékeny hidegalakítás hatására indul meg, mennyisége az alakítás mértékének növekedésével folyamatosan emelkedő meredekséggel növekszik, amit az ausztenit→ α' -martenzit fázisátalakulás során bekövetkező fajtérfogat növekedés magyaráz.

A hengerlés által létrehozott komplex képlékeny alakváltozás – azonos mértékű alakítottság esetén – lényegesen nagyobb mennyiségű α' -martenzit fázist hoz létre, mint az egytengelyű húzó igénybevétel a vizsgált acélban.

A kialakult martenzit tartalom függvényében két keménység növelő mechanizmus különíthető el. A keménység növekedését 12 tf% α' -martenzit tartalomig elsősorban az ausztenit diszlokáció-sűrűségének emelkedése, ezt meghaladó martenzit tartalom esetén döntően az α' -martenzit mennyiségének növekedése okozza. [S30], [S33], [S39], [S51], [S55], [S31], [S24]

- b. A 47,8% mértékű hideghengerlés által létrehozott α' -martenzit fázis 30 perces izotermikus hőkezelés hatására történő visszaalakulása ausztenitté és a keménység csökkenése eltérő hőmérséklet tartományban történik, amit a visszaalakult ausztenit szemcsékben lévő nagyszámú diszlokáció, ikersík és illeszkedési hiba, valamint a hőkezelés során létrejövő karbid szemcsék diszlokáció mozgást nehezítő hatása magyaráz. [S30], [S33], [S39], [S31]

8. Tézis

A 2507 típusú szuperduplex korrózióálló acél (SDSS) mágneses vizsgálatai során kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy;

- a. 60 perc időtartamú izotermikus hőkezelés során a ferrit eutektoidos bomlási folyamata 500 °C hőmérsékleten kezdődik, 700 °C-on válik intenzívvé, legnagyobb sebességgel 800 °C hőmérsékleten zajlik. A ferrit fázis mennyiségi csökkenése a keménység növekedésével jár együtt, amit a delta-ferrit szekunder ausztenitté és szigma-fázissá történő bomlási folyamata ($\delta \rightarrow \gamma' + \sigma$) magyaráz. A ferrit rovására növekedő szekunder ausztenit szemcsék belsejében ugyanis diszperz eloszlású σ -fázis kiválások keletkeznek, amelyek annak keménységét nagymértékben növelik.

A vizsgált SDSS ötvözet mágneses telítési polarizációjának értéke (átlagosan 0,397 T) független a képlékeny hidegalakítás mértékétől a 0-85% alakítottsági tartományban, azaz az ötvözet ausztenit fázisa stabilis, amit annak nagy (47,2 mJ/m²) rétegződési hiba

energiája is alátámaszt. [S27], [S4], [S15], [S29], [S6], [S42], [S53], [S32], [S48], [S62], [S38], [S56], [S57], [S61]

- b. Az eltérő mértékben hidegen hengerelt és egységesen 40 perc időtartamú 900 °C hőmérsékletű izotermikus hőkezelésnek alávetett SDSS acélban a hőkezelést megelőző képlékeny hidegalakítás gyorsítja a ferrit termikus bomlási folyamatát, azonban a 65%-ot meghaladó mértékű alakítás már nem jár a ferrit bomlási sebességének további növekedésével.

Az előzetes képlékeny alakításnak a ferrit termikus bomlási sebességére, illetve a szigma-fázis precipitációjára gyakorolt hatását az ausztenit szemcsék belsejében a képlékeny alakítás hatására létrejövő ikerhatárok és illeszkedési hibák sűrűségének növekedése okozza. [S6], [S42], [S61]

9. tézis

A V2101Mn típusú lean-duplex korrózióálló acél mágneses vizsgálatai során megállapítottam, hogy a hideghengerlés hatására történő martenzites fázisátalakulási folyamatban a ferromágneses tulajdonságú α' -martenzit fázis 30%-os mértékű képlékeny alakítás hatására jelenik meg, a további alakítás során mennyisége monoton növekszik. 80%-os mértékű képlékeny alakítás hatására az ausztenit közel teljes mértékben α' -martenzit fázissá transzformálódik.

Az MH-modellre alapuló kiértékelési eljárással meghatároztam a ferrit és α' -martenzit fázisok mágneses telítési polarizációját, amelyek rendre 0,942 T és 0,911 T értékűnek adódtak.

Az ötvözet ferrit fázisának – az MH-modell alapján meghatározott – koercitív tere a relatíve kis alakváltozási tartományban (30% alatt) jelentős emelkedést mutat, vagyis e tartományban a ferrit szemcsék deformálódnak, diszlokáció-sűrűségük és ezzel együtt koercitív terük is növekszik.

A Vickers-keménység és az – MH-modell alapján meghatározott – α' -martenzit mennyiségének kapcsolata alapján megállapítottam, hogy 30%-os mértékű alakítottság alatt a keménység növekedését döntően a ferrit alakváltozási keményedése, e fölött (30%-80%) az α' -martenzit mennyiségi növekedése okozza. [S3], [S6] [S9], [S11], [S12], [S40], [S41], [S42], [S43], [S44]

dc_839_14

4. A TÉZISFÜZETBEN SZEREPLŐ IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. Ginsztler: Mechanical Behaviour of Materials at High Temperature, NATO ASI Series. Vol. 15. Ed. by: C.M.Branco pp. 419-430. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, Boston, London), 1989.
- [2] Gordon W. Powell et al.: ASM Handbook, Volume 11., Failure analysis and prevention., 1991-1998
- [3] Baldwin, E.E., Sokol G.J., Coffin L.F.: Cycling strain fatigue studies on AISI Type 347 stainless steel, Trans. ASTM Vol. 57. 1957, pp. 567-586
- [4] J. Ginsztler, R.P. Skelton: Component reliability under creep-fatigue conditions, 1998. pp. 1-242, CISM (Udine), Springer Verlag (Wien, New-York)
- [5] R.P. Skelton: High temperature fatigue: Properties and Prediction, 1987
- [6] S. W. Nam, S. C. Lee, J.M. Lee: The effect of creep cavitation on the fatigue life under creep-fatigue interaction, 1995, Nuclear Engineering and Design, pp 213-221
- [7] C.Y. Jeong, S.W. Nam, J. Ginsztler: Activation processes of stress relaxation during hold time in 1Cr-Mo-V steel, 1998, Materials Science and Engineering, p 188
- [8] Gillemot László: Anyagszerkezetten és anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó, Budapest 1988.
- [9] Prohászka János: A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai, Műegyetemi kiadó, 2001
- [10] Verő József, Káldor Mihály: Fémtan, Tankönyvkiadó, Budapest 1977
- [11] Káldor Mihály: Fizikai metallurgia, Műszaki könyvkiadó, Budapest 1990
- [12] Gács Zoltán, Mertinger Valéria: Fémtan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000
- [13] Roósz András: Fémtan I., Miskolci Egyetem, 2011
- [14] G. Sposito, C. Ward, P. Cawley, P.B. Nagy, C. Scruby: A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels, 2010, NDT&E International, pp 555-567
- [15] P.Jain, M.Godbole: Review of magnetic hysteresis-based NDE of creep damage in power plant steels, Insight Vol. 54. No3 pp. 1-6.
- [16] Blitz J. (1991) Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, Adam Hilger IOP Publishing, Ltd, Bristol
- [17] Devine M.K. (1992) Magnetic detection of material properties (1992) J. Min. Met. Mater. (JOM), pp. 24-30
- [18] Devine M.K., Kaminski D.A., Sipahi L.B. Jiles D.C. (1992) Detection of fatigue in structural steels by magnetic property measurements, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 1, pp. 249-253
- [19] Dobmann G., Altpeter I., Kopp M., Rabung M., Hubschen G. (2008) ND-materials characterization of neutron induced embrittlement in German nuclear reactor pressure vessel material by micromagnetic NDT techniques, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI), p.54, IOS Press, ISBN 978-1-58603-896-0
- [20] Gillemot F., Pirfo Barroso S. (2010) Possibilities and difficulties of the NDE evaluation of irradiation degradation, Proceedings of 8th International Conference

on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing (ICBM8) (ISBN 978-952-67247-2-0)

- [21] Jiles D.C. Introduction to the Principles of Materials Evaluation, CRC Press, 2008.
- [22] Jiles D.C. (1988) Review of magnetic methods for nondestructive evaluation, NDT International Vol. 21, p. 311
- [23] Jiles D.C. (2001) Magnetic methods in nondestructive testing, In: Encyclopedia of Materials Science and Technology, K.H.J. Buschow et al., Eds, p.6021, Elsevier Press, Oxford
- [24] Vértessy G., Tomáš I., Takahashi S., Kobayashi S, Kamada Y, Kikuchi H., (2008c) Inspection of steel degradation by Magnetic Adaptive Testing, NDT & E INTERNATIONAL, Vol. 41. pp. 252-257
- [25] A.A. Dubov: A study of metal properties using the method of magnetic memory, Metal Science and Heat Treatment Vol. 39. Nos. 9- 10, 1997, pp. 401-405
- [26] K. Simonyi, L. Zombory, Elméleti Villamosság, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [27] E. Della Torre: Magnetic Hysteresis (Wiley-IEEE, 2000)
- [28] H. Kronmüller, M. Fähnle: Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids. 2003 Cambridge University Press
- [29] F. Liorzou, B. Phelps, D. L. Atherton, Macroscopic Models of Magnetization, IEEE Trans. Magn., vol. 36, 2000, pp. 418-427.
- [30] Mayergoyz, Mathematical Models of Hysteresis, New York, Springer-Verlag, 1991.
- [31] A. Iványi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, Akadémia Kiadó, Budapest, 1997.
- [32] G. Bertotti, Hysteresis in Magnetism, Academic Press, 1998.
- [33] D. C. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, London, 1991.
- [34] Kuczmann M., Iványi A., The Finite Element Method in Magnetism, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [35] J. Takacs: Mathematics of Hysteresis Phenomena (Wiley-VCH Verlag, Weinheim) 2003.
- [36] J. Takacs: A phenomenological mathematical model of hysteresis, COMPEL Vol. 20 No.4,(2001), pp. 1002-1014.
- [37] E. Nagy-V. Mertinger-F. Tranta-J. Sólyom: Deforming Texture Effects on Phase Transformation in Stainless Steels, Materials Science Forum Vols. 414-415. (2003) pp.281-288
- [38] E. Nagy-V. Mertinger-F. Tranta-J. Sólyom: Thermo mechanical Treatment of Stainless Steels, Materials Science Engineering A 378 (2004) pp.308-313
- [39] E. Nagy-V. Mertinger-F. Tranta-J. Sólyom: Investigation of Thermo mechanical Treated Austenitic Stainless Steel, Materials Science Forum Vols.473-474 (2005) pp.237-242

- [40] J. Adamczyk, A. Grajcar: Structure and mechanical properties of DP-type and TRIP-type sheets obtained after the thermomechanical processing, *J Mater Process Technol* 2005; 162–163 pp 267–74.
- [41] S.S.M. Tavares, J.M. Neto, M.R. da Silva, I.F. Vasconcelos, H.F.G. de Abreu; “Magnetic properties and α' martensite quantification in an AISI 301LN stainless steel deformed by cold rolling”; *Materials characterization* 59 (2008) 901–904
- [42] Mangonon PL, Thomas G; “The martensite phases in 304 stainless steel” *Metall Trans* 1970; 1:1577–86.
- [43] M. Milad, N. Zreiba, F. Elhalouani, C. Baradai; “The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel”; *journal of materials processing technology* 203 (2008) 80–85
- [44] Jeom-Yong Choi and Won Jin; “Strain induced martensite formation and its effect on strain gardening behavior in the cold drawn 304 austenitic stainless steels”; *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 1, pp. 99-104, 1997
- [45] Mangonon, P. L., Thomas, G. (1970) *Metall. Trans.*, 1, 1577.
- [46] Speich, G. R. (1973) *Metals Handbook*, Vol. 8, 425.
- [47] Reed, R. P. (1962) *Acta Met.*, Vol. 10, 865.
- [48] Murr, L. E., Standhammer, K. P. (1982) *Scripta Met.*, 16, 713.
- [49] Harries, D. R. (1981) *Physical metallurgy of iron-chromium-nickel austenitic stainless steels*, Int. Conf. Mech. Behaviour and Nuclear Applications of Stainless Steels at Elevated Temperatures, Varese, May 1981, London, Metals Society.
- [50] H.W. Hayden, S. Floreen; “The influence of martensite and ferrite on the properties of two-phase stainless steels having microduplex structure”; *Metallurgical Transactions*, Vol.1, July 1970-1955
- [51] Liljas Mats, Johansson Pelle, Liu Hui-Ping, Olsson Claes-Olof; “ Development of a lean duplex stainless steel”; *Steel Research International*, v 79, n 6, p 466-473, June 2008
- [52] M. Liljas, P. Johansson, H.P. Liu, C. Olsson, Development of a lean duplex stainless steel, *Steel Research International* 79 (2008), 466-473.
- [53] I. Alteinberger, B. Scholtes, V. Martin, H. Oetel, Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304, *Materials Science and Engineering A*, 264 (1999) 1-16.
- [54] S.S.M. Tavares, M.R. da Silva, J.M. Pardal, H.F.G. Abreu, A.M. Gomes; “Microstructural changes produced by plastic deformation in the UNS S31803 duplex stainless steel”; *Journal of Materials Processing Technology* 180 (2006) 318–322

5. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Tibor Berecz, Levente Balogh, István Mészáros, Ágoston Steinbach: The Radial Hardness-Profile and the Microstructure of Railroad Car Axle Materials Treated by Surface Rolling, Determined by Novel Examination Methods, MAT SCI ENG A-STRUCT **592**: 95-101 (2014)
- [S2] I Mészáros, J. Ginsztler: Magnetic Testing of Power Plant Steel Deterioration, MATER SCI FORUM **?**: 1-6 (2014) (Közlésre elfogadva, megjelenés alatt)
- [S3] P Bassani, M Breda, K Brunelli, I Mészáros, F Passaretti, M Zanellato, I Calliari: Characterization of a Cold-Rolled 2101 Lean Duplex Stainless Steel, MICROSC MICROANAL **19**: 988-995 (2013)
- [S4] I Mészáros: Thermal Induced Phase Transformations in Duplex Stainless Steel, MATER SCI FORUM **729**: 109-113 (2013)
- [S5] G Vértesy, I Mészáros, I Tomas: Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels, NDT& E INT **54**: 107-114 (2013)
- [S6] I Calliari, M Breda, E Ramous, I Mészáros: Phase transformations in duplex stainless steels: Metallographic and magnetic investigation, YEJIN FENXI **33**: (7) 10-15 (2013)
- [S7] I Mészáros: A Novel VSM Magnetometer and Its Applications to Detect Induced Magnetic Anisotropy, J ELECTR ENG **63**: 35-38 (2012)
- [S8] I Mészáros, J Ginsztler: Magnetic testing of creep deterioration, PROC ENG **10**: 990-995 (2011)
- [S9] I Mészáros: Magnetic Measurement and Model Based Characterisation of Phase Transformation in Lean Duplex Stainless Steel, MATER SCI FORUM **721**: 96-101 (2012)
- [S10] I Mészáros: Magnetization curve modelling of soft magnetic alloys, J PHYS CONF SER **268**: 1-6 (2011)
- [S11] S Baldo, I Mészáros: Effect of cold rolling on microstructure and magnetic properties in a metastable lean duplex stainless steel, J MATER SCI **45**: 5339-5346 (2010)
- [S12] I Mészáros: Testing of stainless steel by double yoke DC magnetometer, J ELECTR ENG **61**: (7/s) 1-4 (2010)
- [S13] I Mészáros, G. Vertesy: Modelling of normal magnetization curves of soft magnetic alloys, MATER SCI FORUM **659**: 429-434 (2010)
- [S14] I Mészáros: Magnetic detection of creep deterioration, MATER SCI FORUM **659**: 325-330 (2010)
- [S15] Tibor Berecz, István Mészáros, Péter János Szabó: Decomposition of the Ferritic Phase in Isothermally Aged SAF 2507 Duplex Stainless Steel, MATER SCI FORUM **589**: 185-190 (2008)
- [S16] J. Takacs, I. Mészáros: Separation of magnetic phases in alloys, PHYSICA B **403**: 3137-3140 (2008)
- [S17] I Mészáros: Magnetic characterization of phase transformations in TRIP steels, J ELECTR ENG **59**: 86-89 (2008)
- [S18] I Mészáros: Hyperbolic model based data evaluation for magnetic NDE measurements, MATER SCI FORUM **589**: 251-256 (2008)

- [S19] I Mészáros: Decomposition of magnetic phases in alloys, MATER SCI FORUM **589**: 245-250 (2008)
- [S20] J. Ginsztler, I. Mészáros: Thermal shock fatigue process induced magnetic anisotropy, MATER SCI FORUM **537-538**: 419-424 (2007)
- [S21] I Mészáros: Rezgőmintás magnetométeres mérések az anyagvizsgálatban, ANYAGOK VILÁGA **VII**: (1) 1-10 (2007)
- [S22] I Mészáros, J Ginsztler: Magnetic investigation of thermal shock fatigue process, KEY ENG MATER **345-346**: 1283-1286 (2007)
- [S23] I Mészáros: Development of a novel vibrating sample magnetometer, MATER SCI FORUM **537-538**: 413-417 (2007)
- [S24] G Vértesy, I Tomás, I Mészáros: Non-destructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic adaptive testing, J MAGN MAGN MATER **310**: 76-82 (2007)
- [S25] G Vértesy, I Tomas, I Mészáros: Investigation of experimental conditions in magnetic adaptive testing, J MAGN MAGN MATER **315**: 65-70 (2007)
- [S26] I Mészáros: Magnetométeres mérések az anyagvizsgálatban, BKL KOHÁSZAT **139**: 45-48 (2006)
- [S27] I Mészáros: Magnetic characterisation of duplex stainless steel, PHYSICA B **372**: 181-184 (2006)
- [S28] G Vértesy, I Tomáš, I Mészáros: Investigation of the magnetic yoke's influence in magnetic adaptive testing, J ELECTR ENG **57**: 66-68 (2006)
- [S29] Mészáros I, Szabó P J: Complex magnetic and microstructural investigation of duplex stainless steel, NDT& E INT **38**: (7) 517-521 (2005)
- [S30] I Mészáros, J Prohászka: Magnetic investigation of the effect of alpha- martensite on the properties of austenitic stainless steel, J MATER PROCESS TECH **161**: 162-168 (2005)
- [S31] G Vértesy, I Tomáš, I Mészáros: Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement, J MAGN MAGN MATER **285**: (3) 335-342 (2005)
- [S32] I Mészáros: Possibility of indirect hardness testing of duplex stainless steel, ANYAGOK VILÁGA **5**: (1) 6 (2004)
- [S33] D O Sullivan, M Cotterell, I Mészáros: The characterization of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques, NONDESTRUCT TEST EVA **37**: 265-269 (2004)
- [S34] N Babcsán, I Mészáros, N Hegman: Thermal and electrical conductivity measurements on metal foams, MATERIALWISS WERKST **34**: 391-394 (2003)
- [S35] I Mészáros: Micromagnetic Measurements and Their Applications, MATER SCI FORUM **414-415**: 275-280 (2003)
- [S36] I Mészáros, J Ginsztler: Magnetic Investigation of Creep and Thermal Shock Fatigue Processes In: Baldev Raj, B K Choudhary, Anish Kumar (szerk.) Pressure Vessels and Piping: Inspection and Life Management. New Delhi: Narosa Publishing House, 2009. pp. 159-164. (Pressure Vessels and Piping; Vol. IV.) Inspection and Life Management (ISBN:978-81-8487-003-9)
- [S37] I Mészáros: Novel data evaluation technique for magnetic NDT measurements, In: M Bieth, J Whittle (szerk.) JRC Scientific and Technical Reports: NDE in

Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. Luxembourg: European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy, 2008. pp. 390-396

- [S38] I Mészáros, J Dobránszky, Gy Nagy: Investigation of the Fatigue Processes of Superduplex and Austenitic Stainless Steels, In: Pávó József, Vértesy Gábor, Takagi Toshiyuki, Udpa Satish S (szerk.) Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V). (21) Amsterdam: IOS Press, 2001. pp. 267-274. (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics; 21.) (ISBN:1586031554)
- [S39] I Mészáros: Micromagnetic Testing of Cold Work Induced Martensite in Austenitic Stainless Steel: Proceedings Vol.3. In: Stainless Steel '99 Science and Market Conference 1999. pp. 339-344
- [S40] M Breda, I Mészáros: Characterization of a cold rolled 2101 Lean DSS, In: 10th EMAS Regional Workshop: Electron probe microanalysis of materials today 2012. pp. 1-4
- [S41] I Mészáros: Magnetic Testing of Lean Duplex Stainless Steel, In: Gépészet 2012 - Eighth International Conference on Mechanical Engineering, Budapest: BME GMK, 2012. pp. 1-6, (ISBN:978-963-313-055-1)
- [S42] I Calliari, A Miranda Perez, G Tortoreto, I Mészáros: Magnetic and metallographic investigation of phase transformations in duplex stainless steels, In: 8th International workshop on Progress in Analytical Chemistry & Materials Characterisation in the Steel and Metals Industries, Luxemburg: 2011. pp. 347-352
- [S43] S Baldo, M Zanelatto, I Mészáros: Phase transformation in 2101 DSS after cold rolling, In: DUPLEX Stainless Steels 2010: DUPLEX 2010 AIME, 2010. p. 10
- [S44] S Baldo, G Fassina, I Calliary, E Ramous, I Mészáros: Caratterizzazione magnetica e microstrutturale dell'acciaio duplex 2101 dopo deformazione a freddo, In: AIM 33° National Conference AIM (Associazione Italiana di Metallurgia), 2010. pp. 1-10
- [S45] 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, 2010. p. 006. (ISBN:978-963-313-007-0)
- [S46] Mészáros I, T. Majoros: Stablein-Steinitz measurement set up modernization, In: Stépán G, T. Szalay, Á. Antal, I. Gyurika (szerk.) Gépészet 2010: Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering. Budapest, 2010. (ISBN:978-963-313-007-0)
- [S47] I Mészáros: Hyperbolic model based data evaluation technique for magnetic measurements, In: Váradi K, Vörös G (szerk.) 6. Országos Gépészeti Konferencia - Gépészet 2008: Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering Budapest, 2008. pp. 4-8 (ISBN:978-963-420-947-8)
- [S48] Tibor Berecz, Péter J. Szabó, István E. Sajó, István Mészáros: Measuring of the amount of σ -phase in isothermally aged duplex stainless steel, In: Proceedings of the Fifth Conference on Mechanical Engineering, GÉPÉSZET 2006. Budapest: BME OMIKK, 2006. pp. 1-6. (ISBN:963 593 465 3)
- [S49] I Mészáros: Magnetométeres mérések műszaki alkalmazásai, In: XXII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Konferencia 2006. pp. 103-107
- [S50] I Mészáros: Development of vibrating sample magnetometer for material testing, In: Penninger A, Kullmann L (szerk.) Proceedings of the Fifth Conference on

Mechanical Engineering, GÉPÉSZET 2006 Budapest: BME OMIKK, 2006. (ISBN:963 593 465 3)

- [S51] G Vértesy, I Tomáš, I Mészáros: Optimization of Material Characterization by Adaptive Testing, In: ICSC 2006 (Fourth International Conference on Soft Computing Applied in Computer and Economic Environments) 2006. pp. 57-63
- [S52] T Bíró, I Mészáros, J Ginsztler: Magnetic investigation of the microstructural effects of creep and fatigue processes, In: Penninger A, Kullmann L, Vörös G(szerk.) GÉPÉSZET 2004: Proceedings of the Fourth Conference on Mechanical Engineering Budapest, 2004. pp. 23-27 (ISBN:963 214 7480)
- [S53] I Mészáros: Complex magnetic investigation of duplex stainless steel, In: Penninger A, Kullmann L, Vörös G (szerk.) GÉPÉSZET 2004: Proceedings of the Fourth Conference on Mechanical Engineering Budapest, 2004. pp. 131-135 (ISBN:963 214 7480)
- [S54] N Babcsán, I Mészáros: Thermal and electrical conductivity measurements on aluminium foams, In: 2nd Int. Meeting on Space and Aerospace Materials Technology: ARCH Seibersdorf Research GmbH 2002. pp. 90-93
- [S55] E Xolin, J Dobránszky, I Mészáros: Effect of cold working temperature on the martensite formation in AISI 304 stainless steel, In: Gépészet 2002: Proceedings of the Third Conference on Mechanical Engineering, Budapest, 2002. pp. 311-315-2 (ISBN:963 699 1650)
- [S56] J Dobránszky, I Mészáros, D H Kwak, B Hidasi: Isothermal microstructural changes in superduplex stainless steel, In: Gépészet 2000: Proceedings of Second Conference on Mechanical Engineering (1) Budapest: Springer Orvosi Kiadó Kft., 2000. pp. 794-798-2. (ISBN:963-699-117-0)
- [S57] I Mészáros, J Dobránszky, D H Kwak: The Influence of Microstructural Changes of Superduplex Stainless Steel on the Magnetic Barkhausen Noise, In: Steels and Materials for Power Plants, Series: Euromat 99. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. pp. 176-181
- [S58] I Mészáros: Micromagnetic Investigation of the Fatigue Process of 18/10 Stainless Steel, In: Steels and Materials for Power Plants, Series: Euromat 99. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. pp. 129-133
- [S59] I Mészáros, J Ginsztler, D H Kwak, J Lovas: Micromagnetic investigation of the fatigue process induced structural changes of austenitic stainless steel, In: Gépészet 2000: Proceedings of Second Conference on Mechanical Engineering Budapest, 2000. pp. 262-266-2 (ISBN:963-699-117-0)
- [S60] I Mészáros: Novel magnetic NDT measurement for remnant life estimation of power plant steels 3rd International Conference on Engineering Failure Analysis 2008. (ICEFA-III), July 13-16 2008. Sitges, Spain (2008)
- [S61] M Breda, L Pezzato, M Pizzo, I Mészáros, I Calliari: Effects of Cold Deformation in Duplex Stainless Steels, In: EUROMAT 2013
- [S62] J Ginsztler, P J Szabó, J Dobránszky, I Mészáros: EDS Analysis of Intermetallic Precipitations and Magnetic Barkhausen-noise Measurements in Thermally aged SAF 2507 Type Superduplex Stainless Steel, In: 7th European Workshop on Modern Development and Applications in Microbeam Analysis (EMAS 2001) 2001. p. 332