

### FERROMÁGNESES ANYAGOK RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATA MÁGNESES HISZTERÉZIS ALHURKOK MÉRÉSE ALAPJÁN

### NONDESTRUCTIVE INSPECTION OF FERROMAGNETIC MATERIALS BY MEASUREMENT OF MINOR MAGNETIC HYSTERESIS LOOPS

VÉRTESY GÁBOR

**Kulcsszavak:** *Ferromágneses anyagok roncsolásmentes vizsgálata, Mágneses adaptív teszt, Mágneses hiszterézis hurok*

**Keywords:** *Non-destructive inspection of ferromagnetic materials, Magnetic Adaptive Test, Magnetic hysteresis loop*

#### Összefoglalás

A közelmúltban kifejlesztett, mágneses hiszterézis alhurkok szisztematikus mérésén és kiértékelésén alapuló roncsolásmentes módszer segítségével vizsgáltam különféle anyagokat. Igen jó összefüggést sikerült kimutatni az anyagok szerkezeti degradációja és a mágneses mérésekkel meghatározott paraméterek között. A roncsolásos módszerrel meghatározott jellemzőkkel való összevetés azt valószínűsíti, hogy ez a módszer a jövőben sikeresen alkalmazható ipari körülmények között is a szerkezeti elemek roncsolásmentes vizsgálatára.

#### Abstract

Different specimens were investigated by a recently developed novel, non-destructive method, which is based on the systematic measurement and evaluation of minor magnetic hysteresis loops. Very good correlation was found between these magnetic descriptors and structural degradation of the material. Based on the comparison between magnetic descriptors and conventionally, destructively measured quantities, there is a good chance for the successful application of this method for the non-destructive inspection of components of industrial structures.

#### Bevezetés

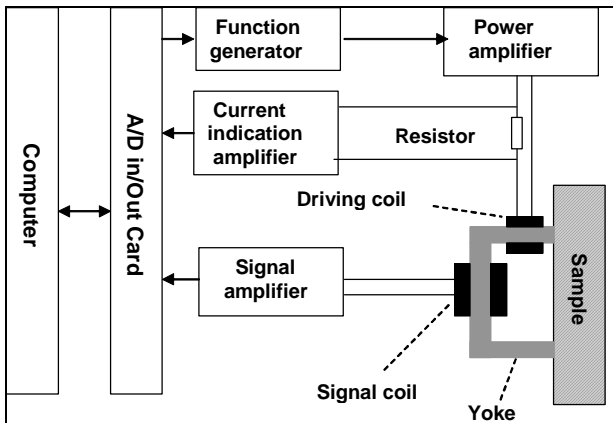
A ferromágneses anyagokban bekövetkező szerkezeti változások (fáradás, megnyúlás, termikus hatások, fázisátalakulások, neutron besugárzás) hatással vannak azok mágneses viselkedésére. Ennek alapján megfelelő módon elvégzett mágneses mérések segítségével nyomon követhetők ezek a folyamatok. A mágneses tulajdonságok vizsgálatának egyik hatékony (de természetesen nem egyetlen) módja az anyag mágneses hiszterézis görbéjének mérése. Számos ilyen

vizsgálati módszert alkalmaznak a gyakorlatban is, ahol szerkezeti anyagok hiszterézis görbéjét közvetlenül mérik, és ebből vonnak le következtéseket azok fáradására, vagy egyéb, az anyag-szerkezetben bekövetkező változásra [1,2]. Ezen módszerek hátránya azonban, hogy egyrészt a roncsolásmentes módon alkalmazott mágneses mérések sokszor csak nehezen valósíthatók meg, különösen, ha nagy méretű, szabálytalan alakú mérendő objektumról van szó, másrészt csupán néhány, a hiszterézis görbéből származtatható paraméter (telítési indukció, koercitív térerősség, kezdő permeabilitás, stb.) mérésére van lehetőség. További hátrány, hogy ezen paraméterek megbízható méréséhez az anyagot mágnesesen telíteni kell, ami a nagy lemágnesezési tényezőből adódó szórt mágneses tér miatt nagyon sok esetben nehéz, vagy lehetetlen.

A jelen munkában egy olyan, az elméleti mágneses hiszterézis modellezésén és számításon alapuló mérés technikát használok, amelynek során a hiszterézis alhurkok sorozatának mérésével határozható meg az anyagtól függő paraméterek. Ez a módszer, amit mágneses adaptív tesztnek nevezünk el (MAT), jól kihasználja a korszerű számítástechnika lehetőségeit, és segítségével sokkal több információ származtatható, mintha csak a hiszterézis hurok néhány kiválasztott paraméterét mérnénk. A MAT lényege, hogy külső mágnesező járom segítségével szisztematikusán, növekvő amplitúdóval mágnesezzük a mérendő mintát, és a mérés során a hiszterézis alhurkokat detektáljuk a mágnesező jármon elhelyezett érzékelő tekercessel. Az adatok feldolgozásával nagy adatbázishoz jutunk, amelyből egy erre a célra fejlesztett szoftver segítségével kiválaszthatók az adott anyagban bekövetkező változásokat legjobban jellemző paraméterek. Az eljárás jelentős előnye még, hogy az anyagot nem kell mágnesesen telíteni: a lemágnesezett állapot környékén mért hiszterézis alhurkok sorozatából is tökéletesen és nagy érzékenységgel jellemezhető az anyag. A módszer részletes leírása a [3,4,5,6]

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet  
1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33.

hivatkozásokban szerepel. Az 1. ábrán látható a mérési elrendezés blokkvázlata.



1. ábra: A mérési elrendezés blokkvázlata.  
Fig. 1. Block-scheme of the measurement setup.

A jelen munkában a módszer segítségével, különféle mintákon elvégzett mérések eredményét foglalom össze. A kiértékelés során a MAT paramétereket hasonlítottam össze az ugyanazon mintán, független, roncsolásos módon mért paraméterekkel.

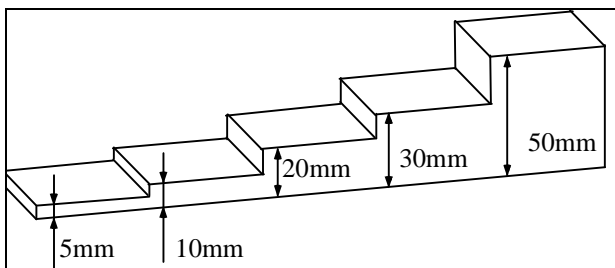
### Öntöttvas minták mérése

Megfelelő formába történő öntéssel négy, speciális, lépcső alakú minta készült. A minták alakja és a lépcsők vastagsága a 2. ábrán látható, míg a kémiai összetételük az 1. táblázat.

1. táblázat: Az öntöttvas minták kémiai összetétele (súlyszázalékban)

Table 1. Chemical composition of cast-iron

Minta	C	Si	Mn	P	S	Mg
1	3,05	2,041	0,166	0,049	0,016	0,024
4	3,58	2,606	0,140	0,068	0,016	0,032
5	3,46	2,575	0,128	0,066	0,015	0,025
6	3,43	2,568	0,141	0,070	0,016	0,022

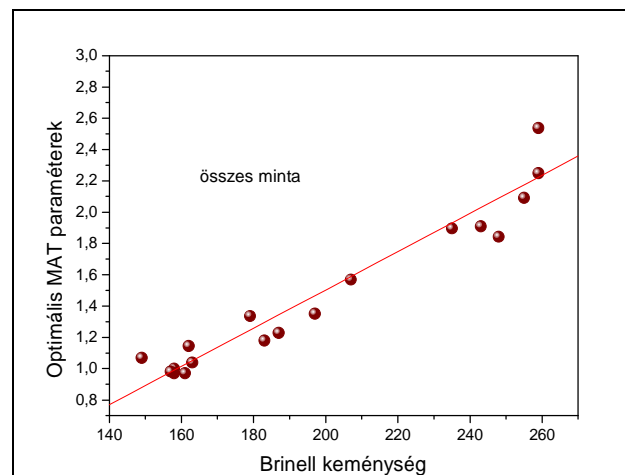


2. ábra: A lépcső alakú öntöttvas minták  
Fig. 2. Step block specimens of cast irons

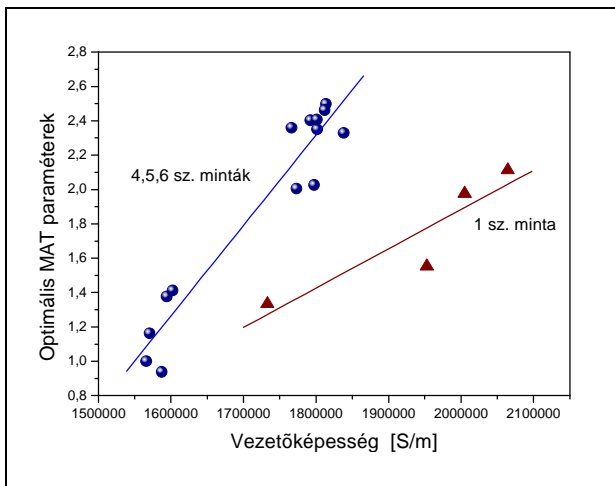
A különböző vastagságú lépcsőkben az olvadt vas eltérő idő alatt hűl le, emiatt a szerkezete is különbözik. Metallurgiai vizsgálatok igazolták, hogy a különféle vastagságú lépcsők szerkezete jelentős mértékben különbözik egymástól (perlit, ferrit

arány, grafit szemcsék nagysága, stb.). Mind a négy minta mindegyik lépcsőjén végeztem mágneses méréseket a MAT módszerrel. Az ily módon kapott eredményeket összehasonlítottam a független laborban elvégzett keménység (Brinell) és elektromos vezetőképesség mérések eredményével. Megjegyzendő, és ez az alábbiakban bemutatott többi mérésre is vonatkozik, hogy a MAT eljárás során mindig ki kell választani a kapott adathalmazból azokat a paramétereket, amelyek az adott független paraméter (pl. keménység) változását a legnagyobb érzékenységgel, de ugyanakkor a legjobb reprodukálhatósággal írják le. Ez a folyamat pl. az [5]-ös hivatkozásban részletesen le van írva. A továbbiakban az ily módon meghatározott jellemzőt, mint optimális MAT paramétert fogom említeni.

A 3. és 4. ábra mutatja a mérések eredményét. Baloldalon az összes lépcsőn mért adat szerepel a Brinell keménység függvényében. Látható, hogy az adatok kis szórással egy egyenes mentén helyezkednek el. A jobboldali ábrán, ahol a vezetőképesség függvényében szerepelnek a MAT paraméterek, kétféle függés különíthető el. A 4., 5. és 6. sz. mintákon mért értékek egy egyenes mentén fekszenek, míg az 1. sz. minta esetén ettől jelentősen eltérő meredekséget kapunk. A különbség a kémiai összetétel alapján értelmezhető: a 4., 5., 6. sz. minták összetétele nagyon közel van egymáshoz, míg az 1. minta markánsan különbözik a többi mintától. Ez okozza a vezetőképességben mért nagyobb értékeket, amik jól követhetők a mágneses mérésekkel is.



3. ábra: Az öntöttvas mintákon mért optimális MAT paraméterek a keménység függvényében  
Fig. 3. Optimal MAT parameters as functions of hardness, measured on cast iron



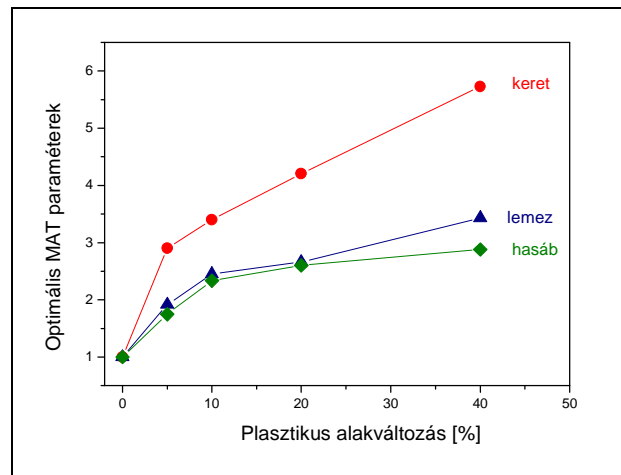
**4. ábra:** Az öntöttvas mintákon mért optimális MAT paraméterek a vezetőképesség függvényében

**Fig. 4.** Optimal MAT parameters as functions of conductivity, measured on cast iron

### Szénacél minták mérése

Alacsony széntartalmú acél (0.16 % szenet, 0.20 % szilíciumot és 0.44 % mangánt tartalmazó) mintasorozatot készítettünk el és vizsgáltunk. Az anyagot hideghengerlés segítségével plasztikusan deformáltuk ( $\varepsilon = 0, 5, 10, 20$  és 40%), majd az ily módon deformált acélból megfelelő alakú darabokat vágunk ki. Három különböző alakú mintát, keret formáját, lemezt, illetve hasábót készítettünk. Valamennyi hasáb egyik oldalán egy "V" alakú bemetszést alakítottunk ki, amely az ún. Charpy teszt elvégzését teszi lehetővé. Elvégeztük a Charpy tesztet, valamint Vickers keménységet is mértünk valamennyi mintán. Ezek azok a jelenlegi szabványok szerinti ipari módszerek, amelyekkel az anyagok degradációja jellemezhető. Transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatokat is végeztünk, ami kimutatta a mikroszerkezet változását: a diszlokáció sűrűség  $10^9$ -ről  $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  értékre nőtt meg a hengerlés hatására, ami megfelel a deformált anyag mechanikai és mágneses keményedése során megfigyelt és elvárt értéknek.

A mérések eredménye azt mutatja, hogy a minta alakjától függetlenül a MAT mérések során meghatározott optimális mágneses jellemző (MAT paraméter) és a plasztikus deformáció között jól kimutatható kapcsolat van. Ezt a mérési eredményt mutatja az 5. ábra. Az ábra alapján levonható fontos következtetés, hogy a minta alakja, és az, hogy mágnesesen nyitott vagy zárt kört mérünk, kvalitatíve nem befolyásolja a kapott eredményt, vagyis az anyag degradációja és a mért mágneses jellemző közötti összefüggést, ami a jövőbeni ipari alkalmazást nagymértékben elősegíti.

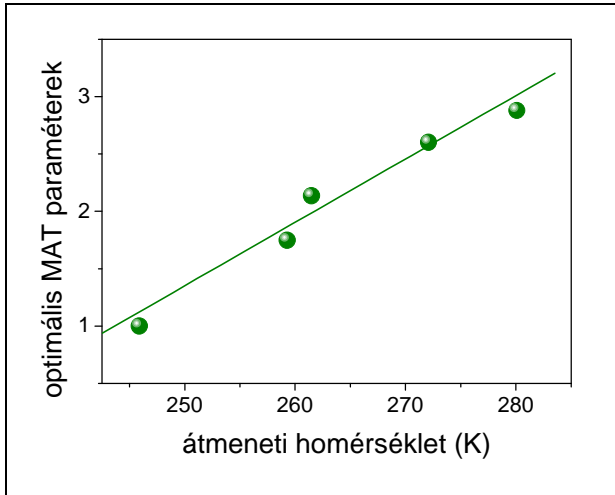


**5. ábra:** Optimalizált MAT paraméterek a plasztikus alakváltozás függvényében hideghengerléssel alakított különböző alakú szénacél minták esetében

**Fig. 5** Optimal MAT parameters as functions of plastic deformation, measured on different shape cold rolled low carbon steel samples

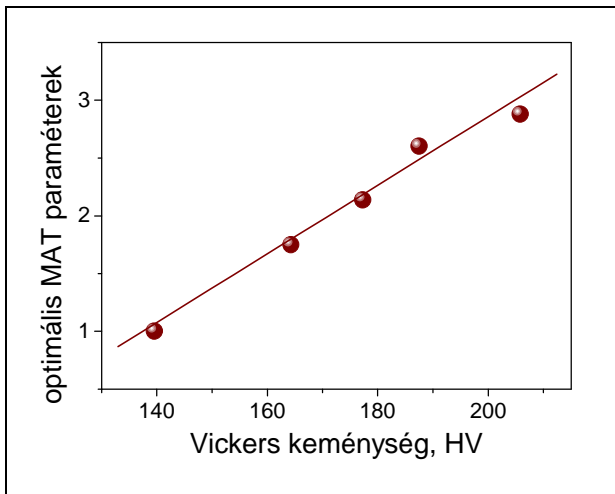
A roncsolásmentesen mért mágneses MAT paraméterek és a hagyományosan, roncsolásos módon meghatározott Vickers keménység, valamint az átmeneti hőmérséklet közötti kapcsolatot is vizsgáltam. Egyértelmű, nagyon szabályos, lineáris kapcsolatot mutattam ki a MAT paraméterek, és ezen, előbb említett jellemzők között, a mérési pontok kis szórása mellett. A mérések legfontosabb eredményei láthatók a 6. és 7. ábrákon. Ennek alapján biztosan állítható, hogy a vizsgált anyagokban bekövetkező mechanikai degradációra közvetlen, kvantitatív adatot tudunk szolgáltatni roncsolásmentes méréssel, ha a mérést először egy ismert mintasorozaton elvégzett méréssel kalibráljuk, és az ismeretlen mintán végzett mérést ezzel a referencia adattal vetjük össze.

Említést érdemel még az a körülmény, hogy míg a vizsgált mintasorozat esetén az átmeneti hőmérsékletben mintegy 20%, és a Vickers keménységben mintegy 50%-os változás következett be, a mágneses jellemzők mintegy 270%-al változtak, még a legkedvezőtlenebb esetben is (hasáb alakú minta). Vagyis a mágneses mérés segítségével a bekövetkező szerkezeti változások jóval nagyobb érzékenységgel mutathatók ki, mint a roncsolásos mérések segítségével.



**6. ábra:** A szénacél mintákon mért MAT paraméterek az átmeneti hőmérséklet függvényében

**Fig. 6.** Optimal MAT parameters as functions of transition temperature, measured on cold rolled low carbon steel



**7. ábra:** A szénacél mintákon mért MAT paraméterek a Vickers keménység függvényében

**Fig. 7.** Optimal MAT parameters as functions of Vickers hardness, measured on cold rolled low carbon steel

## Rozsdamentes acél minták mérése

### 18/8 típusú ausztenites acél

Lemez formájú, 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákat (a minták kémiai összetétele a 2. táblázatban van feltüntetve) 1100 C°-os hőkezelésnek vetettük alá, majd a mintákat vízfürdőben edzettük. Ezután hideghengerléssel különböző mértékben alakítottuk őket. Az anyag az eredeti ferromágneses fázisból fokozatosan rész-

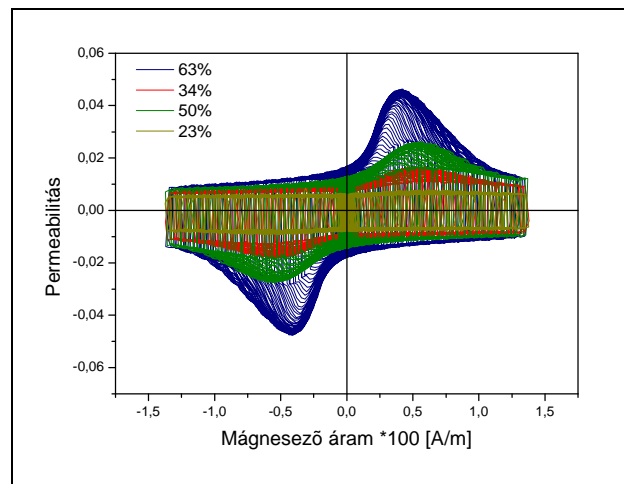
ben ferromágnesessé vált, mert a ferrit tartalom változik a hengerlés mértékének függvényében.

**2. táblázat:** A 18/8 típusú ausztenites acél minták kémiai összetétele (súlyszázalékban)

**Table 2.** Chemical composition of 18/8 stainless steel

C	Mn	Si	Cr	Ni
0.08	1.49	0.95	17.97	8.36
Mo	Ti	P	S	Fe
0.32	0.75	0.036	0.027	Maradék

A 8. ábrán jól látható, hogy a növekvő ferrit tartalom milyen jól tükröződik a mért jelalakban. Az ábrán négy különböző módon hengerelt mintán mért jel látható. Minél erősebb a minta deformációja, annál nagyobb a ferromágneses fázis aránya, és annál nagyobb a mérhető permeabilitás. Az ábra egyúttal illusztrálja is a mérési folyamatot, jól láthatók a különböző alhurkokon, folyamatosan növekvő mágnesező térrel detektált jelek.



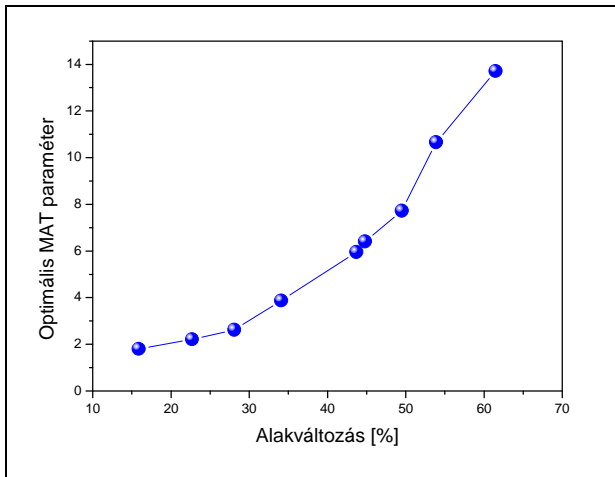
**8. ábra:** Az érzékelő tekercs jele a mágnesező áram függvényében négy különböző mértékben hengerelt minta esetén.

**Fig. 8.** Signal of pick-up coil obtained on four different cold rolled stainless steel samples

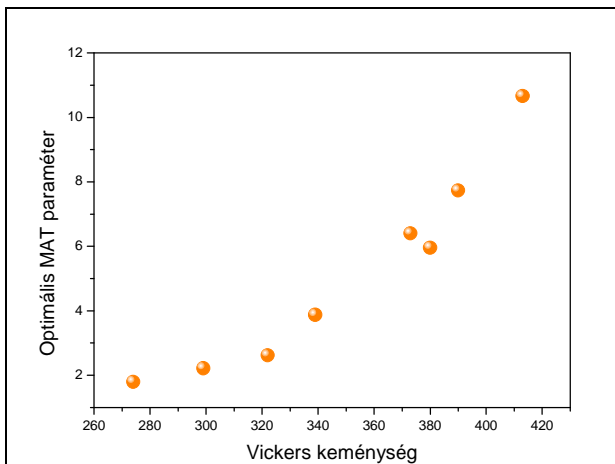
A 9. ábrán látható az optimális MAT paraméterek függése az alakváltozástól. 60%-os alakváltozás a mágneses jellemzők mintegy 14-szeres változását okozza, ugyanakkor a Vickers keménységben ez csak 55% növekedést jelent, amint az a 10. ábrán látható. Vagyis a plasztikus deformáció hatására kialakuló ferromágneses fázis jelenlétét igen jó érzékenységgel lehet ilyen módon detektálni, és a mérési pontok szórása is kicsi. Néhány százalékos ferrit tartalom vagy ferrit tartalom változás is kimutatható a mérési hibahatáron belül.

## SUS316L típusú rozsdamentes acél

500x100 mm<sup>2</sup> méretű SUS316L típusú lemezeket húzógépből húzófeszültség hatásának tettünk ki, ami különböző mértékű maradó alakváltozást okozott az anyagban. Az anyag összetételét a 3. táblázat mutatja.



**9. ábra:** 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákon mért MAT paraméterek az alakváltozás függvényében  
**Fig. 9.** Optimal MAT parameters as functions of plastic deformation, measured on 18/8 satinless steel



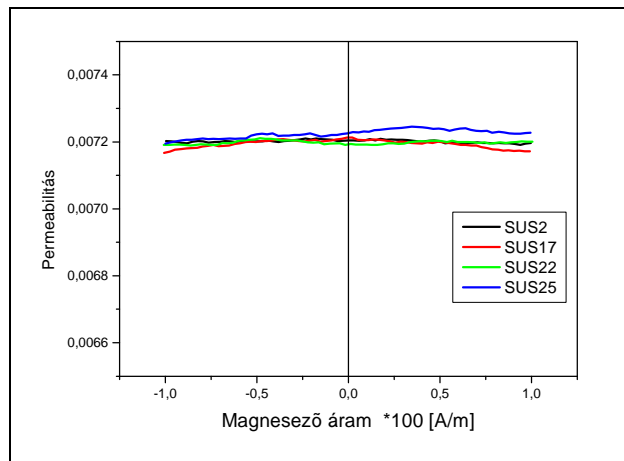
**10. ábra:** 18/8 típusú, titánnal stabilizált ausztenites acél mintákon mért MAT paraméterek a Vickers keménység függvényében  
**Fig. 10.** Optimal MAT parameters as functions of Vickers hardness, measured on 18/8 stainless steel

**3. táblázat:** A SUS316L rozsdamentes acél minták kémiai összetétele (súlyszázalékban)

**Table 2.** Chemical composition of SUS316L stainless steel

C	Si	Mn	P	S
0.03	1.00	2.00	0.045	0.030
Ni	Cr	Mo	Ti	Fe
15.00	18.00	3.00	-	Maradék

Nyúlásmérő bélyeggel mértük az alakváltozást. Az eredeti lemezből kivágott 100x70 mm<sup>2</sup>-es lemezekon történt a MAT paraméterek mérése. A mérést mind a húzás irányába eső mágnesező térrel, mind pedig az arra merőleges irányban is elvégeztem. Ezek a minták, ellentétben az előzőekben tárgyalt hengerelt 18/8 típusú rozsdamentes acél mintákkal, nagyon gyengén ferromágnesesek. Ez jól látszik a 11. ábrán, ahol az érzékelő tekercs jele (ami a minta permeabilitásával arányos) van feltüntetve négy különbözőképpen húzott minta esetén a mágnesező tér függvényében.



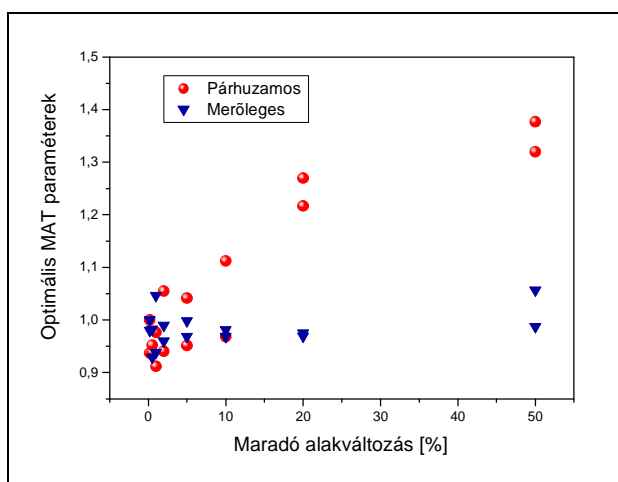
**11. ábra:** Az érzékelő tekercs jele a mágnesező áram függvényében négy különböző mértékben húzott SUS316L minta esetén.

**Fig. 11.** Signal of pick-up coil obtained on four different tensile stressed SUS316L stainless steel samples

A 8. ábrával összehasonlítva egyértelmű a különbség. Ennek megfelelően a mért adatokból származtatható permeabilitás mátrix elemek nem értékelhetők. (A fent tárgyalt esetekben általában az optimális MAT paraméterek a permeabilitás mátrix alapján lettek meghatározva.) Viszont a permeabilitás adatok mágneses tér mentén történő integrálásával kapott MAT paraméterek (amik a mágneses hiszterézist írják le) meglepően szabályos változást mutatnak a mintában kialakuló maradó alakváltozás függvényében. A 12. ábrán láthatók az ily módon meghatározott optimális MAT paraméterek, mégpedig mind a húzási irányban, mind pedig az arra merőleges irányban

mérve. A mérés hibahatárát messze meghaladó, monoton változás tapasztalható. (Minden alakváltozást egymástól független két-két mintán hoztunk létre.) A legnagyobb, 50%-os alakváltozást elszenvedett minták MAT paraméterei mintegy 40%-al nagyobbak a legkisebb, 0,2%-os alakváltozást elszenvedett mintákhoz képest.

Figyelemre méltó, hogy nagy különbség tapasztalható a húzási irány függvényében. Változás csak a húzási irányba eső mégnesezés esetén mutatható ki, vagyis a minták erős anizotrópiát mutatnak, ami szintén jól látható a 12. ábrán.



**12. ábra:** MAT paraméterek az alakváltozás függvényében SUS316L mintákon mérve, a húzási irányára merőleges, ill. párhuzamos mágnesezési irányokban mérve.

**Fig. 12.** Optimal MAT parameters as functions of residual strain, measured on SUS316L satinless steel, for parallel and perpendicular orientations of magnetizing field with respect to the direction of tensile stress

### Következtetések

A sokféle mintán elvégzett mérések eredményét összegezve megállapítható, hogy az általunk bevezetett új, mágneses hiszterézis mérésen alapuló módszer jó eredményeket ad, segítségével nagy érzékenységgel és megbízhatóan jellemezhetők a ferromágneses anyagokban bekövetkező szerkezeti változások. Valamennyi anyag esetén,

ahol rendelkezésre álltak ilyen adatok, igen jó egyezést mutatható ki a hagyományos módon, roncsolással végzett mérések eredménye, valamint a roncsolásmentesen elvégzett mágneses mérések eredménye között.

Figyelemre méltó, hogy a mágneses alhurkok mérésének megfelelő kiértékelésével kapott optimális mágneses jellemző az alkalmazott mágneses tér olyan értékeinél adódott, ami messze van az anyag mágneses telítettségétől. A gyakorlatban sűrűn előforduló, nagy méretű szerkezeteken végzendő mérések esetén ez igen fontos körülmény, mert ezek a mintadarabok mágnesesen nem telíthetők.

Megítélésem szerint ezért jó esély van arra, hogy a ferromágneses anyagból készült szerkezeti anyagok rendszeres megbízhatósági ellenőrzését, maradék élettartam becslését roncsolásmentesen végezhető mágneses mérésekkel végezzük el. A módszer sikeres jövőbeli alkalmazásához először természetesen hagyományos, roncsolásos mérésekre van szükség, amely alapján a MAT mérések "taníthatók". Ezen tanulási folyamat alatt kell meghatározni azokat a MAT paramétereket, amelyek a legjobban jellemzik az illető anyag degradációját, és amelyek a jövőbeli mérésekben a legérzékenyebbek és legmegbízhatóbbnak minősülnek.

### Irodalom

- [1] H. Kronmüller, Int. J. Nondestruct. Testing, **3** (1972) 315.
- [2] C.C.H. Lo, F. Tang, D.C. Jiles, S.B. Biner, IEEE Trans. Mag., **35** (1999) 3977.
- [3] I. Tomáš, J.Magn.Magn.Mater. **268** (2004) 178.
- [4] I. Tomáš, O. Stupakov, J. Kadlecova, O. Perevertov, J.Mag.Mag.Mater. **304** (2006) 168.
- [5] G. Vértesy, I. Tomáš, I. Mészáros, J. Magn. Magn. Mater. **310** (2007) 76.
- [6] Vértesy Gábor, Ivan Tomáš, Anyagvizsgálók Lapja, **13**. (2003) 61.

