

## MÁGNESES MÉRÉSEK A RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATBAN

Dr. Mészáros István

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Anyagtudomány és Technológia Tanszék,  
1111. Budapest, Bertalan Lajos u. 7. (MT épület, 109.)  
meszaros@eik.bme.hu

[http://www.att.bme.hu/munkatarsak/mesaros\\_istvan](http://www.att.bme.hu/munkatarsak/mesaros_istvan)

*Nagy örömmel fogadtam el Dr. Tóth László professzor Úr, az **Anyagvizsgálók Lapja** című folyóirat főszerkesztője felkérését, hogy írjak egy összefoglaló cikket a Lap számára a mágneses anyagvizsgálat alapjairól és az e területen végzett munkámról. Remélem, hogy a **Tisztelt Olvasók** hasznosnak és informatívnak fogják találni a leírtakat.*

*A cikkben bemutatott eredmények és az elméleti háttér részletesebb ismertetése, bővebb hivatkozásjegyzékkel megtalálható egy korábbi dolgozatomban [1].*

## 1. Bevezetés

Az ötvözetek szövet-, illetve diszlokációs szerkezete, feszültségi állapota és mágnes tulajdonságai közötti számos esetben összefüggéseket ismerhetünk fel, ami a szerkezeti acélok esetén gyakran lehetőséget ad mechanikai tulajdonságaik indirekt vizsgálatára, illetve a szerkezetükben bekövetkező változások gyors és roncsolásmentes kimutatására.

E cikkben –a teljesség igénye nélkül– igyekszem röviden bemutatni az anyagvizsgálatban alkalmazható mágneses mérések, azaz a mágneses anyagvizsgálati eljárások fizikai, illetve fémtani alapjait. Bemutatom azokat a mágneses mérési összeállításokat, amelyeket felépítettem a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszékén az anyagvizsgálati, valamint kutatási feladatok végzéséhez. A mágneses mérések anyagvizsgálatban való alkalmazásának példjaként ismertetem a lean-duplex korrózióálló acélban képlékeny hidegalakítás hatására történő martenzites fázisátalakulásnak a mágneses tulajdonságokra gyakorolt hatását, továbbá az ehhez kapcsolódó egyes vizsgálatokat és ezek értelmezését.

Munkáim során elsősorban 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 követésével foglalkoztam. Célom 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. E mágneses vizsgálati eljárások segítségünkre lehetnek egyes fémtani folyamatok jobb megértésében, továbbá a melegszilárd acélok élettartamának pontosabb becslésében és így hozzásegíthetnek ezek további biztonságos üzemeltetéséhez.

## 2. Néhány gondolat a roncsolásmentes anyagvizsgálatokról

Energia közlés hatására az anyagok szerkezetében változások következhetnek be. A kívánt tulajdonságú anyagok létrehozására alkalmazott technológiai eljárások esetén az anyag szerkezetét szándékosan, előre megtervezett módon változtatjuk meg. Az anyagok használata, üzemeltetése során azonban nem kívánt változások jöhetnek létre azok szerkezetében, amiket leromlási-, vagy degradációs folyamatoknak hívunk, az ezeket létrehozó energiaközléssel járó külső hatásokat pedig igénybevételnek nevezzük.

Az igénybevétel tehát minden esetben felfogható úgy, mint az anyaggal -valamilyen módon- történő energiaközlés. Így az anyagokban létrejövő nem-kívánatos szerkezeti átalakulások, azaz leromlási folyamatok mindig energia közlés hatására keletkeznek és annak eredményeként értelmezhetők.

A létrehozott hatás szempontjából meghatározó az energia közlés módja, továbbá a közölt energia mennyisége és teljesítménysűrűsége. Az igénybevételeket az energia közlés módjai szerint csoportosíthatjuk. Az alábbiakban összefoglaltam a műszaki gyakorlatban leggyakrabban előforduló igénybevételeket, illusztrációként felsorolva néhány jellemző példát:

- \* *Mechanikai hatások*, a mechanikai igénybevételek lehetnek statikusak, dinamikusak, ezen belül impulzusszerűek, illetve periodikusan ismétlődőek, eredményezhetnek képlékeny alakváltozást, kopást, fáradást, törést stb.
- \* *Termikus hatások*, ezek számos az anyag-tudományban ismert termikusan aktivált folyamat kiváltását okozhatják. Ilyenek egyebek mellett a diffúziós folyamatok, az újrakristályosodás, fázisátalakulások és a kémiai folyamatok, továbbá a hőmérséklet változása által okozott folyamatok, mint például a hősokk hatására kialakuló repedéskeletkezés. Utóbbi közvetlen okaként térfogatrészek egyenlőtlen hőtágulása által keltett mechanikai feszültség jelölhető meg.
- \* *Kémiai hatások*, mint például a korróziós folyamatok, vagy az acélok hidrogén hatására történő ridegedése.
- \* *Részecske sugárzás hatása*, ami egyebek mellett a szerkezeti acélok ridegedését okozza.
- \* *Elektromos hatások*, mint az elektromos átütés, illetve kisülések, az elektromigráció folyamata.
- \* *Biológiai hatások*, mint a mikrobiológiai korrózió, az élő szervezetekben bekövetkező bioaktív korróziós folyamatok.
- \* *Kombinált hatások*, mint az agresszív kémiai környezet és a mechanikai feszültség együttes hatására bekövetkező feszültségkorróziós folyamat, az emelt hőmérséklet és statikus mechanikai terhelés egyidejű hatására végbemenő kúszási folyamat, a ciklikus hőmérsékletváltozás és mechanikai feszültség hatására történő hófáradási folyamat.

Az igénybevételek által létrehozott szerkezeti változások, azaz a leromlási folyamatok sokrétűek

lehetnek azonban három fő csoportba foglalhatók. Beszélhetünk szövetszerkezeti változásokról, azaz az anyag metallográfiai szemcseszerkezetében bekövetkező átalakulásokról. Az anyag hibaszerkezetében bekövetkező változásokról, ami a ponthibák, diszlokációk és felületszerű hibák számában és struktúrájában bekövetkező változásokat jelenti. Továbbá makroszkopikus, háromdimenziós hibák létrejöttéről, ahová az üregek, üregsorok, illetve repedések kialakulása tartozik.

Az anyagvizsgálati eljárások során az anyaggal előre megtervezett módon energiát közlünk és annak a külső gerjesztésre adott válaszát vizsgáljuk. A lehetséges gerjesztési módok száma és változatossága óriási. A műszaki gyakorlatban alkalmazott gerjesztési módok – a teljesség igénye nélkül – a következők lehetnek;

- \* mechanikai (szakítóvizsgálat, keménységmérés, fárasztó vizsgálat, ultrahangos vizsgálat, akusztikus emisszió vizsgálat, ...),
- \* elektromos (örvényáramú vizsgálat, vezetőképesség mérés ...),
- \* mágneses (mágneses repedésvizsgálat, mágneses tulajdonságok mérése, Barkhausen-zaj mérése, ...),
- \* optikai (vizuális vizsgálat, optikai mikroszkópos vizsgálat),
- \* besugárzás (radiográfiai vizsgálatok, röntgen diffrakció, elektron mikroszkópia, EDS, EBSD, Auger-spektroszkópia, ...),
- \* termikus (termofeszültség mérése, hófárasztó vizsgálat, ...),
- \* kombinált hatások (kúszás vizsgálat, feszültség korróziós vizsgálat, ...).

A roncsolásmentes anyagvizsgálatok egy része – a hagyományos vizsgálati eljárások – az anyagban lévő, illetve ott kialakult folytonossági hiányok, azaz anyaghibák felderítésére szolgálnak. Ezeket a nemzetközileg elfogadott NDT (Nondestructive Testing), illetve NDE (Nondestructive Evaluation) betűszavakkal rövidítjük. Megjegyzem, hogy az NDT eljárások csoportjába elsősorban egyszerűbb minőségellenőrzési célokra használatos (Quality Control NDT, QC-NDT), amíg az NDE módszerek közé főként a kvantitatív eredményeket is adó (Quantitative NDE, QNDE),

eljárások tartoznak.

A napjainkban fejlesztett, korszerű roncsolásmentes vizsgálati eljárások között már számos olyan vizsgálati módszer is található, amelyek az anyag szerkezetének, illetve az abban bekövetkezett változásoknak a kimutatását is lehetővé teszik. Ezeket gyakran Nondestructive Materials Characterization (NMC) módszerekként említjük. E terminológia szerint tehát az NDT és NDE módszerek jellemzően az anyagban lévő folytonossági hiányok (repedések, üregek) felderítésére és egyes esetekben ezek méretének és elhelyezkedésének meghatározására szolgálnak. Az NMC eljárások pedig az anyag szövet-, illetve hibaszerkezetéről is szolgálnak információval. E módszerek alkalmazása esetén gyakran nemcsak az anyagnak a gerjesztésre adott válaszát, hanem a gerjesztés és a válasz kapcsolatát mérjük és értékeljük.

Az NDT/NDE eljárásokat szokás hibakereső vizsgálatoknak is nevezni, hiszen a különböző fizikai elveken alapuló módszerek célja, a vizsgált szerkezetben lévő belső- vagy felületi folytonossági hibák detektálása [2]. A hiba méretének és elhelyezkedésének meghatározását követően az üzemeltetési paraméterek ismeretében lehet dönteni a hibával való további üzemeltetésről vagy a szerkezet javításáról. A gyártásellenőrzési módszerek a megfelelő, illetve hibás darabok szétválogatására szolgáló, ún. leválogató NDT eljárások. Az ipari gyakorlatban számos NDT eljárást alkalmaznak, amelyek közül a legelterjedtebbek a következők:

- \* vizuális vizsgálat (VT),
- \* folyadék behatolásos vizsgálat (PT),
- \* mágnesezhető poros vizsgálat (MT),
- \* ultrahangos anyagvizsgálat (UH),
- \* örvényáramú vizsgálat (ET),
- \* radiográfiai anyagvizsgálatok (Röntgen, illetve izotópos vizsgálat) (RT),
- \* akusztikus emissziós vizsgálat (AE),
- \* tömörségi vizsgálat.

A klasszikus roncsolásmentes vizsgálatok részleteire nem térünk ki, ezeket számos alapvető munkában megtaláljuk [5], [6], illetve összefoglaltam korábban egy az anyagtudomány témában íródott egyetemi tananyag az „Az anyagvizsgálat alapjai” című fejezetében [7].

Az előbbieken részletezett, tágabb értelmezés szerinti NMC eljárások például az alábbiak:

- \* képkalkotó vizsgálatok (SEM, TEM, STM, AFM, MFM ...),
- \* diffrakciós vizsgálatok (Röntgen, elektron, neutron ...),
- \* kémiai összetétel vizsgálatok (EDS, XPS, spektroszkópia),
- \* mágneses tulajdonságok, mágnesezési görbék mérése,
- \* permeabilitás mérésre visszavezetett mérések,
- \* egyes örvényáramú mérések,
- \* nem-lineáris felharmonikusok vizsgálata,
- \* mágneses Barkhausen-zajmérés,
- \* magnetoelasztikus-zajmérés,
- \* maradó mágnesezettséget, ill. ennek eloszlását vizsgáló eljárások,
- \* ...

Napjainkban a leromlási folyamatok nyomon követésében, illetve a mérnöki szerkezetek maradék élettartam becslésében egyre jelentősebb az NDT, NDE, illetve NMC vizsgálatok szerepe ezen belül is növekszik a mágneses, illetve az elektromágneses vizsgálati eljárások jelentősége [3], [4]. Jól mutatja ezt, hogy a ScienceDirect adatbázisban fellelhető, az emelt hőmérsékletnek kitett alkatrészek fáradási és kúszási folyamatainak vizsgálatával foglalkozó tudományos közlemények között hozzávetőleg az 1. táblázatban feltüntetett gyakorisággal találhatóak meg az egyes roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások [11].

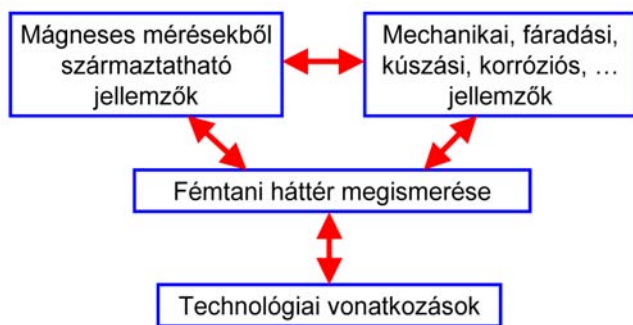
Amágnesesroncsolásmentesvizsgálatoklehetőségét az anyag mágneses és egyéb pl. mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatok teremtik meg. Számos esetben találhatunk, ugyanis összefüggést az anyagok mágneses jellemzői és egyéb például szilárdsági, fáradási, kúszási, korróziós tulajdonságai között, ami lehetővé teszi egyes anyagtulajdonságok indirekt meghatározását mágneses mérések segítségével. Vagyis a mágneses, illetve mikromágneses tulajdonságok mérése számos esetben roncsolásmentes vizsgálati eljárások kidolgozására adnak lehetőséget. Lényeges azonban, hogy csak akkor használjunk fel anyagvizsgálati célra egy makroszkópikus anyagtulajdonság és valamely mágneses jellemzők között felismert összefüggést, ha megértjük ezek közös

Vizsgálati eljárás	Gyakoriság
<b>Mágneses vizsgálatok</b> <i>mágneses tér mérése, mágnezhető poros vizsgálat (magnetic flux leakage), hiszterézis jellemzők mérése, permeabilitás mérés, Barkhausen-zajmérés, magnetoelasztikus-zajmérés, nem-lineáris harmonikus mérés, Mágneses adaptív teszt, Magnetic Metal Memory vizsgálat, ...</i>	45 %
<b>Ultrahangos vizsgálat</b>	10 %
<b>Örvényáramos vizsgálatok</b>	12,5 %
<b>Egyenáramú potenciálesés vizsgálat</b>	7,5 %
<b>Egyéb vizsgálatok</b> <i>optikai- és elektronmikroszkópos vizsgálatok, keménységmérés, nyúlásmérő bélyeges mérések, replika vizsgálatok, termoelektromos-erő mérés, pozitron annihiláció, ...</i>	25 %

**1. táblázat Nagy hőmérsékleten üzemeltetett alkatrészek esetén alkalmazott vizsgálati eljárások gyakorisága.**

anyagszerkezet, illetve fémtani háttérét, lásd 1. ábra.

Ez biztosítja ugyanis, hogy a felismert összefüggés nemcsak a vizsgált esetre vonatkozóan érvényes, hanem kiterjeszhető, azaz más összetételű, illetve szerkezetű anyagokra is alkalmazható.



**1. ábra A mágneses mérések helye az anyagvizsgálatban.**

Nyilvánvaló, hogy az egyes NDE vizsgálati eljárások érzékenysége, illetve képességei különböző típusú és eltérő mértékű károsodások kimutatását teszik lehetővé.

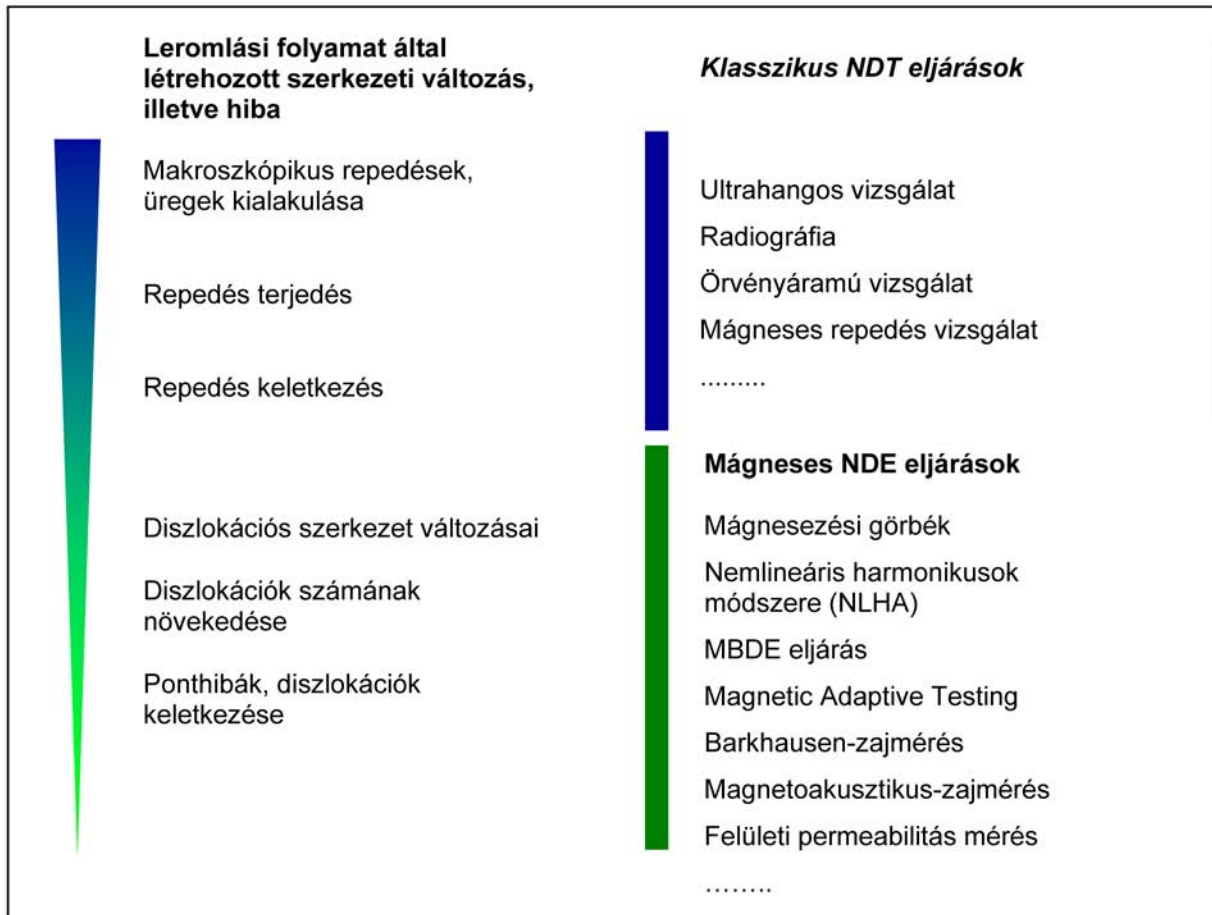
Tekintsünk például egy fáradásos tönkremeneteli folyamatot. A fárasztó igénybevétel hatására

kezdetben megváltozik az anyag diszlokációs szerkezete. A diszlokáció-sűrűség növekszik majd a diszlokációk sorokba rendeződve ún. szubszemcse határokat hoznak létre. Nagyszámú fárasztó ciklus hatására megjelennek a repedések, amelyek ebben az esetben szemcséken keresztül – transzkrisztallin módon – terjednek és makroszkopikus repedéseket létrehozva az anyag töréséhez vezethetnek.

A klasszikus NDT módszerekkel például a mágneses repedésvizsgálattal csak a felületen, illetve felszín közelében elhelyezkedő relatíve nagyméretű (>0,1 mm) repedések kimutatására van lehetőségünk. Vagyis, csak a már jelentősen előrehaladott károsodást tudjuk kimutatni. Azonban a diszlokációs szerkezet változására érzékeny mágneses NDE eljárások (pl. egyes mágnesezési görbékből származtatható jellemzők mérése [7], [9], mágneses adaptív teszt [10]) már a leromlási folyamat kezdeti szakaszán is képesek egyes szerkezeti változásokat detektálni, így a mérnöki szerkezetek maradék élettartam becslése során különösen eredményesen alkalmazhatóak.

A 2. ábra áttekintő képet ad az egyes vizsgálati technikák alkalmazhatóságáról és megmutatja a leromlás mértékének függvényében az alkalmazható vizsgálatok típusait.





**2. ábra** Az NDT/NDE vizsgálatok alkalmazhatósága a leromlás mértékének függvényében. (S. Takahashi ábrája nyomán)

### 3. Hiszterézises folyamatok, mágnesezési görbék

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 „memória-effektusa” van, vagyis a rendszer válaszjele függ annak „előéletétől”, tehát attól, hogy milyen úton jutott el a rendszer a pillanatnyi állapotába. Néhány ismert hiszterézist mutató folyamat:

- \* Ferromágneses anyagokban ébredő mágne-

ses indukció (B), illetve a mágnesezettség (M) és a külső mágneses tér (H) közötti kapcsolat.

- \* Ferroelektromos anyagokban létrejövő elektromos polarizáció (P) és a külső elektromos tér (E) kapcsolata.
- \* Egyes anyagok deformációja során a terhelő erő és az alakváltozás kapcsolata (alakemlékező ötvözetek, gumi).
- \* Kisciklusú fárasztó igénybevétel esetén a nyúlásamplitúdó ( $\sigma$ ) és az alakváltozás ( $\epsilon$ ) kapcsolata.
- \* Műszaki szabályzó rendszerek esetén az érzékelt jel és a kapcsolójel kapcsolata.
- \* Továbbá számos társadalmi, illetve gazdasági folyamat.

A fenti folyamatok mindegyike érdekes és számos hasznosítható eredménnyel kecsegtet, azonban e cikkben kizárólag az egyes ferromágneses

tulajdonságú szerkezeti acélok hiszterézises viselkedésével foglalkozom.

### 3.1 Mágneses anyagok és mágnesezési görbék típusai

E cikkben az anyagok mágneses viselkedésére és tulajdonságaira részletesen nem térek ki, az alábbiakban csak röviden, teljességre nem törekvő módon ismertetem az anyagok legfontosabb mágneses tulajdonságait és a rendezett mágneses szerkezetű anyagok legfontosabb mágnesezési görbéit.

Külső mágneses tér hatására az anyagokban mágneses polarizáció lép fel, aminek hatására azok mágneses dipólussá válnak. Ez egyrészt a mintában mágneses momentumok indukálódásával, másrészt, ha a minta eleve tartalmaz (spontán) mágneses momentumokat, ezeknek a külső tér hatására történő rendeződésével történik. A minta makroszkópos mágneses momentuma a térfogatban lévő elemi mágneses momentumok ( $p_m$ ) eredője. Ennek térfogategységre vonatkoztatott értékét hívjuk a minta mágnesezettségének ( $M$ ).

Az alapvető mágneses jellemzők közötti kapcsolatok:

A mágneses szuszceptibilitás ( $\kappa$ ), illetve a relatív per-

$$M = \frac{1}{V} \sum_i p_m$$
$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (H + M)$$
$$M = \kappa H$$

meabilitás ( $\mu_r$ ) nevű mennyiségeket az anyagok mágneses tulajdonságainak jellemzésére használjuk.

Az anyagokat mágneses tulajdonságaik szerint gyengén mágneses, illetve rendezett mágneses szerkezetű csoportokba oszthatjuk. Az első csoportba a dia- és paramágneses anyagok tartoznak, a másodikba pedig a ferro-, antiferro- és ferrimágneses viselkedésűek.

Zérus külső mágneses térben a diamágneses anyagoknak elemi mágneses momentumuk nincs, mivel az elektronok mágneses momentumai teljes mértékben kompenzálják egymást. Külső mágneses

tér hatására, bennük az elektronpályák deformációja révén mágneses momentum indukálódik. Az indukció-törvény szerint az indukált momentum a külső térrel ellentétes irányú, s nagysága lineáris függvénye a térnek. A diamágneses anyagok szuszceptibilitása tehát negatív, mágneses tér- és hőmérséklet-független. E polarizációs mechanizmus minden anyagban létrejön, de csak akkor észlelhető, ha más erősebb mágneses hatás el nem nyomja.

A paramágneses anyagok rendelkeznek elemi mágneses momentumokkal, de ezek a termikus mozgások miatt statisztikusan rendezetlen irányeloszlást mutatnak, ezért makroszkopikus mágnesezettségük zérus. Külső mágneses tér hatására a momentumok, a termikus mozgás ellenében, igyekeznek beállni a térirányba. Tehát szuszceptibilitásuk pozitív és hőmérsékletfüggő. Tiszta paramágneses anyagok szuszceptibilitása a gyakorlatban elérhető mágneses terek esetén térfüggetlennek tekinthető, azaz mágnesezési görbéjük lineáris. Mágneses telítésük, azaz annak az állapotnak az elérése, amikor a mintában lévő összes mágneses momentum a külső tér irányába fordul, szobahőmérsékleten extrém nagy, a gyakorlatban már nem elérhető nagyságú teret igényel. A mágnesesen rendezett szerkezetű anyagok között fémeket, ötvözeteket és kerámiákat is találunk. Ezek spontán mágneses momentummal rendelkeznek, s egy kritikus ún. Curie-hőmérséklet alatt a kicserélődési kölcsönhatás momentumaikat egy-egy adott tartományon belül a kristály tengelyeihez képest valamilyen rendbe sorakozatja, tehát létrejön a mágneses doménszerkezet.

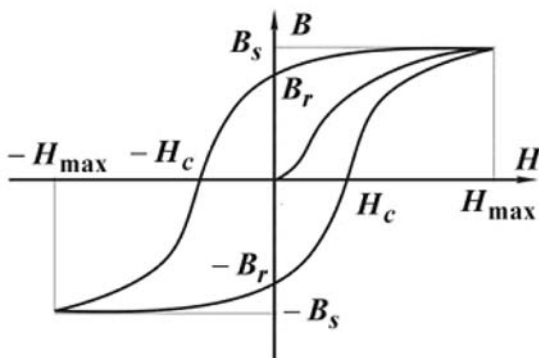
A doméneken belül az atomi mágneses momentumok parallel beállása esetén ferromágneses, a szomszédos momentumok anti-parallel beállása esetén antiferromágneses anyagokról beszélünk. Az antiferromágneses rend speciális megvalósulási formája az ún. ferrimágneses elrendeződés, itt az elemi momentumok ellentett beállításúak ugyan, de abszolút értékben különböznek.

A rendezett mágneses szerkezetű anyagok eredő mágneses momentuma és így mágnesezettsége jelentősen növekszik a külső mágnesező tér hatására, azaz az anyag felmágneseződik. A felmágneseződési folyamat két részfolyamatra bontható: kis tér tartományban, hozzávetőlegesen a mágnesezési görbe inflexiós pontjáig a külső tér irányába orientált

domének térfogatának növekedése a kedvezőtlen irányúak rovására, majd a nagyobb külső terek esetén a mágnesezettség irányának fokozatos befordulása a mágnesező tér irányába. Az előbbi folyamatot doménfal mozgási, az utóbbit momentumforgási tartománynak hívjuk.

A ferro- és ferrimágneses anyagok legfontosabb, klasszikus jellemzője a mágneses hiszterézisgörbe (3. ábra), illetve a belőle származtató mennyiségek. A hiszterézis viselkedést – a Curie-hőmérsékletük alatt – minden ferro- és ferrimágneses anyag esetén tapasztalunk eltekintve azok szuper-paramágneses állapotától.

Ha egy lemágnesezett állapotú ferro- vagy ferrimág-



**3. ábra Ferromágneses anyag normál mágnesezési görbéje, valamint a hiszterézis görbéje a telítési- ( $B_s$ ) és a remanens ( $B_r$ ) indukció, a koercitív térerő ( $H_c$ ) továbbá a maximális gerjesztő tér ( $H_{max}$ ) pontjaival.**

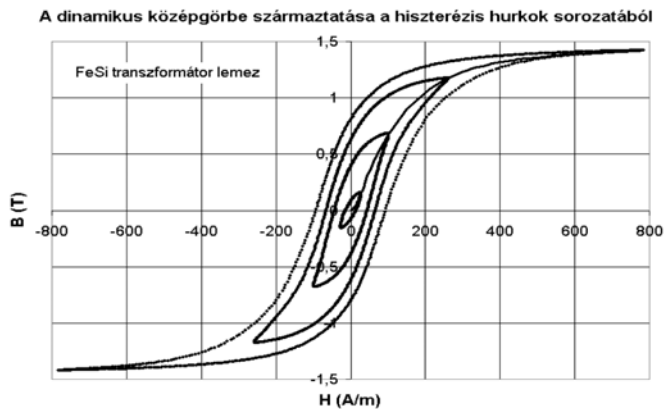
neses mintát külső mágneses térbe helyezünk, akkor a tér növelésével az indukció értéke kezdetben lassan nő, majd hirtelen emelkedni kezd. A görbe végül ismét ellaposodik, és fokozatosan éri el a  $B_s$  telítési értéket. A mágnesező tér ( $H$ ) további növekedésével az indukció csak nagyon kismértékű növekedést mutat. A mágneses tér csökkenésével – szemben a dia- és paramágnesekkel – a mágnesezési görbe nem követi az eredeti vonalát. Zérus lemágnesezési tényezőjű minta esetén, amikor a mágnesező tér nullára csökken, az indukció értéke a  $B_r$  ún. remanens indukciót éri el. A külső tér irányát ellenkező értelműre kell változtatni, és  $H_c$ -ig, a koercitív térnek nevezett értékig kell növelni ahhoz, hogy a maradó indukciót zérusra kompenzáljuk. Ha ebben az irányban tovább növeljük a térerősséget, újra elérhető a telítés. A

térerősség (abszolút értékének) újbóli csökkenésével egy, az előbbihez hasonló görbe adódik. A telítés, a remanencia és a koercitív tér értéke ugyanaz, mint az előző esetben volt, feltéve, hogy a telítettséig mágneseztük az anyagot. A belső kisebb hurkok (4. ábra), olyan mágnesezési ciklusra jellemzőek, aminek az anyagot nem mágneseztük telítésig. Azt a jelenséget, hogy a mágnesezési görbe nem veszi fel ugyanazokat az értékeket a fel- és lemágnesezésnél, hiszterézisnek nevezzük. Egy teljes ciklushoz tartozó hiszterézishurok azzal az energiamennyiséggel arányos területet zár közre, ami egységnyi térfogatú anyagnak a hiszterézis hurok egy körbejárásával történő mágnesezéséhez szükséges. A mágnesezési folyamat során ez az energia hővé alakul.

A ferro- és ferrimágneses anyagok makroszkopikus mágneses jellemzőinek mindegyike erős hőmérsékletfüggést mutat. Általános törvényszerűség fémes mágneseznél, hogy a telítési indukció ( $B_s$ ), a hőmérséklettel monoton és annál erősebben csökken, minél jobban megközelítjük a Curie-hőmérsékletet. A koercitív tér változása szintén monoton csökkenő és arányosnak tekinthető az anizotrópia változásával.

A mágneses jellemzők – más anyagtulajdonságokhoz hasonlóan – szerkezet érzéketlen (intrinsic) és szerkezetérzékeny (extrinsic) csoportokba sorolhatók. Az extrinsic jellemzők függenek az anyag szövet és hibaszerkezetétől ellentétben az intrinsic jellemzőkkel, amelyek ezektől függetlenek. Intrinsic jellemzőnek tekinthető a Curie-hőmérséklet és a telítési indukció, illetve telítési mágnesezettség, aminek értéke – állandó hőmérsékleten – a térfogat-egységenkénti Bohr-magnetonok számától, azaz a kémiai összetételtől függ. Minden további mágneses jellemző, azaz a remanens indukció, a koercitív tér, a permeabilitás értékek, illetve a mágnesezési görbék alakja extrinsic jellemző. A mágneses roncsolásmentes vizsgálatok szempontjából, ahol a szövet, illetve diszlokációs szerkezetben bekövetkező változásokat kívánjuk detektálni mágneses jellemzők mérésével elsősorban, az extrinsic jellemzőknek van jelentőségük.

Mágnesezési görbék alatt értjük a mintában ébredő mágneses indukció, illetve mágnesezettség alakulását a külső, mágnesező tér függvényében, azaz a  $B(H)$ , illetve  $M(H)$  görbékét. A hiszterézis görbék



**4. ábra** A szimmetrikus belső hiszterézis görbék csúcspontjainak mértani helyeként adódó ún. normál mágnesezési görbe (saját mérés FeSi transzformátor lemezen).

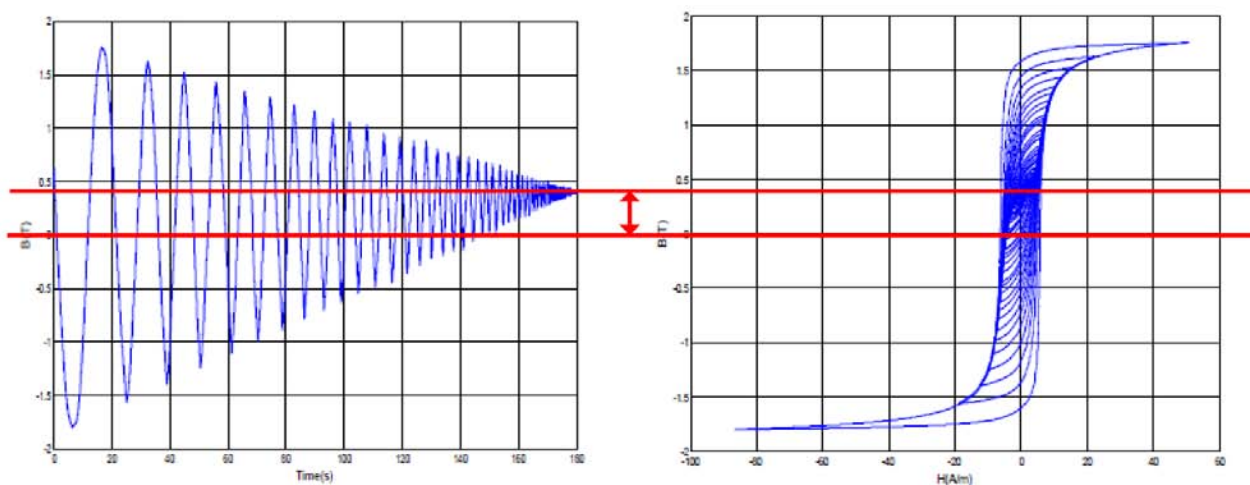
lehetnek az origóra szimmetrikusak (central), illetve aszimmetrikusak a minta kezdeti mágnesezettségétől függően. A szimmetrikus hiszterézis görbék felvétele a minta lemágnesezését követően történhet. A hurkok lehetnek ún. belső, illetve telítési hiszterézis görbék attól függően, hogy a minta maximális mágnesezettsége eléri-e a mágneses telítés állapotát, azaz azt az állapotot, amikor a minta összes mágneses momentuma a külső, mágnesező tér irányába áll.

A minta ciklikus lemágnesezését követően váltóáramú (AC) méréssel felvett szimmetrikus belső (central minor) hiszterézis hurkok csúcspontjai az ún. normál mágnesezési görbét írják le [24]. Azaz, a normál mágnesezési görbe, amit dinamikus középmágnesezési görbe néven is ismerünk, a central minor hurkok

csúcspontjainak mértani helye (4. ábra) [19], [24]. Szükséges megemlíteni, hogy több a normál görbéhez hasonló alakú, de attól kismértékben eltérő lefutású mágnesezési görbét ismerünk. Egyenáramú méréssel, változtatott polaritással vehető fel az ún. kommutációs görbe. A minta ciklikus lemágnesezését követő zérustól lassan növelt DC gerjesztéssel jutunk az első (initial) mágnesezési görbéhez. Ismert még az ún. szűzgörbe, amit az első mágnesezési görbéhez hasonló módon vesszük fel, a mintát azonban a mérést megelőzően termikusan, a Curie-hőmérséklet fölé való melegítéssel mágnesezzük le [24].

A hiszterézismentes (anhysteretic) vagy ideális mágnesezési görbe definícióját és egyben mérési utasítását Bozorth adta meg [20]. Ennek megfelelően a hiszterézismentes görbe egy pontjának felvételéhez állandó (DC) mágneses térre szuperponált váltakozó (AC) mágneses tér szükséges, ami a kezdeti ciklusban telítésig mágnesezi a mintát majd a nagyszámú további ciklus során amplitúdója monoton csökken a zérusig. A mérési folyamat során a metastabil egyensúlyi állapotban „elakadt” doménfalak leválnak az akadályokról és a külső DC térnek megfelelő egyensúlyi helyzetükbe mozdulnak el, azaz az aszimmetrikus belső hurkok sorozata a hiszterézismentes görbe egy a külső DC térnek megfelelő pontjához konvergál (5. ábra).

A mágnesezettség egyensúlyi állapotait tehát a hiszterézismentes vagy ideális mágnesezési görbe adja meg. A normál mágnesezési görbe pontjai ezzel



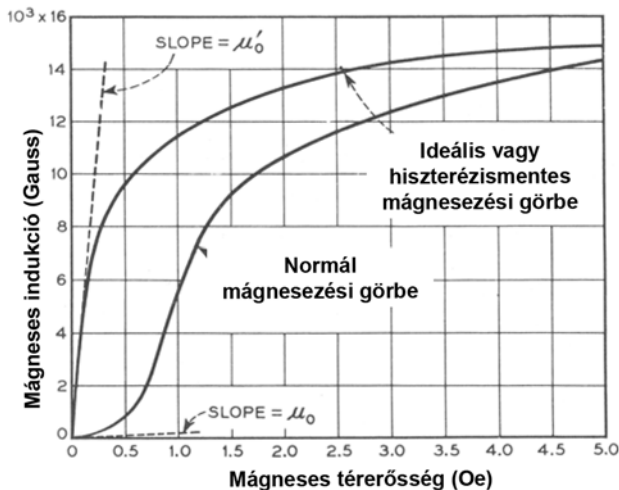
**5. ábra** Eljárás a hiszterézismentes mágnesezési görbe egy pontjának felvételéhez [20].



szemben – a doménfalak akadályozott mozgásának következtében – nem egyensúlyi (azaz metastabilis) állapotokhoz tartoznak.

A hiszterézismentes görbe meredeksége monoton csökken, a normál mágnesezési görbe meredeksége kezdetben növekszik majd egy maximum elérését követően a telítési állapotig csökken, azaz a normál görbének mindig van inflexiós pontja (6. ábra).

Fogalmazhatunk úgy is, hogy a hiszterézismentes



**6. ábra A normál- és a Bozorth-féle hiszterézismentes mágnesezési görbe [20].**

mágnesezési görbét a mágneses anizotrópia, amíg a normál mágnesezési görbe alakját az anizotrópia és a doménfalak mozgékonyága egyaránt befolyásolja. Vagyis, az azonos kémiai összetételű és anizotrópiájú (külső- és belső) de eltérő koercitív terű minták hiszterézismentes görbéje azonos, azonban normál mágnesezési görbéjük eltérő. A normál mágnesezési görbe alakja ún. extrinsic anyagtulajdonságnak tekinthető, azaz függ az anyag szövet- és a kristályhiba szerkezetétől. Ennek megfelelően a könnyen és gyorsan mérhető normál mágnesezési görbe különösen alkalmas a ferro- és ferrimágneses anyagok szerkezeti tulajdonságainak indirekt jellemzésére.

A rendezett szerkezetű mágneses anyagok (ferro-, illetve ferrimágneses) B-H, illetve M-H görbéjének hiszterézise számos fizikai jelenség együttes megnyilvánulása. A főként a párosítatlan elektronok spinmomentumaiból származó, atomi mágnes momentumok rendeződésében és így a mágneses doménszerkezet kialakulásában döntő szerepet játszik a kvantummechanikai kicserélődési kölcsönhatás. Az

átmágneseződési folyamat során a doménszerkezet átrendeződik, a doménfalak elmozdulnak, illetve a mágneses momentumok a termikus gerjesztésből származó hatást legyőzve igyekeznek befordulni a külső tér irányába. A hiszterézis kialakulásában szerepe van a mágneses momentumok kölcsönhatásának, a mágneses anizotrópia jelenségének, a doménfalak – főként kristályhibák, illetve más fémtani fázisok általi – akadályozott mozgásának. A kristályhibáknak a doménfalakra és a mágneses tulajdonságokra gyakorolt hatását a következő (3.2) fejezetben tárgyalom részletesebben.

Az átmágneseződési folyamat és a mágnesezési görbék modellezésére számos lehetőség nyílik. E munka nem vállalkozik a hiszterézis modellek teljes körű tárgyalására csak a műszaki szempontból legfontosabbnak ítélték említésére. A mágneses hiszterézis leírására született modelleket jellegük szerint három fő csoportba sorolhatjuk. Beszélhetünk ún. mikrofizikai, energetikai és makroszkopikus modellekről.

A mikrofizikai modellek kísérletet tesznek a rendkívül nagyszámú (köbcentiméterenként néhány-szor  $10^{22}$  darab) elemi mágnes momentum kollektív mozgásának leírására.

Az úgynevezett energetikai modellek esetén figyelembe vesszük a termodinamikai rendszer belső energiájának (U) lényeges tagjait és a konfigurációs entrópiát (S). Ismert, hogy egy termodinamikai rendszer egyensúlyi állapota a Helmholtz-féle szabadenergia ( $F=U-TS$ ) minimumához tartozóan határozható meg. A legismertebb az ún. Stoner-Wohlfarth modell [15], [14], aminek alapgondolatára számos további energetikai modell is épül. Ezekben általában egydomen méretű, egymással kölcsönhatásban nem álló mágneses részecskéket tételezünk fel s a hiszterézis kialakulásának fő oka a mágneses anizotrópia. E modelleket – egyebek mellett – sikeresen alkalmazzuk a mágneses vékonyrétegek viselkedésének leírására.

A mérnöki alkalmazásokhoz legjobban a viszonylag gyorsan illeszthető makroszkopikus vagy fenomenologikus modellek felelnek meg, amelyekben kizárólag a mérhető fizikai mennyiségek között keresünk összefüggéseket.

A két legismertebb makroszkopikus modellcsalád a

Preisach és a Jiles-Atherton modell. A Preisach [17], [18], illetve az ennek alapgondolatára épülő további számos modell a ferromágneses anyagot nagyszámú, kétállapotú, azaz szögletes elemi hiszterézis operátor segítségével írja le. Ezen eltérő koercitív térrel rendelkező hiszteronok a Preisach eloszlásfüggvénynek megfelelő súllyal befolyásolják a tömbi mágneses viselkedést.

A Jiles-Atherton modell [16] alapgondolata szerint a hiszterézismentes és a normál mágnesezési görbe adott külső mágneses térhez ( $H$ ) tartozó különbsége arányos a normál mágnesezési görbe  $H$ -szerinti deriváltjával, azaz  $e$  különbség a mágnesezési folyamat hajtóerejének tekinthető.

Számos további makroszkopikus hiszterézis modellt ismerünk, mint például a rugalmasan és képlékenyen egyaránt deformálódó mechanikai és szerkezeti rendszerekre gyakran alkalmazott Bouch-Wen modell [21] vagy a neurális hálózatok felhasználásával készített modellek [22], [23].

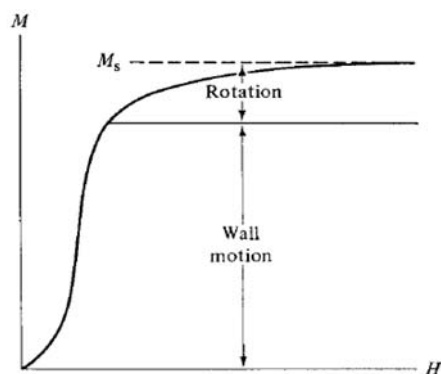
A fenomenologikus modellek közé sorolható az ún. T-modell is [25], [26], ami viszonylag egyszerű, zárt alakú matematikai összefüggésekkel írja le a mágneses hiszterézis jelenségét. A  $T(x)$  modell alapgondolata szerint bármely hiszterézis hurok előállítható a hiszterézismentes görbe egyidejű  $a_i$  vízszintes és  $\beta$  függőleges szimmetrikus eltolásával. A normál mágnesezési görbe –a definíciójának megfelelően– a szimmetrikus belső hiszterézis görbék (minor hurkok) csúcspontjainak mértani helyeként kerül kiszámításra [25].

### 3.2 A doménfalak mozgását befolyásoló szerkezeti tényezők

Az alábbiakban igyekeztem röviden összefoglalni, és értelmezni a doménfalak és a kristályhibák kölcsönhatásait.

Az átmágnesezési folyamat két alapvetően eltérő kinetikájú folyamatra bontható. A viszonylag kis külső tér tartományban az átmágneseződés a doménfalak mozgásával, amíg a telítéshez közeli, nagy tér tartományban a mágneses momentumok átfordulásával, azaz a momentumforgással valósul meg (7. ábra).

A doménfalmozgási tartományban a falak olyan módon mozdulnak el, hogy azon domének térfogata,



**7. ábra Az átmágneseződési folyamat két eltérő kinetikájú tartománya egy hipotetikus első mágnesezési görbe mentén.**

amelyeknek az orientációja megegyezik vagy közel esik a külső mágnesező tér irányához növekszik a szomszédos domének rovására. A mágneses telítés állapotában az anyagban lévő összes mágneses momentum a külső tér irányába áll be s így a teljes térfogat egy doménné válik, a doménfalak megszűnnek.

A hibamentes egykristályos anyagokban a doménfalak elmozdulása lényegében akadálymentes, mozgásuk a külső térnek folyamatos függvénye, a mágnesezési folyamat reverzibilis.

A kristályhibákat, maradó feszültségeket tartalmazó polikristályos anyagokban az elmozdulni kívánó doménfalak útjába akadályok kerülnek, amik mozgásukat nehezítik vagy lehetetlenné teszik nehezítve ezzel az átmágneseződési folyamatot. Ebben az esetben a doménfalak ugrásszerűen mozognak, az átmágneseződési folyamat veszteséges, azaz irreverzibilissé válik, ami a Barkhausen-zaj létrejöttét eredményezi.

A doménfalak mozgását „akadályok” (pinning sites) és a maradó mikrofeszültségek egyaránt akadályozzák [27]. Ahol „akadály” alatt értjük az ötvözetekben létrejövő kiválásokat például karbid, foszfid, szulfid vagy egyéb kristallitokat, az üregeket és repedéseket. Mágneses szempontból az akadályok a környező anyagtól eltérő spontán mágneszettségű térfogatrészek. Esetenként az akadályok mágneszettsége zérus, ilyenek például a folytonossági hiányok (üregek, repedések) és a nem mágneses (para-, dia- vagy antiferromágneses) szemcsék.

**Az akadályok és a doménfalak kölcsönhatása**

A doménekből álló mágnesezett térfogat egyensúlyi állapotát meghatározó két legfontosabb energetikai tag; a doménfal energia és a magnetosztatikus energia [27]. Az egyensúlyi doménméret e két tagból álló kifejezés minimalizálásával határozható meg.

$$E = E_{ms} + E_{dw}$$

Amikor az elmozduló doménfal ráfut egy akadályra, azon megakad. Ennek egyik oka a doménfal felületének és így a doménfal energiájának csökkenése (8/a. és 8/b. ábrák). Ha r sugarú gömbnek tételezzük fel az akadályt, akkor a doménfal energia csökkenése  $\pi r^2 \sigma$ , ahol  $\sigma$  az egységnyi felületű fal energiája. Néel (1944) rámutatott arra, hogy az akadályok (kiválások) felületén kialakuló mágneses póluseloszlás (ún. szabad mágneses pólusok), illetve ennek változása nagymértékben hozzájárul az akadályok falmozgást nehezítő hatásához.

A 8/c. ábra szerinti gömb alakú kiválás felületén kialakuló mágneses póluseloszlás magnetosztatikus energiája az alábbi kifejezés szerint írható fel.

$$E_{ms} = \frac{1}{2} \mu_0 N_d M_s^2 V = \frac{2}{9} \pi \mu_0 M_s^2 r^3 \left( \frac{J}{m^3} \right)$$

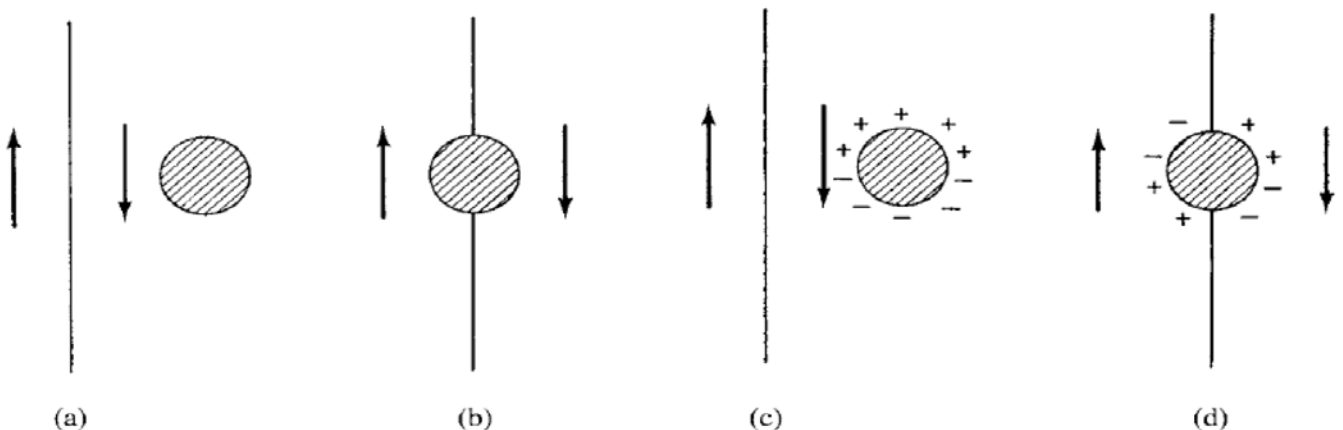
Ahol:  $N_d$  a lemágnesezési tényező,  $M_s$  a telítési mágnesezettség,  $V$  a szemcse térfogata,  $r$  a gömb sugara.

Ha a doménfal ráfut egy akadályra a póluseloszlás megváltozik (8/d. ábra), a magnetosztatikus energia közel a felére csökken, amivel a doménfal további mozgását, illetve leszakadását az akadályról nehezíti.

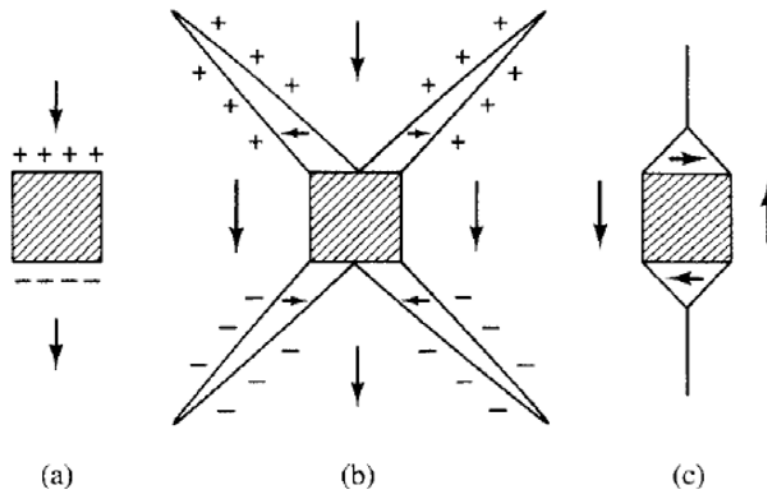
Néel elméleti megfontolások alapján javasolta a tűske (spike) és lezáró (closure) domének feltételezését is. A spike domének létezését 1947-ben Williams igazolta FeSi ötvözetben.

A teljes mértékben a domén belsejében lévő, kocka alakúnak feltételezett kiválás felületén relatíve nagy mágneses pólussűrűség alakul ki (9/a. ábra), amit a kialakuló nagy felületű tűske domének csökkentenek, illetve a lezáró domének létrejötté megszüntet. Azaz, a kiválás magnetosztatikus energiáját a tűske domének csökkentik, a lezáró domének kialakulása pedig zérusra redukálja. Tehát ha egy doménfal átmetsz egy akadályt annak magnetosztatikus energiája zérusra csökken(het) a lezáró domének létrejöttével. Ennek „ára”, hogy a teljes rendszer energiáját növeli a hozzáadódó domének doménfal energiája, ami azonban elhanyagolható a magnetosztatikus energia csökkenése mellett.

Megállapítható, hogy az akadályok körül kialakuló tűske és lezáró domének erősebb kölcsönhatást mutatnak a mozgó doménfalakkal mint az akadály maga. A doménfal akadályon való áthaladásának lépéseit szemlélteti a 10. ábra. Az elmozdulás során először a lezáró domének hosszúkás, csőszerű doménekké alakulnak, illetve új domének jönnek létre (10/b. ábra) amit a csődomének megnyúlása követ (10/c. ábra). Az átmágneseződés e folyamatai reverzibilisek, azaz



**8. ábra Az „akadályok” és a doménfalak kölcsönhatása [27].**



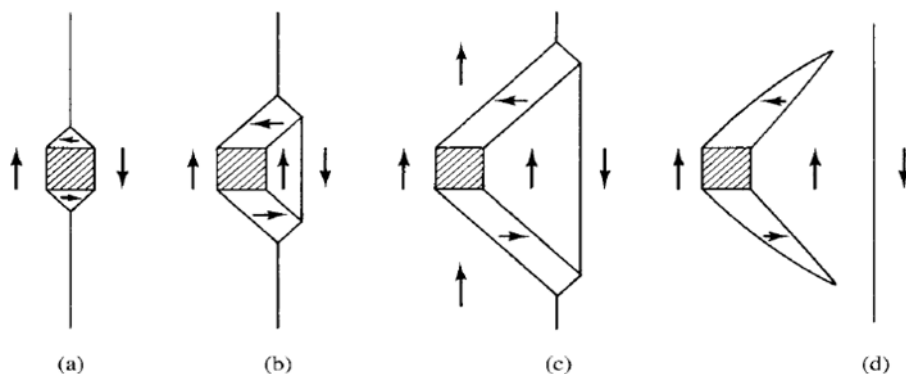
9. ábra A túske és lezáró domének egy kocka alakú kiválás körül.

a mágnesező tér megszűnésével az eredeti doménkép visszaáll, a folyamat energia veszteséggel nem jár. A fal további, kritikus mértékű elmozdulása során a csődomének lepattannak a mozgó doménfalról és a fal akadálytalanul továbbhalad (10/d. ábra). Ez a mágnesezettség ugrásszerű megváltozását okozó ún. Barkhausen-ugrás, ami már irreverzibilis doménfalmozgást jelent.

Megállapítható tehát, hogy kis és nagyméretű akadályok egyaránt nehezítik a doménfalak mozgását. A kisméretűek főként annak révén, hogy csökkentik az őket tartalmazó doménfal energiáját, a nagyméretűek pedig a körülöttük kialakuló túske és lezáró domének révén. Egységnyi térfogatú akadály akkor akadályozza a legnagyobb mértékben a doménfal mozgást, ha mérete közel megegyező az elmozduló doménfal vastagságával.

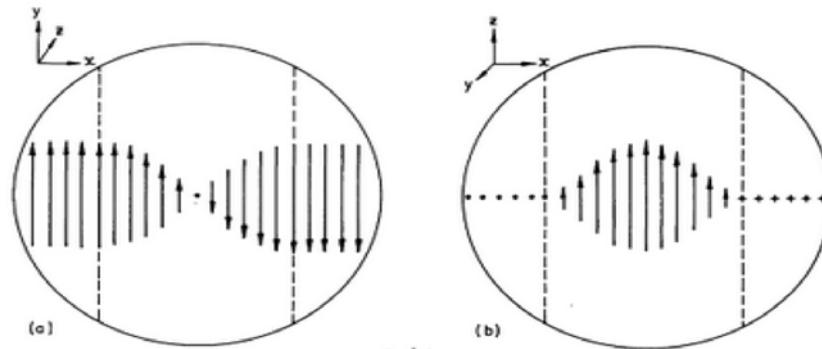
### A mechanikai feszültségek és a doménfalak kölcsönhatása

A mechanikai feszültségeket két alapvető csoportra oszthatjuk. Beszélhetünk külső feszültségekről, amiket külső terhelő erők hoznak létre és maradó feszültségekről, amik az anyagban visszamaradnak a külső terhelés megszűnését követően. A maradó feszültségeket hatótávolságuk alapján feloszthatjuk makro- és mikrofeszültségekre. A makrofeszültségek közel állandóak a szemcseméretet meghaladó méretű tartományokban, amíg a mikrofeszültségek értéke jelentősen változik, sokszor előjele is megfordul a szemcseméretnek megfelelő mérettartományokban. A maradó mikrofeszültségek a kristályhibák, elsősorban a diszlokációk feszültségteréből adódódnak. Ezek a kristályhibák velejárói, azoktól nem választhatók el így a reális anyagok esetén



10. ábra Doménfal akadályon való áthaladásának lépései [27].





**11. ábra** Egy 180°-os doménfal képe az elválasztott domének irányítottságával párhuzamos (a) és arra merőleges (b) irányokból. A (b) ábra mutatja a doménfal eredő mágneses momentumát, ami a bemutatott esetben merőleges a szomszédos domének irányára [30].

mindig megjelennek. Mérnöki szempontból a maradó makrofeszültségek fontosabbak ugyanis ezek az inhomogén képlékeny alakváltozás hatására, illetve fáradási, törési folyamatok során alakulnak ki. A makrofeszültségek tehát az anyag előéletétől függőek, azonban megfelelő hőkezeléssel nagymértékben csökkenthetőek. A makrofeszültségek a röntgen diffrakciós spektrum vonalainak eltolódását, amíg a mikrofeszültségek e vonalak kiszélesedését okozzák.

A külső és a maradó feszültségek mindkét fajtája kölcsönhatásba lép a doménekkal és doménfalakkal. Amint az a következőkből kitűnik egymásra gyakorolt hatásukat feszültségterek kölcsönhatásaként is értelmezhetjük.

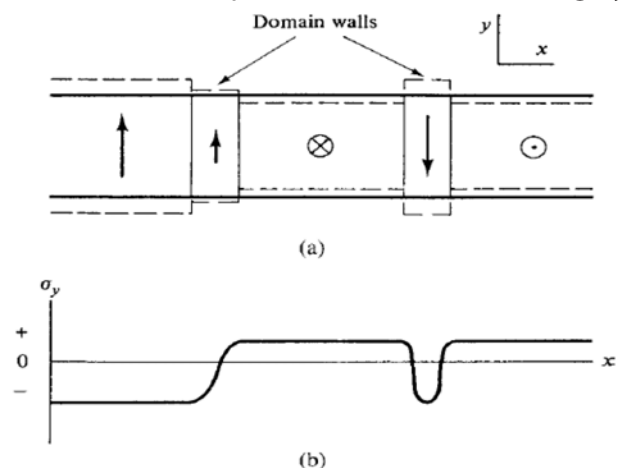
### A kristályhibák és doménfalak kölcsönhatása

A kristályhibák mindegyike torzítja a kristályrácsot, ami a hibák környezetében mechanikai feszültségteret (maradó mikro-feszültségek) hoz létre. Ez a feszültségteret léphet kölcsönhatásba a doménfalak környezetében kialakuló feszültségekkel s így hatást gyakorol a falak mozgására.

A doménfalaknak eredő mágneses momentumuk van. Az 11. ábra bemutatja egy 180°-os doménfal képét az elválasztott domének irányítottságával párhuzamos (11/a. ábra) és arra merőleges (11/b. ábra) irányokból. A 11/b. ábra szemlélteti a doménfalnak eredő mágneses momentumát, ami merőleges a szomszédos domének irányára. A magnetostrikció jelensége miatt a mágneses momentummal rendelkező tartományoknak rugalmasan deformálódnak és ezért bennük feszültségek jönnek

létre. Tekintve, hogy a doménfalak vastagsága lényegesen kisebb, mint a domének mérete ezért a doménfalban foglalt anyag rész nem képes szabadon alakváltozni aminek, eredményeképpen a domén és a doménfal között feszültség alakul ki. A 8. ábra által bemutatott esetben ez a feszültség merőleges a domének orientációjára. Fogalmazhatunk tehát úgy, hogy a doménfalak sajátos mikrofeszültséget hoznak létre az anyagban, ami kölcsönhatásba lép a kristályhibák feszültségterével.

A 12/a. ábra által bemutatott eset egy pozitív magnetostrikciójú anyag (pl. acél) spontán mágnesesödés eredményeképpen létrejövő három doménjét mutatja be, az őket elválasztó 90° és 180°-os doménfalakkal. (A szaggatott vonalak érzékeltetik az egyes részek kiterjedését, ha azok szabad alakváltozásra lennének képesek.) A minta hossz tengelye



**12. ábra** Példa a magnetostrikció által okozott mikrofeszültségekre [27]. (A zéró szint paramágneses állapotú anyagra vonatkozik.)

mentén kialakuló, a magnetostrikcióból eredő feszültség y-komponensét mutatja a 12/b. ábra. A magnetostrikció által létrehozott mikrofeszültségek a  $\lambda E$  nagyságrendjében vannak (ahol:  $\lambda$  a magnetostrikciós állandó,  $E$  a Young-modulusz). Ez a szerkezeti acélok esetén 7 Mpa körüli érték, ami viszonylag csekély azonban a domének, illetve doménfalak és kristályhibák közötti kölcsönhatást lehetővé teszi.

Ha a szokásos meghatározástól eltérő módon kristályhibának tekintünk minden olyan rácsbeli képződményt, ami mikrofeszültséget hoz létre a rácsban, akkor a doméneket és a doménfalakat kristályhibaként is értelmezhetjük. Ilyen értelemben a ponthibák, diszlokációk, felületszerű hibák és a domének, illetve doménfalak közötti kölcsönhatásokat tekinthetjük kristályhibák közötti kölcsönhatásoknak, amikben ezek feszültségtere hat egymásra. A diszlokációknak a doménfalak mozgására gyakorolt

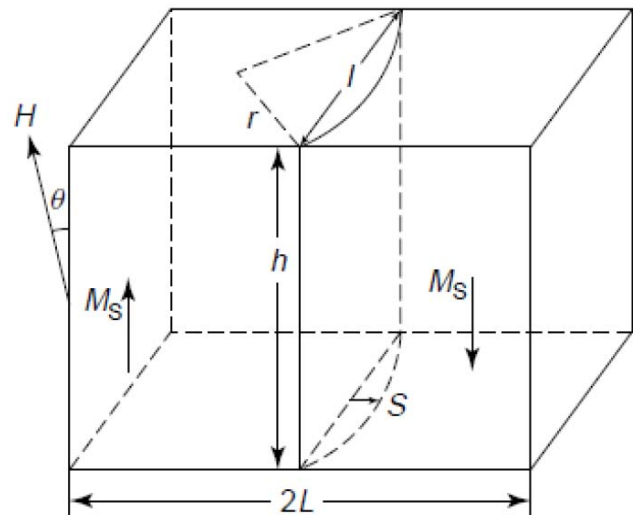
hatás arra, hogy a diszlokáció körül kialakuló feszültségtér átmérője kisebb, mint a szokásos doménfal vastagság és a diszlokáció vonala általában nem párhuzamos a mozgó doménfallal. Ezért a rendezetlen, diszperz eloszlású diszlokációk viszonylag gyenge kölcsönhatást mutatnak a doménfalakkal. Ha a diszlokációs szerkezet átalakul, a diszlokációk sorokba rendeződnek, diszlokáció láncok, szubszemcse határok jönnek létre úgy azok hatékonyabban akadályozzák a diszlokációk mozgását.

Ismert, hogy a spontán mágneseződési folyamat eredményeképpen kialakuló domének mindig valamelyik könnyű mágnesezési irányba mutatnak. Így az acélok esetén (ahol a könnyű mágnesezési irány az  $\langle 100 \rangle$ )  $90^\circ$  és  $180^\circ$ -os doménfalak jönnek létre. Ezek mozgási eltérő módon történik. Ha egy  $90^\circ$ -os fal áthalad egy tartományon akkor ott a magnetostrikció jelensége miatt méretváltozás történik, ami megváltoztatja a térfogatrész feszültségi állapotát. A  $180^\circ$ -os fal elmozdulásakor csak a mágnesezettség iránya változik (ellentétesre) így további magnetostrikciós feszültség nem jön létre [28].

A ponthibák, diszlokációk és felületszerű hibák és a doménfalak kölcsönhatásának leírására számos bonyolult analitikus modell készült [29], [30], [31], [32]. Az alábbiakban két modell alap gondolatát és végeredményét mutatom be.

A Kersten-Néel modell [27]

Ez a modell egymástól  $l$  távolságban lévő két akadályon elakadt doménfal mozgását vizsgálja. Feltételezi, hogy a doménfal rugalmas membránként írható le, külső tér hatására az elmozdulni kívánó doménfal kihajlik, majd a tér zérusra való csökkenése esetén rugalmasan visszaegyeneseedik leírva ezzel a veszteség mentes, reverzibilis mágnesezési folyamatot (13. ábra).



**13. ábra A doménfal deformációja a külső mágnesező tér hatására.**

A doménfal kismértékű kihajlásából számított kezdeti szuszceptibilitás ( $\kappa_{in}$ ):

$$\kappa_{in} = \frac{\mu_0 M_s^2 l^2 h (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)^2}{3 \gamma_\pi L}$$

A kihajló doménfal amikor eléri a kritikus mértékű kihajlást „lepattan” az akadályokról és tovább halad. A falnak az akadályokról való leszakításához (unpinning) szükséges kritikus tér:

$$H_c = \frac{\gamma_\pi \cos \phi_{kritikus}}{\mu_0 M_s l (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}$$

Ahol:  $M_s$  a telítési mágnesezettség,  $l$  a távolság a két akadály (pinning site) között,  $L$  a domén hosszúsága,  $\gamma_\pi$  az egységnyi felületű doménfal energiája,  $h$  a doménfal magassága (13. ábra szerint),  $\theta_1$  és  $\theta_2$  a mágnesezettség és a külső mágneses tér relatív szöge a doménfal két oldalán,  $\Phi_{kritikus}$  a doménfal kritikus

kihajlását jellemző szög (a végpontokon az egyenes doménfal normálisa és a kihajló fal érintője közötti szög).

Látható, hogy az akadályok távolságával a kritikus tér fordítottan arányos, azaz az egymáshoz közeli akadályok doménfal mozgást nehezítő hatása lényegesen nagyobb, mint az egymástól nagy távolságban lévőké.

A Globus-Guyot modell [27]

Ezt a modellt elsősorban ferritek mágneses tulajdonságainak modellezésére fejlesztették, de alkalmazhatónak bizonyult más anyagok esetén is a szemcsehatárokon elakadt, azokon kezdetben rugalmas membránként viselkedő majd a kritikus tér elérésekor azokról leszakadó doménfalak viselkedésének leírására.

A szemcsehatáron elakadt doménfal kismértékű kihajlásából számított kezdeti szuszceptibilitás ( $\kappa_{in}$ ):

$$\kappa_{in} = \frac{\mu_0 M_s^2 D}{\gamma \pi}$$

A falnak a szemcsehatárról való leszakításához (unpinning) szükséges kritikus tér:

$$H_c = \frac{2f}{\mu_0 M_s D}$$

Ahol:  $M_s$  a telítési mágnesezettség,  $D$  a szemcseméret,  $\gamma \pi$  az egységnyi felületű doménfal energiája,  $f$  a szemcsehatárnak az egységnyi hosszúságú doménfalra gyakorolt akadályozó hatását kifejező tényező („pinning force” amiről feltételezi a modell, hogy független az alkalmazott külső tértől).

A modell szerint a kritikus tér fordítottan arányos a szemcsemérettel, azaz a kis szemcsék határainak doménfal mozgást nehezítő hatása lényegesen nagyobb, mint a nagyméretűeké. Ez a megállapítás összhangban van a koercitív tér és a szemcseméret között ismert fordított arányossággal.

#### 4. Mágneses mérés technikai és mérés metodiai fejlesztések

E fejezetben ismertetem néhány mérés technikai, illetve műszerfejlesztésem eredményét. Ezek a fejlesztések a Budapesti Műszaki és

Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszékének mágneses anyagvizsgáló laboratóriumában történtek. Későbbi kutatásaink során – számos esetben – ezeket a mérőberendezéseket alkalmaztuk egyebek mellett a leromlási, és a fázisátalakulási folyamatok nyomon követésére. A kifejlesztett mágneses mérőeszközök jól használhatónak bizonyultak az egyetemi oktatási tevékenység során is.

#### 4.1 AC-magnetométer

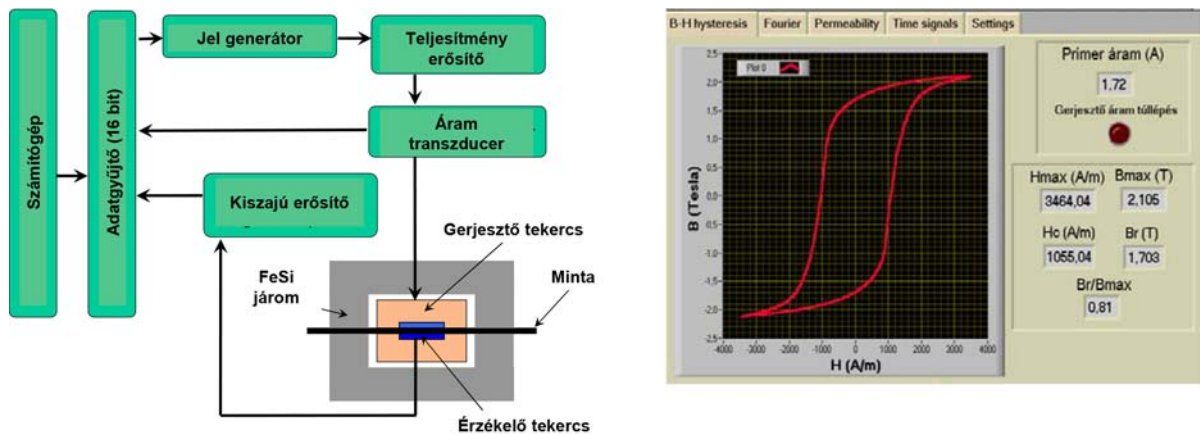
A váltóáramú gerjesztésű (AC) és teljes mértékben számítógép vezérelt magnetométer berendezés blokkvázlatát a 14. ábra mutatja. A mérési összeállítás a hozzá kapcsolódó mérőbefogókkal lehetővé teszi eltérő geometriájú minták mérését, egyebek mellett módot ad toroid, lemez és henger alakú minták mérésére. A lemez alakú minták mérésére ún. SMT (sheet metal tester) elrendezés szolgál, amiben a gerjesztő, illetve a mérőtekerccs a minta körül helyezkedik el. A mágneskör fluxusát a minta végeihez illeszkedő U-alakú, szimmetrikus járom zárja.

A berendezéshez készített saját fejlesztésű vezérlő és kiértékelő programban a mérés paraméterei szabadon változtathatóak. A gerjesztő jel frekvenciája és alakja tetszés szerint, előre programozottan változtatható. A gerjesztő tekerccs meghajtását feszültségvezérelt áramgenerátor üzemmódban működő teljesítményerősítő végzi. A mérési összeállítás lehetővé teszi a minták ciklikus lemágnesezését, a szimmetrikus belső hiszterézis alhurkok, a permeabilitás görbe és a normál mágnesezési görbe mérését. Az adattömbökben tárolt mérési adatokból közvetlenül meghatározza a telítési indukció, remanens indukció, koercitív tér, a veszteségi tényező értékét, továbbá a kezdeti és maximális permeabilitás értékeket (14/b. ábra).

#### 4.2 Rezgőmintás magnetométer

A mérőberendezés egy új konstrukciójú rezgőmintás magnetométer (Vibrating Sample Magnetometer – VSM), ami különösen alkalmas szerkezeti acél, illetve lágy és keménymágneses anyagok mágnesezési görbéinek mérésére.

A VSM magnetométer működésének elve, hogy minden mágneses térbe helyezett anyagban mágneses



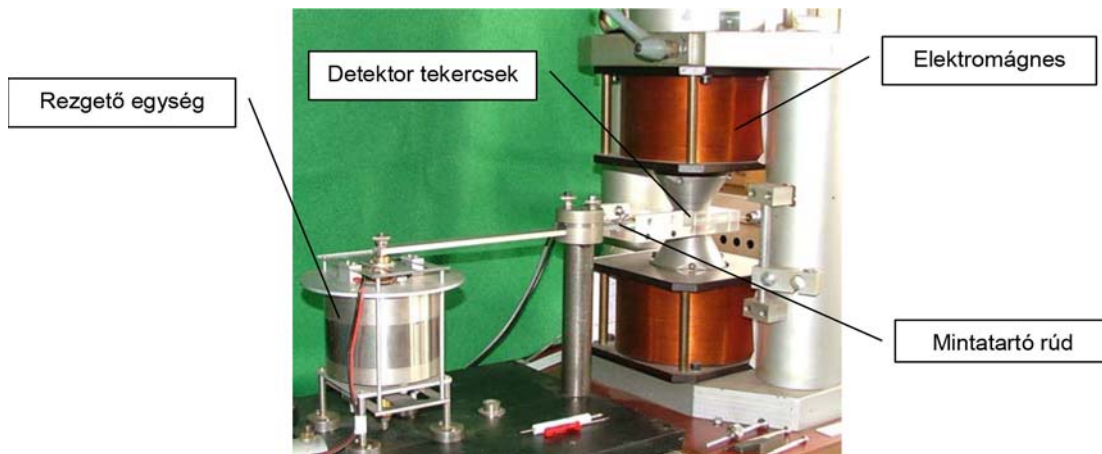
14. ábra a, Az AC magnetométer és SMT elrendezésű mérőbefogójának vázlatja  
b, Az AC magnetométer LabView vezérlőpaneljének egyik képernyőképe

momentum indukálódik, ami arányos a minta mágneses szuszceptibilitásának ( $\kappa$ ) és a külső mágneses térerősségnek a szorzatával. Természetesen, a ferro-, illetve ferrimágneses anyagok esetén a szuszceptibilitás a térerősség függvényében nemlineárisan változik. Ha a minta szinuszos rezgőmozgást végez, akkor a közelében elhelyezett egy vagy több detektor tekercsben szintén szinuszos feszültségjel indukálódik. Ez az indukált feszültség arányos a minta mágneses momentumával, a rezgés amplitúdójával és frekvenciájával. Egy megfelelően kialakított referencia tekercs alkalmazásával azonban a mért jel a frekvenciától és az amplitúdótól függetlenné tehető így a magnetométerrel a minta mágneses momentuma a külső mágneses tér függvényében kalibráltnan meghatározhatóvá válik. A rezgőmintás magnetométerben a mért, mágneses

dipólussal rendelkező mintának ún. szabad mágneses pólusai vannak, azaz a mérés a nyílt mágneskörös mérési elrendezések közé tartozik. Ennek megfelelően a mérési eredmény kiértékelésekor szükséges lehet a minta lemágnesezési tényezőjének figyelembe vétele.

A felépített magnetométer konstrukciója eltér a hagyományos ún. Foner-féle magnetométerektől, ugyanis e mérési elrendezésben a minta a szokásostól eltérő módon a mágneses tér erővonalaival párhuzamosan rezeg ezért a magnetométer elrendezést PMVSM-nek (Parallel Motion VSM) neveztem el (15. ábra).

Az új elrendezés előnyei az alábbiak; nagy érzékenység, egyszerűbb és gyorsabb mintacsere és pozícionálás, egyszerűbb detektortekercs elrendezés. Továbbá, mivel a minta rezgőmozgása egy erővonal



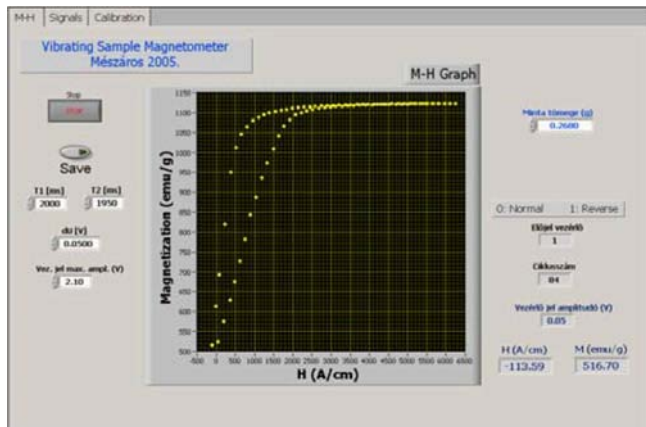
15. ábra A PMVSM berendezés rezgető egysége, rezgő mintatartó rúdja, elektromágnese és a detektor, illetve referencia tekercseket tartalmazó egység.



mentén történik ezért kisebb térfogatban szükséges csak biztosítani homogén mágneses teret, ami kisebb pólusátmérőt így kisebb teljesítményfelvételt is eredményez.

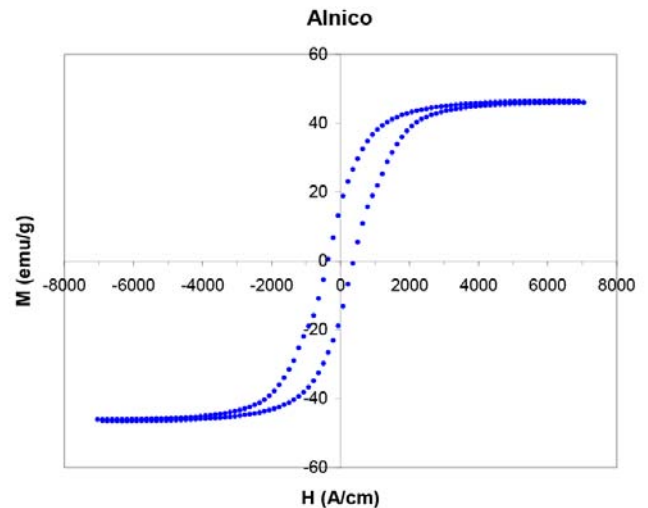
A teljesen számítógép vezérelt és mérésadatgyűjtővel felszerelt berendezés konstrukciója révén illeszkedik a mérnöki gyakorlatban előforduló minta alakokhoz és méretekhez, a vizsgálandó minta egy vízszintesen, alaplódosban 75 Hz frekvenciával rezgő, mintatartó rúd végén található mintatartóban foglal helyet.

A PMVSM magnetométer számos szolgáltatást nyújt. Egyebek mellett alkalmas a minta lemágnesezésére, továbbá a rendszer kalibrációjára, grafikus kezelőfelülete áttekinthető, módot ad a mért adat-sorok mentésére (16. ábra). Az elrendezés lehetővé teszi az 1-400 mg tömegű, ferromágneses minták gyors és megbízható mérését.



**16/a. ábra** A PMVSM berendezés LabView vezérlőpaneljének egyik képernyőképe.

A magnetométer további fontos előnye, hogy mód van a minta elforgatására a külső mágneses tér irányához képest, így módot ad a mágneses tulajdonságok irányfüggésének vizsgálatára, lehetővé téve a mágneses anizotrópia mérését. A PMVSM berendezés méreténél és alkalmazhatóságánál fogva hasznos eszköze a szerkezeti anyagok mágneses vizsgálataival foglalkozó kutatásoknak, illetve jól felhasználható oktatási feladatokhoz. A PMVSM berendezés főként a mérnöki gyakorlatban előforduló mérési feladatokhoz készült. A mintacsere és beállítás gyors, reprodukálhatósága jó, működése stabil, érzékenysége megfelelő a feladatokhoz. A PMVSM berendezést sikeresen alkalmaztuk lágy- és keménymágneses, illetve szerkezeti acélok mágneses tulajdonságainak tanulmányozására. A berendezés, egyebek mellett,



**16/b. ábra**

**Keménymágneses minta mérése során meghatározott mágnesezettség (M) és mágneses télerősség (H) adatpontok alapján felvett hiszterézisgörbe (saját mérés).**

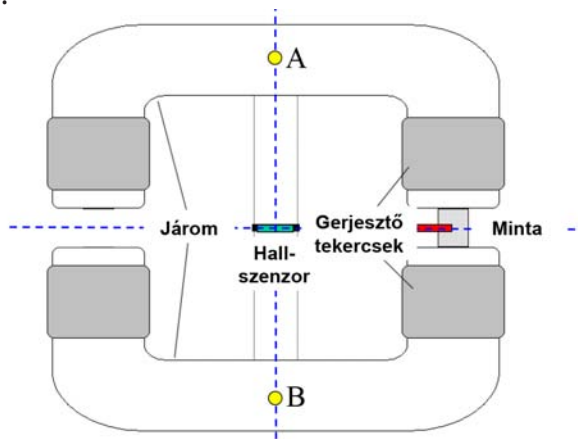
kiválóan alkalmasnak bizonyult a szerkezeti-, illetve melegsziárd acélokban alakítás, hőkezelés továbbá egyes tönkremeneteli folyamatok (fárasztás, hőfárasztás, kúszás stb.) hatására létrejövő szerkezeti változások, mágneses anizotrópia detektálására, továbbá egyes fázisátalakulási folyamatok nyomon követésére. A vizsgált minták, jellegükből adódóan, viszonylag nagyméretűek (tipikusan 50-300 mg) és ferro- vagy ferrimágneses tulajdonságúak. A PMVSM berendezés tulajdonságait több mintán, több mérési sorozatban, körültekintően tanulmányoztam, kalibrálása nikkeltől készült, gömb alakú minta segítségével történt. A legfontosabb rendszer adatok az alábbiak; az M és H mérésének pontossága jobb, mint  $\pm 1\%$ , a mérések reprodukálhatósága  $\pm 0.5\%$ , érzékenysége tökéletesen megfelelőnek bizonyult szerkezeti acél minták vizsgálataikhoz.

A PMVSM berendezést egyebek mellett a következő kutatási feladatok során bizonyult jól alkalmazhatónak:

- \* Hőfárasztott melegsziárd acél minták indukált mágneses anizotrópiájának mérése.
- \* Duplex korrózióálló acélmintákban hőkezelés által létrehozott fázisátalakulások vizsgálata.
- \* Ferritporok ferri/paramágneses fázisarányának vizsgálata.

4.3 DC-magnetométer

A BME ATT tanszéken rendelkezésre álló ún. Stäblein-Steinitz rendszerű DC-magnetométert korszerűsítettük. A keresztágot tartalmazó mágneses hídkapcsolást az ún. Stäblein-Steinitz féle mágnesező jármot hasáb alakú keménymágneses minták mágneses hiszterézis görbéjének felvételére dolgozták ki a harmincas évek közepén [12], [13]. A mérés felépítése alapján az egyenáramú (DC), zárt mágneskörös mágneses mérések, közé tartozik. A mérési összeállítás egy nagyméretű, lágyvasból készült mágnesező jármot és négy gerjesztőtekerccset tartalmaz. A szimmetrikus felépítésű mágnesező jármot két U-alakú félből és egy relatíve kis keresztmetszetű áthidaló ágból áll (17. ábra). Az összeállításban két, egyforma méretű légrés van: a mérő-, illetve a referencia légrés.



17. ábra

A DC magnetométer felépítésének vázlatja

A mintát a mérőlégrés párhuzamos pólusfelületei közé fogjuk be. Ennek megfelelően a mintának nincsenek szabad mágneses pólusai, tehát a külső lemágnesezőtér hatásával nem kell számolnunk.

Ahol:

$$\mu_0 M_{Minta} = B_{Keresztág} \frac{C_1 \left(1 + \frac{C_2}{l}\right)}{A}$$

$M_{Minta}$ : a minta mágnesezettsége

$B_{Keresztág}$ : a keresztágban mért indukció

$l$ : a minta hossza

$A$ : a minta keresztmetszete

$C_1$  és  $C_2$ : kalibrációs tényezők

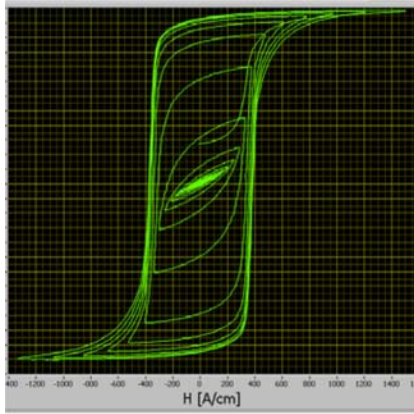
A mintában ébredő mágneses teret (H) a mérőlégrésben a minta mellett elhelyezett Hall-szonda méri. Erre az ad módot, hogy a H-tér közeghatár felületével párhuzamos (tangenciális) komponense a közeghatáron „folyamatosan megy át”, azaz a tangenciális komponens a közeghatár két oldalán megegyezik. Tehát ha a mágneses térnek csak tangenciális komponense van, akkor a mintában és a mellette lévő légrésben ébredő H-tér azonos.

A mérőlégrésbe behelyezett minta a mágneses kör szimmetriáját felborítja így a kör fluxusának egy része a kör keresztágán keresztül záródik. A minta mágnesezettsége (M) a mágneses híd keresztágában elhelyezett Hall-szonda által mért térrel egyenesen arányos.

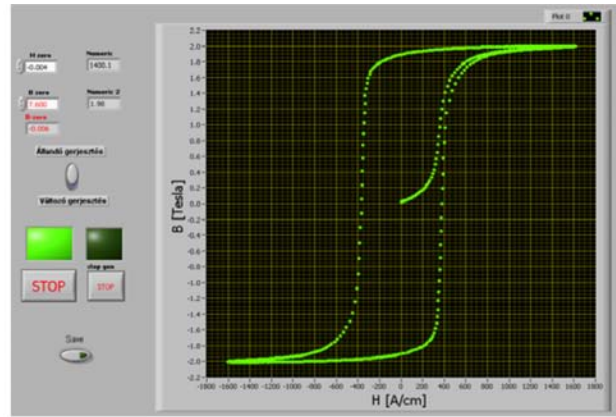
A mérési összeállítást korszerű térmérő szondákkal és elektronikával szereltük fel, továbbá vezérléséhez, illetve a mérésadatgyűjtéshez LabView felhasználásával vezérlőprogramot készítettünk. A beépített két Hall-szonda jelei kétcsatornás mérőerősítőn keresztül egy 16 bit felbontású mérésadatgyűjtő két bemenetére kerültek. A gerjesztést egy számítógép vezérelt teljesítményerősítő szolgáltatja. A berendezéshez készített vezérlőprogram módot ad a minta ciklikus lemágnesezésére, illetve a következő mágnesezési görbék mérésére: szimmetrikus és aszimmetrikus belső hiszterézishurkok, mellékhiszterézis hurkok, elsőmágnesezési, illetve szűzgörbe, normál mágnesezési görbe, hiszterézismentes mágnesezési görbe.

A berendezés különleges adottsága, hogy a szimmetrikus belső és mellék hiszterézisgörbék sorozatának mérésén túl (18. ábra), lehetővé teszi a hiszterézismentes görbe mérését is, a Bozorth-féle mérési utasításnak megfelelően [20]. Ismert, hogy a hiszterézismentes görbe pontjai az adott külső gerjesztőtér mellett az anyag egyensúlyi mágnesezettségi állapotát jellemzik. A hiszterézismentes mágnesezési görbe a minta mágneses egyensúlyi állapotát írja le és alapvető fontosságú bemenő adatokkal szolgál a mágnesezési görbe modellek számára, továbbá a hiszterézismentes mágnesezési görbéből meghatározható a minta ún. belső lemágnesezési tényezője, ami – egyebek mellett – a heterogén (pl. szemcsékből álló) mágneses szerkezetek jellemzése során rendkívül hasznos.

A DC-magnetométer alkalmas szerkezeti acélokból



18/a. ábra



18/b. ábra

18. ábra A digitalizált DC magnetométer vezérlőpaneljének két képernyőképe.

Lemágnesezési (18/a. ábra), illetve mérési üzemmódban (18/b. ábra). (saját mérés)

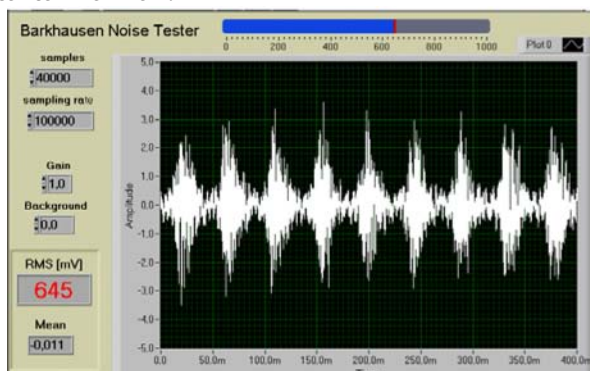
készült tömbi minták méréséhez ugyanis lehetővé teszi ezek telítésig való mágnesezését. A magnetométer különösen hasznosnak bizonyult TRIP acélban, duplex- és lean-duplex korrózióálló acélokban végbemenő fázisátalakulások vizsgálata során.

#### 4.4 Barkhausen-zajmérés

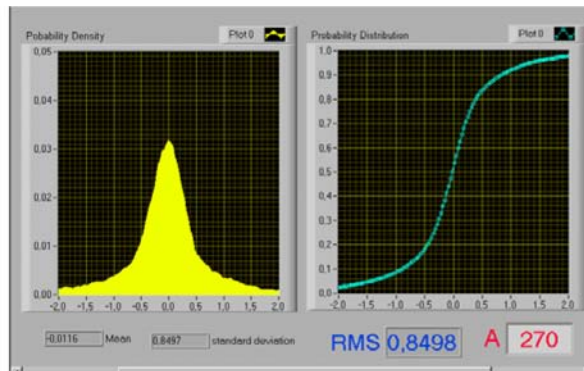
Megterveztem és felépítettünk egy digitális jelfeldolgozású Barkhausen-zaj mérőkészüléket, ami módot ad a zajjel komplex statisztikai vizsgálatára is. A berendezés segítségével nemcsak a zajjel megszokott négyzetes középértékét (RMS) hanem a zajimpulzusok amplitúdójának eloszlás, illetve sűrűségfüggvényét is módunk van meghatározni (19. ábra).

Ismert, hogy az ún. rendezett mágnese szerkezetű (ferro-, antiferro-, ferri-mágnese) anyagok telítésig mágnesezett tartományokat, ún. mágnese doméneket tartalmaznak.

Külső mágnese térben a mágnese mikroszerkezet megváltozik. Kis külső mágnese terek esetén –azaz a mágnesezési görbe kezdeti szakaszán– az átmágneseződés jellemző mechanizmusa a doménfalak mozgása, ami reverzibilis, illetve irreverzibilis lehet. E mechanizmus során a külső térrel megegyező, vagy ahhoz közeli orientációjú domének térfogata növekszik, szomszédai rovására. Ezt a folyamatot nagyobb külső terek esetén a doméneken belüli momentumok átfordulása az ún. forgás követi, először egyedileg majd koherens módon. Az átmágneseződés folyamata – az előbbieknél megfelelően – szükségessé teszi a doménfalak elmozdulását. A doménfalak mozgása az irreverzibilis falmozgás tartományában akadályozott, ugrásszerű módon történik, ahol egy-egy átugrás rendkívül rövid időt igényel. Ezért átmágnesezés közben a minta felületén vagy körülötte elhelyezett detektor-



19/a.



19/b.

19. ábra A digitalizált Barkhausen-zaj mérőberendezés vezérlőpaneljének két képernyőképe. Regisztrált zajjel (19/a. ábra), illetve a zaj amplitúdó sűrűség és eloszlásfüggvénye (19/b. ábra). (saját mérés)



tekercsben jól mérhető feszültség impulzusok indukálódnak. A folyamat jellegének megfelelően az átmágneseződés során az elemi impulzusok eredője egy sztochasztikusnak tekinthető zajfeszültség lesz, amit mágneses Barkhausen-zajnak nevezünk. A Barkhausen-zaj nagyságát és jellegét a minta szövetszerkezete, diszlokációs szerkezete és mechanikai feszültségi állapota együttesen határozzák meg. A Barkhausen-zajmérés roncsolásmentes (NDE) vizsgálati módszer, ami sok esetben a szerkezet, illetve a feszültségi állapot gyors vizsgálata ad módot. A mérőberendezést számos vizsgálat során alkalmaztuk sikeresen.

### 4.5 DC-koerciméter

Korszerűsítettem a tanszéken található Förster-féle, koerciméter típusú, nyílt mágneskörös mérési összeállítást. A mérőkészülékben a vizsgált rúd alakú (kis lemágnesezési tényezőjű) minta egy szolenoid tekercs belsejében helyezkedik el, aminek tere azt felmágnesezi. A vizsgált minta a mágnesezettségével arányos teret hoz létre a szolenoidon kívül, amit a tekercsre adott ellenirányú gerjesztéssel zérusra kompenzálunk. A mért minta mágneses terének a szolenoidra merőleges komponensét a szolenoidon kívül elhelyezett két nagy érzékenyséű ún. Fluxset típusú mágnesmérő szonda érzékeli (20. ábra). A mérési módszer statikus térben határozza meg a minta koercitív terét így a más mérések esetén esetlegesen hibát okozó örvényáramú hatásokkal nem kell számolnunk. További fontos előny, hogy a készülékben alkalmazott mérőszondákat kizárólag zérus indikációra használjuk, így nem szükséges azokat kalibrálni.

Az ismertetett mágneses mérési összeállításokat számos kutatási munka során sikeresen alkalmaztam. Ezek két fő csoportba oszthatóak:

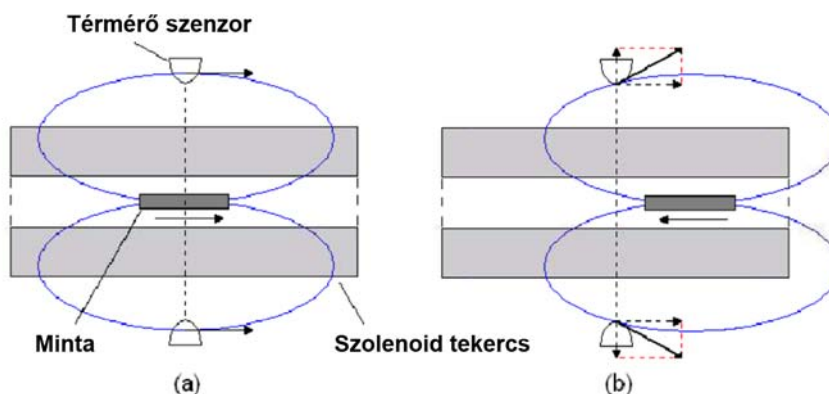
1. Melegsilárd acélokban a növelt hőmérsékletű üzemeltetés során végbemenő leromlási folyamatok, illetve szerkezeti változások vizsgálata és értelmezése.
2. Egyes mágnesezhető ötvözetekben lezajló fázisátalakulási folyamatok anyagszerkezettani hátterének vizsgálata és értelmezése.

Az utóbbi vizsgálatok az ausztenites, a superduplex és a lean-duplex korrózióálló acélokra továbbá TRIP acélra terjedtek ki.

A következő pontban –illusztrációként– lean-duplex korrózióálló acélban képlékeny hidegalakítás hatására történő martenzites fázisátalakulásnak a mágneses tulajdonságokra gyakorolt hatását mutatom be.

### 5 Az alakítási martenzit megjelenése lean-duplex korrózióálló acélban

A lean-duplex korrózióálló acélok (LDSS) szövetszerkezete a duplex típusokhoz hasonlóan kettős, alapvetően ferrit és ausztenit fázisokat tartalmaz leggyakrabban 40-60% vagy 50-50% arányban. Ebben az acél típusban az ausztenitet stabilizáló nikkel mangán és/vagy nitrogén ötvözéssel helyettesítik [33], [34], [35]. Az LDSS ötvözeteket alacsony nikkel tartalmuk miatt „soványduplex” néven is említik. A módosított összetételnek a nikkel magas ára miatt gazdasági előnye van, ezen túlmenően azonban felhasználás és technológiai szempontból nagy



20. ábra A DC koerciméter elvi felépítése. (a) A minta felmágnesezése.

(b) Az aszimmetrikus pozícióban lévő felmágnesezett minta saját mágneses terének mérése.



C	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	P	S	N	Cu	Fe
0.028	21.72	3.41	1.13	0.78	0.15	0.026	0.01	0.13	0.32	bal.

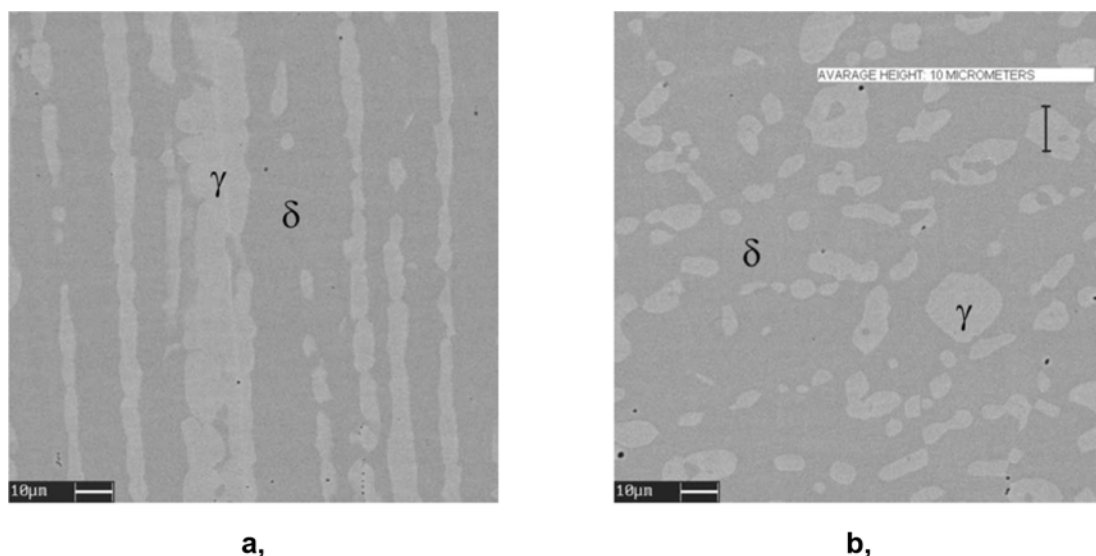
2. táblázat: A vizsgált LDSS kémiai összetétele [tömeg%].

jelentőségű, hogy a lean-duplex acélokban még hosszú idejű hőbevitel hatására sem jönnek létre a duplex korrózióálló acélok esetén elridegedési és korrózióállósági problémákat okozó  $\sigma$  és  $\chi$  fázisok. A hőkezelési és a hegesztéstechnológia szempontjából jelentős könnyebbséget jelent, hogy az LDSS acélok ferrit fázisa stabilis, hőbevitel hatására nem bomlik. Azonban az LDSS acélok ausztenitje a DSS acélokhoz képest termodinamikailag kevésbé stabilis, így az ausztenites korrózióálló acélokhoz 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 acélokban is az ausztenites korrózióálló acélokhoz hasonlóan három lehetséges kinetika szerint mehet végbe, azaz:  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ ,  $\gamma \rightarrow \alpha'$ ,  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$  [36], [37]. Kis mértékű képlékeny alakítás esetén a hcp rácsú  $\varepsilon$ -fázis, míg nagy alakítás esetén a tck rácsú  $\alpha'$ -martenzit dominál. A DSS, illetve az LDSS ötvözetek ausztenitjének eltérő stabilitását az eltérő rétegződési hiba energiájukkal (SFE) magyarázhatjuk. Az LDSS ötvözetek – kisebb molibdén tartalma miatt – rétegződési hiba energiája alacsonyabb, mint a DSS acéloké ezért ausztenit fázisuk is kevésbé stabilis.

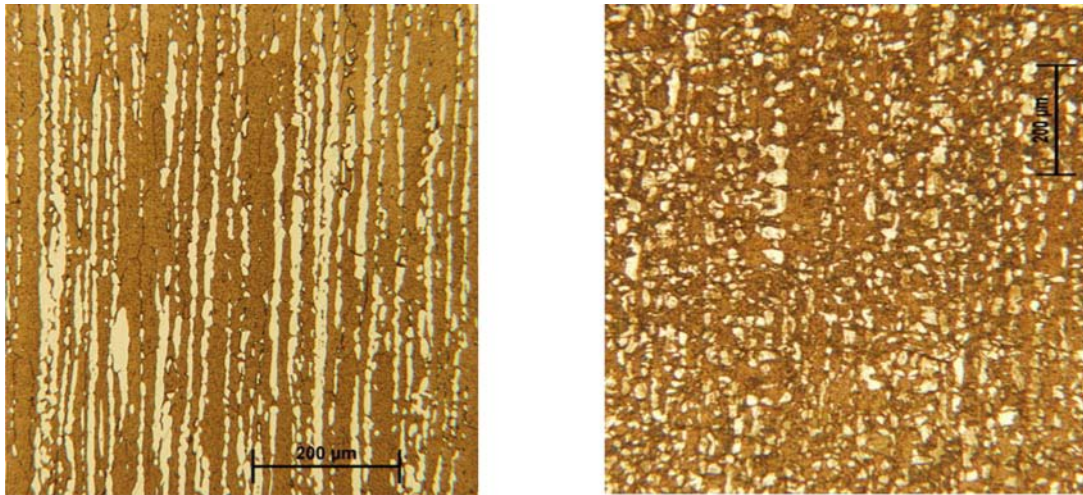
### 5.1 Lean-duplex korrózióálló acélon végzett vizsgálatok

A vizsgálatokat Acciaierie Valbruna S.p.a gyártmányú V2101Mn típusú, 8 mm kiindulási vastagságú lean-duplex korrózióálló acél (LDSS) lemezanyagon végeztem, aminek nominális kémiai összetételét mutatja a 2. táblázat. A gyártó közlése szerint az alapanyag a meleghengerlést követően 1050 °C hőmérsékletű 30 perces homogenizáló hőkezelést kapott. A kiindulási állapotú minta hossz és keresztirányú metallográfiai csiszolatának pásztázó elektronmikroszkópos, visszaszórt elektron detektorral (BSE) készült szövetképét mutatják a 21/a., illetve 21/b. ábrák. A képeken a rendszámkontraszt jelensége miatt az eltérő kémiai összetételű ausztenit ( $\gamma$ ) és ferrit ( $\delta$ ) fázisok jól megkülönböztethetőek, a szemcsék hosszirányban elnyújtottak, az alakítás hatása megfigyelhető.

A mintákat szobahőmérsékleten, 130 mm hengerátmérőjű hengerszéken több lépésben mintegy 3 cm/s sebességgel alakítottam, a vastagságot mintegy 0,1 mm-el csökkentve szúrásoként. A kilenc darabból álló mintasorozat esetén a képlékeny hidegalakítás mértéke egyenletes lépésekben növekedett a maximális, 80%-os értékig.



21. ábra A vizsgált LDSS hossz- (a) és keresztirányú (b) csiszolatának SEM BSE képe. Jelölt fázisok:  $\gamma$  - ausztenit,  $\delta$  - ferrit



a,

b,

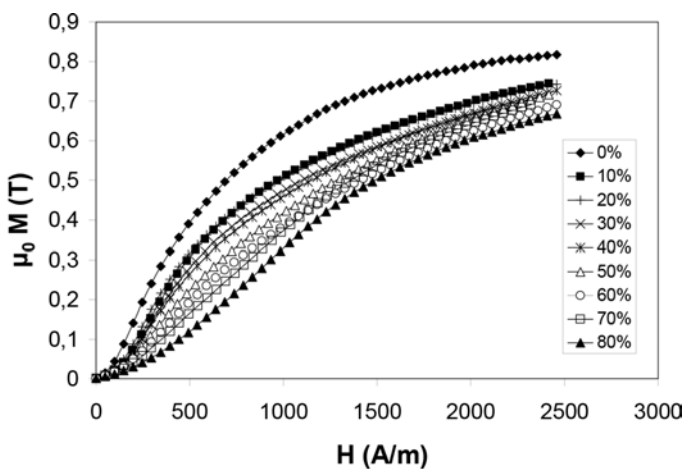
**22. ábra** A vizsgált LDSS hosszirányú csiszolatának optikai mikroszkópos szövetképe. (a) Kiindulási állapotban, (b) 80%-os képlékeny alakváltozást követően.

A 22. ábrán a vizsgált LDSS hosszirányú metallográfiai csiszolatának optikai mikroszkópos szövetképeit láthatjuk. A metallográfiai előkészítés Beraha-féle sósav bázisú marószert alkalmazásával történt. A szövet a kiindulási állapotban alakított, soros jellegű (6.35/a. ábra), az alkalmazott legnagyobb képlékeny alakítást (80%) követően (6.35/b. ábra) megfigyelhető a szemcsék összetöredezése, felapródózódása. A metallográfiai vizsgálat során három hossz- és három keresztirányú csiszolaton, 200-szoros nagyítás mellett, 20-20 képmező kiértékelésével meghatároztam a fázisarányt, ami kiindulási állapotban 79,6% ferrit és 20,4% ausztenit értékre adódott.

A minták keménységét Buehler, Indetamet-1100

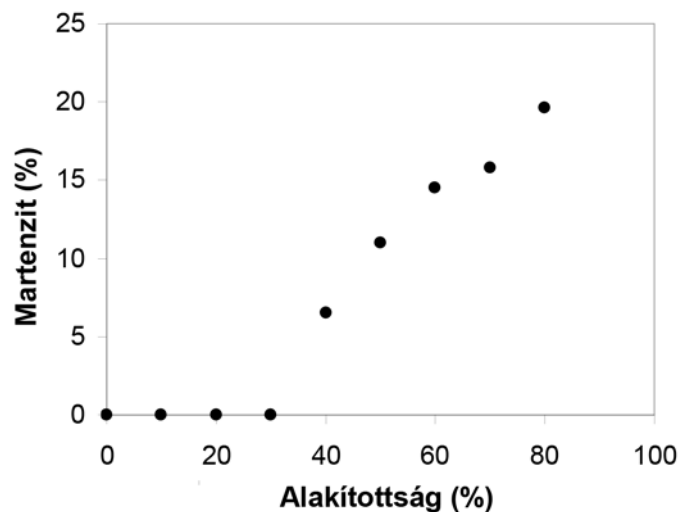
típusú keménységmérő berendezéssel 500 gramm terheléssel mértem, a Vickers-keménység képlékeny alakítás hatására történő növekedését mutatja a 27. ábra.

Az alakított lemezminták mágnesezési görbéinek mérését a 4.1 pontban ismertetett AC magnetométerrel végeztem, SMT elrendezésben. A mérőfrekvencia 5 Hz, az alkalmazott legnagyobb gerjesztő tér 2450 A/m volt. Az egyenként 200 darab szimmetrikus belső hiszterézishurok csúcspontjainak mértani helyeként adódó kilenc normál mágnesezési görbét mutatja a 23. ábra. Az ausztenit martenzites átalakulása révén létrejövő ferromágneses  $\alpha'$ -fázis mennyiségének növekedése következtében a minták mágneses

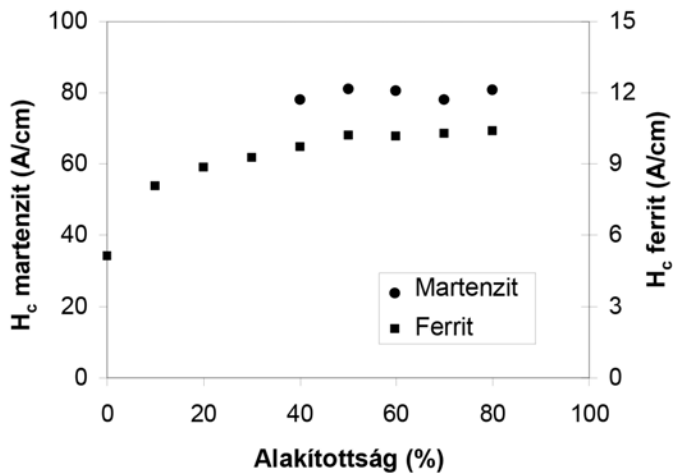


**23. ábra** Az alakított minták normál mágnesezési görbéi.

Mágneses polarizáció ( $\mu_0 \cdot M$ ) a gerjesztő tér függvényében.



**24. ábra** Az  $\alpha'$ -martenzit fázis mennyiségének alakulása a képlékeny alakváltozás



**25. ábra** A ferrit és martenzit fázisok koercitív terének alakulása a képlékeny alakváltozás mértékének függvényében.

telítési polarizációja jól láthatóan növekedett a képlékeny alakítás hatására.

A mérési eredmények kiértékelését egy korábban kifejlesztett, az úgynevezett MH-modellen alapuló eljárással végeztem [38], a modellben két irreverzibilis mágnesezési tagot feltételezve. A dekompozíciós adatkiértékelési eljárás lehetőséget adott arra, hogy a LDSS acél mintákban jelen lévő két ferromágneses tulajdonságú fázis (ferrit, martenzit) mágnesezési görbéit és relatív arányukat számításokkal meghatározzam, vagyis a minta tömbi mágnesezési tulajdonságaihoz a felépítő szövetelemek mágnesezési tulajdonságaira következzek.

A 24. ábra a ferromágneses alakítási martenzit fázis számításokkal meghatározott relatív mennyiségét, a 25. ábra pedig a ferrit és a martenzit fázisok koercitív terének változását mutatja a képlékeny alakítottság mértékének függvényében. A martenzit fázis mennyiségének számítása során feltételeztem, hogy a ferrit mennyiségét a képlékeny alakítás nem befolyásolja, így annak mennyisége, az alakítottságtól függetlenül, a kiindulási 79,6%.

Megfigyelhető, hogy a ferromágneses  $\alpha'$ -martenzit fázis mintegy 30%-os képlékeny alakítást követően jelenik meg az ötvözetben, ez alatt a kiértékelési eljárás nem adott értékelhető mennyiségű martenzitet.

30%-os alakítottság fölött a kimutatott  $\alpha'$ -martenzit mennyisége monoton, közel lineárisan növekszik egészen 19,6% értékig, ami meglehetősen közel esik

az ausztenit mennyiségének kiindulási 20,4%-os értékéhez, azaz megállapítható, hogy az alkalmazott legnagyobb képlékeny alakítás (80%) hatására közel a teljes ausztenit fázis ferromágneses tulajdonságú  $\alpha'$ -martenzitté transzformálódott. A kiértékelési eljárás módját a ferrit és martenzit fázisok telítési polarizációjának számítására ezek rendre 0,942 T és 0,911 T értékre adódtak.

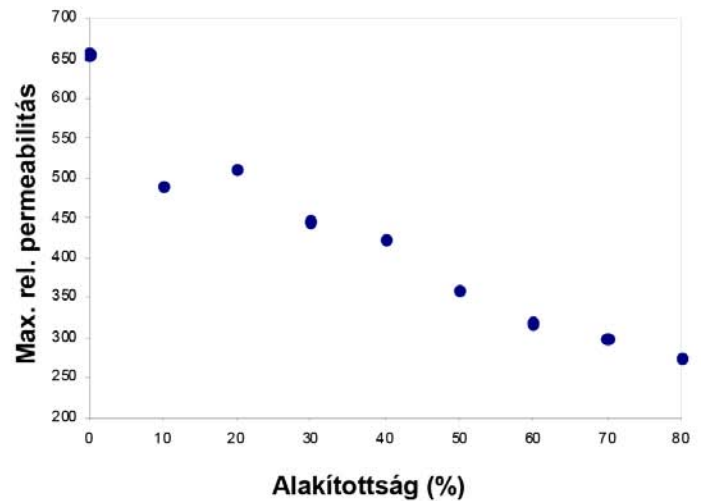
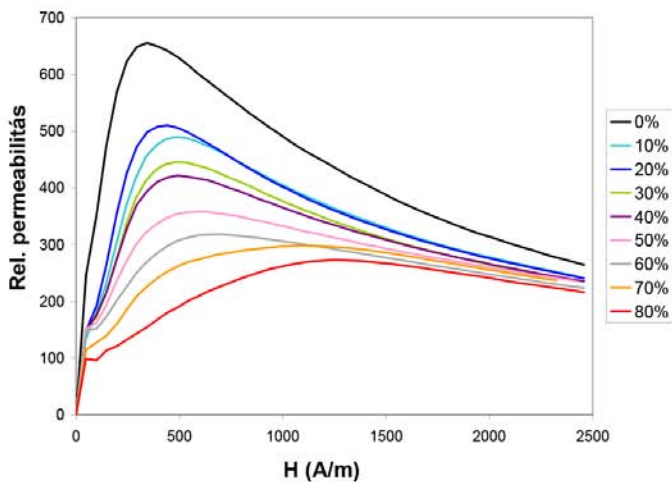
A martenzit fázis koercitív tere az alakítás mértékétől függetlennek tekinthető, nagysága 79,5 A/cm értékűre adódott. Azaz feltételezhetjük, hogy a kialakuló martenzit szerkezete nem változik a képlékeny alakítás során. Azonban, a ferrit fázis koercitív tere a kis alakváltozási tartományban (30% alatt) jelentős emelkedést mutat. Ebből arra következtettem, hogy kis képlékeny alakváltozás esetén a ferrit szemcsék jelentősen deformálódnak, diszlokáció-sűrűségük és így koercitív terük is növekszik.

Az AC magnetométeres mérések eredményei alapján meghatározott relatív differenciális permeabilitás görbéket és a maximális permeabilitás alakulását láthatjuk a képlékeny alakítottság mértékének függvényében a 26/a., illetve 26/b. ábrákon. Az alakítás hatására a permeabilitás jelentősen csökken, ami a minták mechanikai és mágnesezési keményedésével, azaz a Vickers keménység és a koercitív tér növekedésével (27. ábra) összhangban van. A tömbi minta koercitív terének emelkedése kis alakváltozási tartományban (30% alatt) a ferrit keményedésével, ennél nagyobb alakítottság esetén pedig a kialakuló  $\alpha'$ -martenzit hatásával magyarázható.

Az alakított LDSS mintákon fázisanalízis céljából röntgen diffrakciós méréseket végeztünk Siemens D500 XRD diffraktométer berendezéssel. A kiindulási állapothoz tartozó spektrumban az ausztenit ( $\gamma$ ) fázishoz tartozó csúcs jól látható, a 80%-os alakítottságú minta spektrumából azonban ez a csúcs már hiányzik, illetve a kimutathatósági határ alatt van, vagyis megállapítható, hogy 80%-os mértékű képlékeny alakítás hatására az ausztenit teljes mennyisége  $\alpha'$ -martenzitté transzformálódott, ami lehetőséget adott a következőkben ismertetendő DC-magnetométeres mérések kalibrálására.

Az alakított LDSS acél minták DC mágnesezési görbéit a 4.3 pontban ismertetett DC-magnetométerrel is megmértem. Ez a magnetométer hasáb, illetve henger alakú minták mérésére alkalmas. Ezért a





a,  
**26. ábra Az alakított LDSS minták relatív differenciális permeabilitás görbéi (a) és a maximális permeabilitás alakulása (b) képlékeny alakítás hatására.**

hengerléssel alakított mintákból a 28. ábrának megfelelő módon rétegezéssel a mérőkészülék adottságaihoz jól illeszkedő 20\*15\*15 mm méretű hasáb alakú mintákat készítettem.

A DC magnetométeres méréshez illeszkedő minták kialakítása a hengerelt LDSS szalagokból.

A minták ciklikus lemágnesezését követően megmértem a első mágnesezési görbéiket (29. ábra). A DC magnetométerrel mód volt mintegy 2250 A/cm maximális gerjesztés alkalmazására, ami lehetővé tette a minták telítési való mágnesezését. Látható, hogy a minták telítési polarizációja folyamatosan és jelentős mértékben növekedett a képlékeny alakítás

hatására bekövetkező ausztenit→martenzit fázisátalakulás következtében.

Ismert, hogy az ötvözetek mágneses telítési polarizációja egyenesen arányos a bennük lévő rendezett szerkezetű (ferro-, illetve ferrimágneses) mágneses fázisok mennyiségével [24]. A két ferromágneses fázist, ferritet és martenzitet tartalmazó LDSS esetén a minta eredő mágneses polarizációja

$$\mu_0 M_S^{\min ta}$$

továbbá a  $\delta$ -ferrit

$$\mu_0 M_S^{\delta}$$

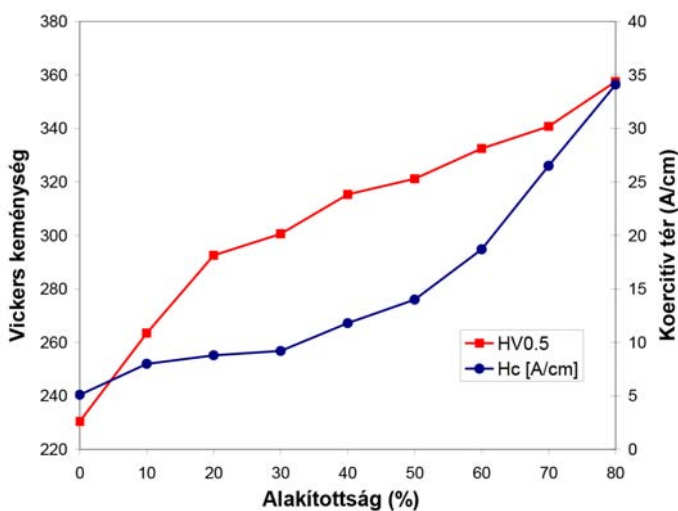
és a martenzit fázis

$$\mu_0 M_S^{\text{martenzit}}$$

polarizációja között az alábbi összefüggés teremti meg a kapcsolatot, ahol  $R^{\delta}$ , illetve  $R^{\text{martenzit}}$  a ferrit, illetve a martenzit fázisok relatív mennyisége.

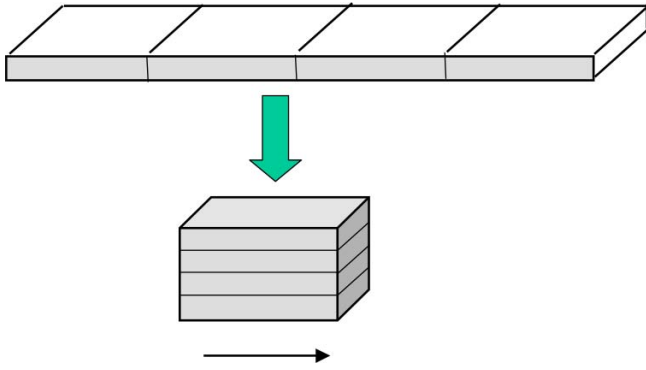
$$\mu_0 M_S^{\min ta} = R^{\delta} \mu_0 M_S^{\delta} + R^{\text{martenzit}} \mu_0 M_S^{\text{martenzit}}$$

Figyelembe véve, hogy kezdeti állapotban, az ötvözetben 20,4%  $\gamma$  és 79,6%  $\delta$  fázis található és a minta átlagos telítési polarizációja 0,752 T, továbbá 80% alakítottság esetén, 20,4%  $\alpha'$ -martenzit és 79,6%  $\delta$ -ferrit található az ötvözetben és a telítési polarizáció 0,94 T. A fenti összefüggés alapján a martenzit mennyiségének meghatározásához a 30. ábrán látható kalibrációs görbét vettem fel, aminek felhasználásával kiszámítottam az alakított minták



**27. ábra A LDSS minták keménységének és koercitív terének növekedése az alkalmazott hideghengerlés hatására**

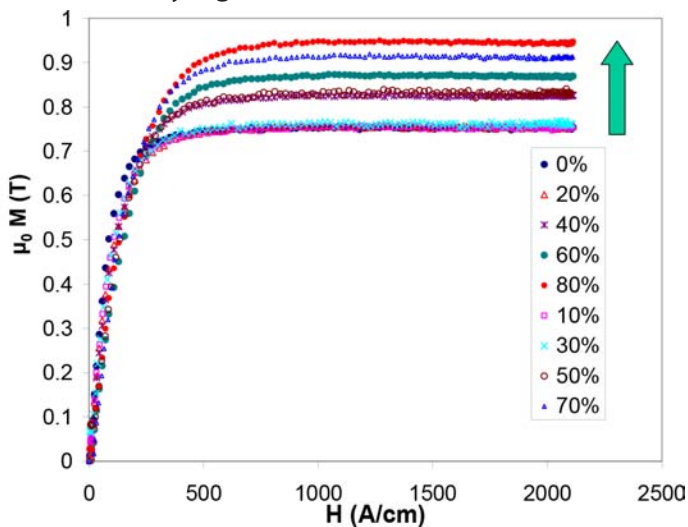




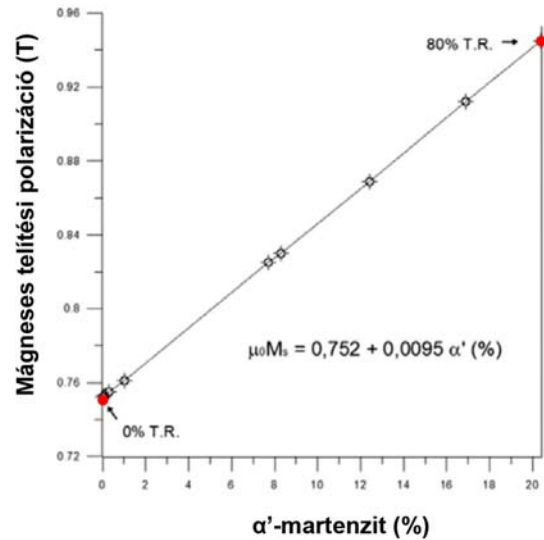
**28. ábra** A DC magnetométeres méréshez illeszkedő minták kialakítása a hengerelt LDSS szalagokból

telítési polarizáció értékeit (31. ábra). Kiszámítottam továbbá az  $\alpha'$ -martenzit és a  $\delta$ -ferrit telítési polarizációját, amelyek rendre 0,92 T, illetve 0,95 T értékűre adódtak.

Érdekes eredményt ad a Vickers-keménység vizsgálata a martenzit fázis mennyiségének függvényében (32. ábra). Látható, az első négy minta esetében (0, 10, 20, 30% alakítottság) a keménység meredeken növekszik közel zérus martenzit jelenléte mellett. Nagyobb alakítottság esetén a keménység és a martenzit fázis mennyisége lineáris kapcsolatot mutat. Ebből arra következtethetünk, hogy 30%-os alakítottság alatt a keménység növekedésének hátterében a ferrit alakváltozási keményedése áll. Az e fölötti (30%-80% közötti) alakváltozási tartományban a keménység növekedése az alakítási martenzit



**29. ábra** A hengerelt LDSS minták első mágnesezési görbéi. Megfigyelhető a telítési polarizáció növekedése az alakítási martenzit fázis mennyiségi növekedésének hatására.



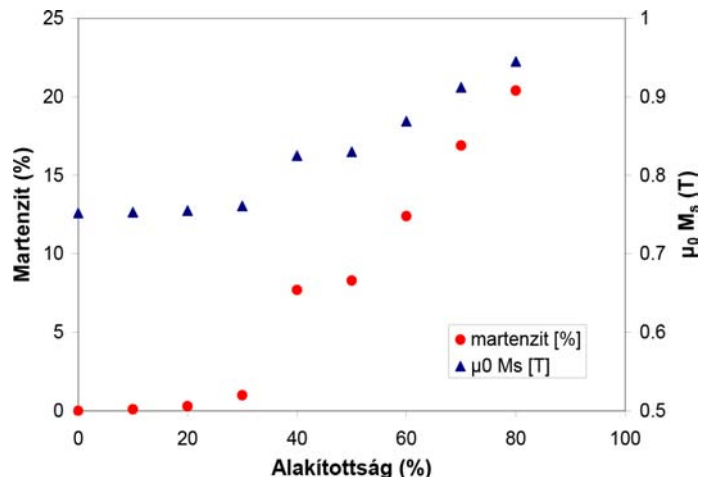
$$\mu_0 M_s^{\text{martenzit}} = 0,92 \text{ T}$$

$$\mu_0 M_s^{\delta} = 0,95 \text{ T}$$

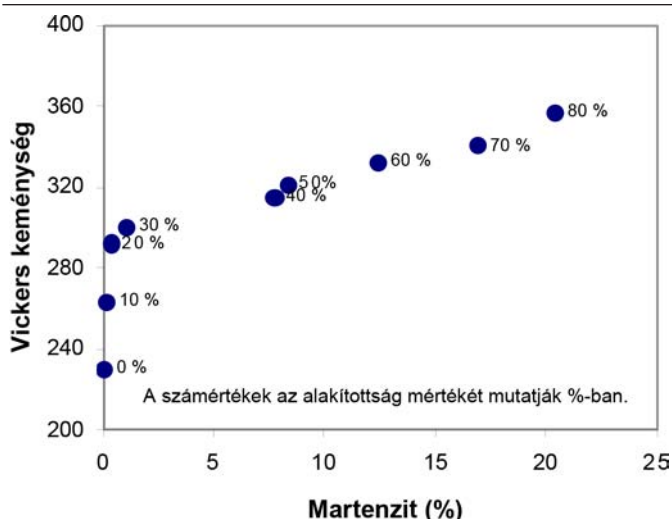
**30. ábra** A telítési polarizáció és az alakítási martenzit fázis mennyiségének kapcsolata.

felhasználásával végzett fázis dekompozíciós eljárással meghatározott  $\alpha'$ -martenzit fázisarány és az előbbiektől független DC magnetométeres mérésekkel, a telítési polarizáció adataiból meghatározott  $\alpha'$ -martenzit fázisarány jó egyezést mutat.

Az 5.1 pontban ismertetett, lean-duplex korrózióálló acélon végzett vizsgálatok eredményei az alábbi publikációkban találhatóak meg [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45].



**31. ábra** Az  $\alpha'$ -martenzit fázis mennyiségének alakulása a képlékeny alakváltozás mértékének függvényében. (DC-magnetométeres mérés alapján.)



**32. ábra A Vickers-keménység változása a martenzit fázis mennyiségének függvényében.**

## 6 Összefoglalás

E cikkben röviden összefoglaltam néhány, a ferromágneses anyagok mágneses viselkedésével kapcsolatos ismeretet. Igyekeztem különös figyelmet fordítani azokra a részekre, amiket a mágnes roncsolásmentes vizsgálatok során ismernünk szükséges, illetve hasznos.

A mágneses méréseken alapuló roncsolásmentes vizsgálati módszerek és metódikák alkalmazásának illusztrálására bemutattam a lean-duplex korrózió-álló acélban képlékeny hidegalakítás hatására történő martenzites fázisátalakulás mágneses tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálatát és a fémtani folyamat anyagszerkezettani hátterének értelmezését.

Természetesen e cikkben nem volt módom a mérési eljárások és vizsgálatok minden részletére kitérni. A mágneses, illetve a mágneses roncsolásmentes vizsgálatokkal kapcsolatos érdeklődés, illetve kérdés esetén a fenti elérhetőségeimen állok rendelkezésre.

## 7. Hivatkozott irodalom

[1] Mészáros István: Egyes anyagszerkezeti és mágneses tulajdonságok kapcsolatának értelmezése, MTA Doktori értekezés, 2014.  
 [2] Tóth László, Serge Crutzen: Roncsolásmentes vizsgálatok, azok megbízhatósága és következményei, Roncsolásmentes Vizsgálati Módszerek, Miskolc – Petten, 1999.  
 [3] D.C. Jiles: Introduction to the principles of materials evaluation, CRC Press, Boca Raton, 2007.  
 [4] M. Augustyniak, Z. Usarek: Finite Element Method Applied in

Electromagnetic NDTE, J Nondestruct Eval (2016) 35:39  
 [5] Verő József: Vas- és fémipari anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó (Budapest) 1951.  
 [6] Gillemot László: Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat, Tankönyvkiadó, Budapest 1988.  
 [7] Mészáros István, Berecz Tibor: Az anyagvizsgálat alapjai című fejezet, Anyagtudomány: Egyetemi tananyag. Pék Lajos (szerk.), Budapest: Typotex Kiadó, 2012. pp. 230-289  
 [8] 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  
 [9] P.Jain, M.Godbole: Review of magnetic hysteresis-based NDE of creep damage in power plant steels, Insight Vol. 54. No3 pp. 1-6.  
 [10] Vértesy 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  
 [11] Varbai Balázs: Erőművi acélok leromlási folyamatainak komplex anyagvizsgálata, Diplomaterv, BME Gépészmérnöki Kar 2013. (Konzulens: Dr. Mészáros István)  
 [12] Stablein, F and Steinitz, R Arch Eisenhüttenw. 8, 549 (1935)  
 [13] Hidasi Béla, Szívós Sándor, Varga László : Mérőberendezés kemény mágnesek jellemzőinek meghatározására, Finommechanika, 11 évf, pp. 280-285  
 [14] E.C. Stoner, E.P. Wohlfarth: Phil. Trans, Royal Soc. (London), Vol. A240, p, 599, 1948.  
 [15] E. C. Stoner, E. P. Wohlfarth, A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys, (reprint), IEEE. Trans. Magn., vol. 27, No. 4, 1991, pp. 3475-3517.  
 [16] D. C. Jiles, D. L. Atherthon, Ferromagnetic hysteresis, IEEE Trans. Magn., vol. 19, 1983, pp. 2183-2185.  
 [17] E. Della Torre, Gy. Kádár, Vector Preisach and Moving Model, J. Appl. Phys., vol. 63, 1988, pp. 3004-3006.  
 [18] C. Ragusa, M. Repetto, Accurate Analysis of Magnetic Devices with Anisotropic Vector Hysteresis, J. Appl. Phys., vol. 275, 2000, pp. 92-98.  
 [19] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, John Wiley and Sons, New York, 1964.  
 [20] R.M. Bozorth: Ferromagnetism, D.Van Nostrand Inc. 1951.  
 [21] M. Ismail, F. Ikhouane, J. Rodellar: The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey, Arch Comput Methods Eng (2009) 16: 161–188  
 [22] C. Serpico, C. Visone: Magnetic hysteresis modeling via feed-forward neural networks, IEEE Trans. Magn., vol. 34, pp. 623–628, May 1998.  
 [23] M. Kuczmann, A. Iványi: A New Neural-Network-Based Scalar Hysteresis Model, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 38, No2, Mach 2002 p.857  
 [24] F. Fiorillo: Measurements and Characterization of Magnetic Materials,

- (Elsevier Pub.Co.) 2004.
- [25] J. Takacs: Mathematics of Hysteresis Phenomena (Wiley-VCH Verlag, Weinheim) 2003.
- [26] J. Takacs: A phenomenological mathematical model of hysteresis, COMPEL Vol. 20 No.4,(2001), pp. 1002-1014.
- [27] B.D. Cullity, C.D. Graham: Introduction to magnetic materials, 2nd ed. IEEE Press, Wiley, 2009, p. 310
- [28] J.M.D. Coey: Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge Univ. Press 2010.
- [29] H. Kronmüller, M. Fähnle: Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids, Cambridge Univ. Press 2003.
- [30] F.D. Stacey, S.K Banerjee: The Physical Principles of Rock Magnetism, Elsevier 1974.
- [31] Kronmüller, H. (1992). Coercivity and domain wall pinning. In Concise Encyclopedia of Magnetic & Superconducting Materials, Evtets, J. (Ed.), Pergamon Press: Oxford, pp. 72–82.
- [32] Kronmüller, H. (1978).Micromagnetism in hard magnetic materials. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 7, 341–350.
- [33] 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
- [34] 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
- [35] M. Liljas, P. Johansson, H.P. Liu, C. Olsson, Development of a lean duplex stainless steel, Steel Research International 79 (2008), 466-473.
- [36] 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.
- [37] 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
- [38] J. Takacs, I. Mészáros: Separation of magnetic phases in alloys, PHYSICA B 403: 3137-3140 (2008)
- [39] 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)
- [40] 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)
- [41] I Mészáros: Magnetic Measurement and Model Based Characterisation of Phase Transformation in Lean Duplex Stainless Steel, MATER SCI FORUM 721: 96-101 (2012)
- [42] I Mészáros: Testing of stainless steel by double yoke DC magnetometer, J ELECTR ENG 61: (7/s) 1-4 (2010)
- [43] 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
- [44] 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)
- [45] S Baldo, M Zanelatto, I Mészáros: Phase transformation in 2101 DSS after cold rolling, In: DUPLEX Stainless Steels 2010: DUPLEX 2010 AIME, 2010. pp. 10



**tripladuplav.hu**

VELÜNK HÁROMSZOR JOBBAN JÁR



**Triplán megbízható társ a webes világban**

- Domain név regisztráció
- Tárhely szolgáltatás
- Internetes alkalmazás fejlesztés
- Honlap készítés
- On-line marketing
- IT biztonság
- Kreatív design

www.tripladuplav.hu **webstúdió**