

Rezgőmintás magnetométeres mérések az anyagvizsgálatban

Dr. Mészáros István, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia

Tanszék, 1111 Budapest, Goldmann tér 3., E-mail: meszaros@eik.bme.hu

Rövid tartalom

A cikk röviden áttekinti a rezgőmintás magnetométerek (VSM) működésének elvét és bemutatja alkalmazhatóságát az anyagvizsgálatban. Kifejlesztettünk egy új magnetométer típust, ami kiválóan alkalmas szerkezeti acél ill. lágy és keménymágneses anyagok mágnesezési görbéinek mérésére. Magnetométerünk konstrukciója révén illeszkedik a mérnöki gyakorlatban előforduló minta alakokhoz és méretekhez. A kifejlesztett és megépített magnetométer alapvetően különbözik a hagyományos ún. Foner-féle magnetométerektől, ugyanis e mérési elrendezésben a minta a szokásostól eltérő módon a mágneses tér erővonalával párhuzamosan rezeg. Megkülönböztetésül magnetométer elrendezésünket PMVSM-nek neveztük. A készülékben vizsgálandó minta egy rezgő, mintatartó rúd végén található mintatartóban foglal helyet. Ez az elrendezés lehetővé teszi az 1-400 mg tömegű ferromágneses minták gyors és pontos mérését. A PMVSM berendezés méreténél és alkalmazhatóságánál fogva fontos eszköze lehet a szerkezeti anyagok mágneses vizsgálataival foglalkozó laboratóriumoknak és oktatási intézményeknek. A PMVSM berendezés anyagvizsgálati alkalmazhatóságát két alkalmazási példán keresztül mutatjuk be.

1. Elméleti háttér

Az első rezgőmintás magnetométert (VSM) S. Foner fejlesztette ki az 1950-es években [1]. A VSM méréstechnika, más fejlett eljárások mellett, alapvető és széleskörűen használt vizsgálati eljárássá vált a mágneses tulajdonságok és anyagok kutatásában [2]. A VSM berendezések rendkívül sokoldalúan használhatóak, alkalmasak lehetnek erősen eltérő tulajdonságú mágneses anyagok mérésére, beleértve a ferro-, ferrimágneses anyagokat is. Ezek a népszerű és univerzális VSM berendezések a minta mágneses momentumát mérik a külső, gerjesztő tér függvényében. A VSM legfontosabb előnyei a relatíve kis mintaméret és a nagy alkalmazható gerjesztő tér, ami lehetővé teszi a mágneses telítés elérését. Mivel a VSM mérés ún. nyílt mágneskörös elrendezés, ezért a mintán belül ébredő mágneses térerősség kiszámításához figyelembe kell venni a minta saját mágneses teréből származó ún. lemágnesezési korrekciót.

A VSM magnetométerek további fontos előnye, hogy mód van a minta elforgatására a külső mágneses térben, és így módot adnak a mágneses tulajdonságok irányfüggésének vizsgálatára, ami lehetővé teszi a mágneses anizotrópia mérését. Számos magnetométer fel van szerelve a minta hűtését ill. fűtését szolgáló termosztáttal, ami lehetővé teszi a mágneses tulajdonságok hőmérséklet függésének vizsgálatát.

A VSM magnetométer működésének elve, hogy minden mágneses térbe helyezett anyagban mágneses momentum indukálódik (P_s), ami arányos a minta mágneses szuszceptibilitásának (κ) és a külső mágneses térerősségnek (H) a szorzatával (1).

$$P_s = M V = \kappa H V \quad (1)$$

Ahol: V a minta térfogata.

Természetesen, a ferro- ill. ferrimágneses anyagok esetén a szuszceptibilitás a térerősség függvényében nemlineárisan változik.

Ha a minta szinuszos rezgőmozgást végez és a közelében egy vagy több detektor tekercs van elhelyezve, ezekben szintén szinuszos feszültség indukálódik. Ez az indukált feszültség arányos a minta mágneses momentumával, a rezgés amplitúdójával és frekvenciájával. Megfelelően kialakított referencia tekercs alkalmazásával a frekvenciától és az amplitúdótól függetlenné tehető a mért jel és így a berendezés egyszerűen kalibrálhatóvá válik egy ismert mágneses momentumú minta segítségével.

Ha a minta szinuszos rezgőmozgást végez (ω) körfrekvenciával és (A) amplitúdóval, a detektor tekercsben indukálódó feszültség a következőképpen számítható:

$$U_s = k_s \omega A \exp(i\omega t) P_s \quad (2)$$

Ahol: k_s a tekercs geometriájától függő konstans, P_s a minta mágneses momentuma. Ha egy permanens mágnest rögzítünk a mintatartó rúdra, ami együtt rezeg a mintával, akkor az általa a referencia tekercsben indukált feszültséget az előbbihez hasonló módon írhatjuk fel (3).

$$U_{Ref} = k_{Ref} \omega A \exp(i\omega t) P_{Ref} \quad (3)$$

Ahol: k_{Ref} a tekercs geometriájától függő konstans, P_{Ref} a referencia mágnes mágneses momentuma. A két tekercs időjelének négyzetes középértékét (RMS) képezve, ezek hányadosa felírható a következő formában (3).

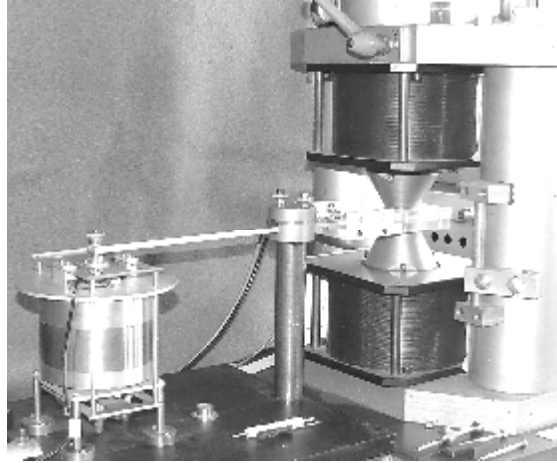
$$\begin{aligned} U_{Out} &= \langle U_s \rangle_{RMS} / \langle U_{Ref} \rangle_{RMS} = K \cdot P_s \\ U_{Out} &= K \cdot V \cdot M_s \end{aligned} \quad (4)$$

Ahol: K a VSM berendezés kalibrációs tényezője, ami tartalmazza a k_{Ref} , k_s és M_{Ref} tényezőket. V a minta térfogata, M_s pedig a mágnesszettsége.

Mivel, U_s és U_{Ref} azonos módon függenek az ω és az A tényezőktől, U_{Out} , azaz a VSM kimenő feszültsége független a mintarezgetés frekvenciájától és amplitúdójától. Látható továbbá, hogy U_{Out} egyenesen arányos a minta mágneses momentumával ill. mágnesszettségével.

2. PMVSM mérőkészülék

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszékén kifejlesztettünk és megépítettünk egy új rezgőmintás magnetométer típust. Ez a berendezés kialakításában alapvetően különbözik a hagyományos, azaz Foner-féle készülékektől. Ennél az elrendezésnél ugyanis a minta a mágneses tér erővonalával párhuzamosan rezeg. Ez a kialakítás, egyebek mellett, az alábbi előnyökkel rendelkezik; nagyobb érzékenység, gyorsabb mintacsere és pozicionálás továbbá egyszerűbb detektortekercs elrendezés. Mivel a minta rezgőmozgása egy erővonal mentén történik ezért kisebb térfogatban szükséges csak biztosítani homogén mágneses teret, ami kisebb pólusátmérőt így kisebb teljesítményfelvételt is eredményez.



1. ábra A PMVSM berendezés rezgető egysége, rezgő mintatartó rúdja és elektromágnese.

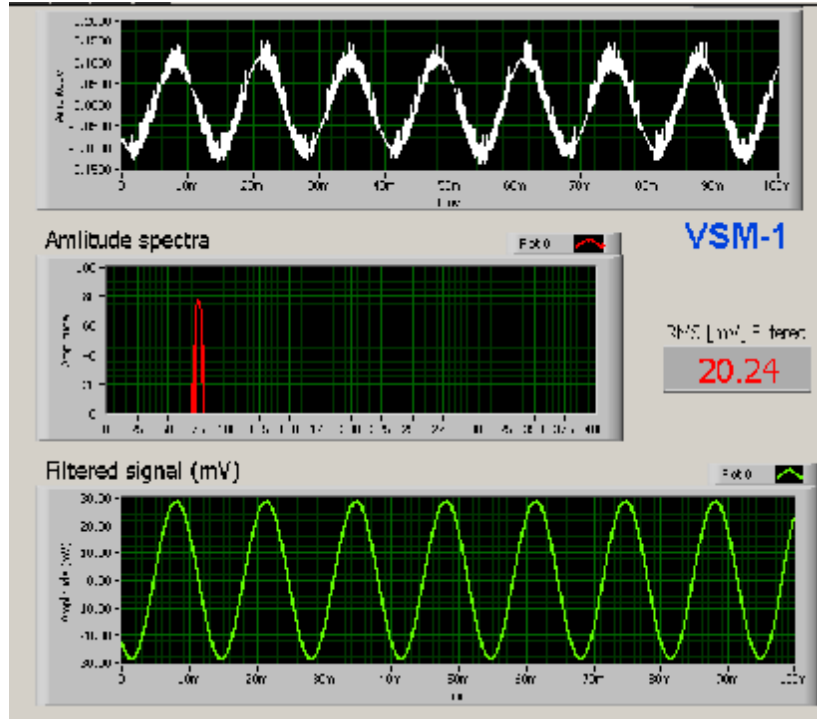
A rezgető rendszer tartalmaz egy elektromágneses vibrátort, ami függőleges irányban szinuszos rezgésre kényszeríti a vízszintesen elhelyezkedő rúd végét (1. ábra). A rezgő rúd kiváló rugalmassági tulajdonságú, kiválóan nemesített, alumínium ötvözetből készült. A rúd közepe rögzített, alul-felül éleken támaszkodik, az elektromágnes pólusai között található végén helyezkedik el a mintatartó. E konstrukció következtében a minta, függőleges irányú rezgőmozgását a gerjesztő mágneses tér erővonaljaival párhuzamosan végzi. A rezgetés 75 Hz frekvenciájú szinuszos gerjesztéssel történik. A rezgető frekvencia megválasztása úgy történt, hogy a rúd alapmódban rezegjen és elkerüljük a rúd ill. más szerkezeti elemek rezonancia frekvenciáját, továbbá a hálózati frekvencia egészszámú többszöröseit. A gerjesztő teret előállító elektromágnes egy feszültségvezérelt áramgenerátor hajtja meg. Ennek vezérlése a gerjesztő áramot egyenletes lépésekben változtatja, az egyes lépések között 2-5 másodpercet várakozva a tranzienst folyamatok lecsengésére. A teljes hiszterézis görbe felvételének ideje változtatható, szokásos esetekben 2-60 percet vesz igénybe.

A gerjesztő teret létrehozó, függőleges elrendezésű, elektromágnes számítógép vezérelt bipoláris feszültségvezérelt áramgenerátor hajtja meg DC árammal. A legnagyobb elérhető gerjesztő tér $1,4 \cdot 10^6$ A/m, amit a pólusok közé beépített Hall szenzor segítségével mérünk.

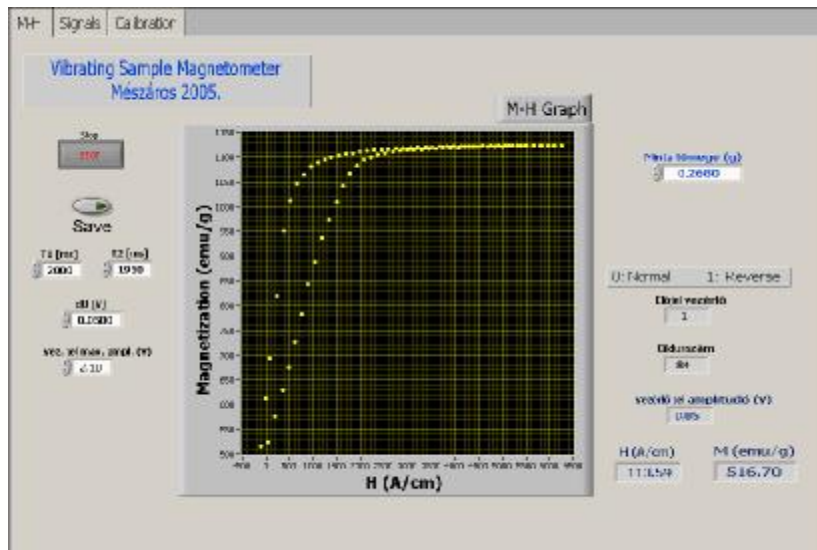
A megépített rezgőmintás magnetométer számos szolgáltatást nyújt. Egyebek mellett alkalmas a minta lemágnesezésére, továbbá a rendszer kalibrációjára, jól használható grafikus kezelőfelülettel rendelkezik és módot ad a mért adatsorok mentésére.

A detektor tekercs pár, a kúpos kiképzésű pólusbetétek felületének közepén található. A referencia mágnes a rezgőrúdhoz van beépítve, olyan távolságban az elektromágnes pólusaitól, hogy a közöttük lévő kölcsönhatás elhanyagolható legyen. A detektor és a referencia tekercsek jelei egy, két csatornás kiszájt mérőerősítőt követően egy 16 bit felbontású adatgyűjtő kártya két bemeneti csatornájára kerülnek. A mérés teljes vezérlését és kiértékelését egy LabView környezetben készített alkalmazás végzi (2/a és 2/b. ábrák). A minta tömegének (ill. térfogatának) és lemágnesezési tényezőjének figyelembe vételével az $M(H)$ ill. a $B(H)$ görbék felvehetőek.

A VSM berendezéseknél megszokottól eltérő módon a PMVSM nem tartalmaz hardware lock-in erősítőt. A fáziszékeny detektor funkciót szoftveresen valósítottuk meg. A szoftver lock-in modul kiválasztja a legnagyobb amplitúdójú szinuszos komponenst a detektor tekercs jeléből a 75 Hz-es alap-harmonikus $\pm 0,1$ Hz-es környezetéből. Ez az eljárás tökéletesen megfelelőnek bizonyult az 1 mg-nál nagyobb tömegű ferromágneses minták esetén (2/a. ábra).



2/a. ábra A PMVSM berendezés LabView vezérlőpaneljének képernyőképe. Felül a detektor tekercsben indukálódó feszültségjel, alul a zajszűrés után kapott 75 Hz frekvenciájú szinuszos jel látható.



2/b. ábra A PMVSM berendezés LabView vezérlőpaneljének képernyőképe. A diagramon, a mérés során meghatározott mágnesezettség (M) – mágneses térerősség (H) adatpontokat láthatjuk.

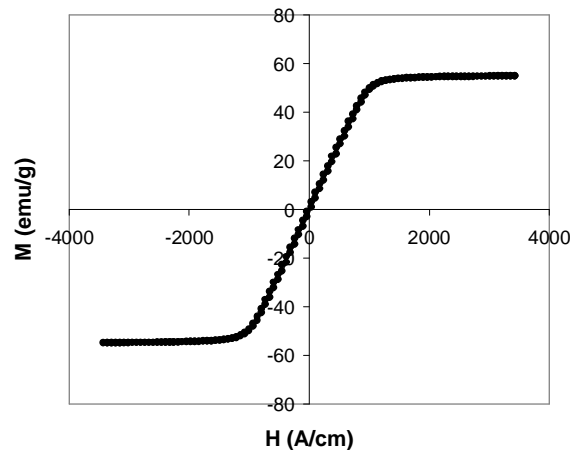
PMVSM berendezésünk főként a mérnöki gyakorlatban előforduló mérési feladatokhoz készült. A mintacsere és beállítás gyors, reprodukálhatósága jó, működése stabil, érzékenysége tökéletesen megfelelő a feladatokhoz. A PMVSM berendezést sikeresen alkalmaztuk lágy- és keménymágneses ill. szerkezeti acélok mágneses tulajdonságainak, beleértve a mágneses

anizotrópiát is, tanulmányozására. A berendezés, egyebek mellett, kiválóan alkalmas a szerkezeti- ill. erőművi acélokban, alakítás, hőkezelés továbbá valamilyen tönkremeneteli folyamat (fárasztás, hőfárasztás, kúszás stb.) hatására történő szövet ill. diszlokációs szerkezeti változások detektálására, továbbá egyes fázisátalakulási folyamatok nyomon követésére. A vizsgált minták, jellegükből adódóan, viszonylag nagyméretűek (jellemzően 50-300 mg) és ferro- vagy ferrimágneses tulajdonságúak. A jelenlegi kiépítésben a PMVSM berendezés csak szobahőmérsékletű mérések végzését teszi lehetővé.

Az alkalmazott konstrukció legfontosabb előnyei a következők. Mivel a minta a gerjesztő mágneses tér erővonalával párhuzamosan rezeg, ezért a detektor tekercspárban indukálódó feszültség relatíve nagy, ami jó jel/zaj viszonyt eredményez. Másrészt az alkalmazott mágneses tér homogenitásával kapcsolatban sokkal enyhébb igényeket kell támasztanunk. A mintatartó rúd beállítása gyors, tehát a minta pozicionálás egyszerű és kevés időt vesz igénybe. A mintaméret és geometria széles tartományban változtatható. A minta, megfelelő geometria esetén, elforgatható a mintatartóban így mód van a mágneses tulajdonságok irányfüggésének, azaz a mágneses anizotrópia tanulmányozására.

3. Kalibráció és rendszeradatok

A PMVSM berendezés kalibrálása egy 221 mg tömegű nikkell gömb segítségével történt. A tiszta nikkell fajlagos telítési mágnesezettsége jól ismert, az irodalmi adatok alapján 54,9 emu/g [3]. A kalibrációs etalonként használt nikkell minta mágnesezési görbét mutatja a 3. ábra.



3. ábra A PMVSM kalibrálásához használt nikkell gömb mért mágnesezési görbéje.

A mintán belül ébredő mágneses tér a (4) összefüggés szerint számítható.

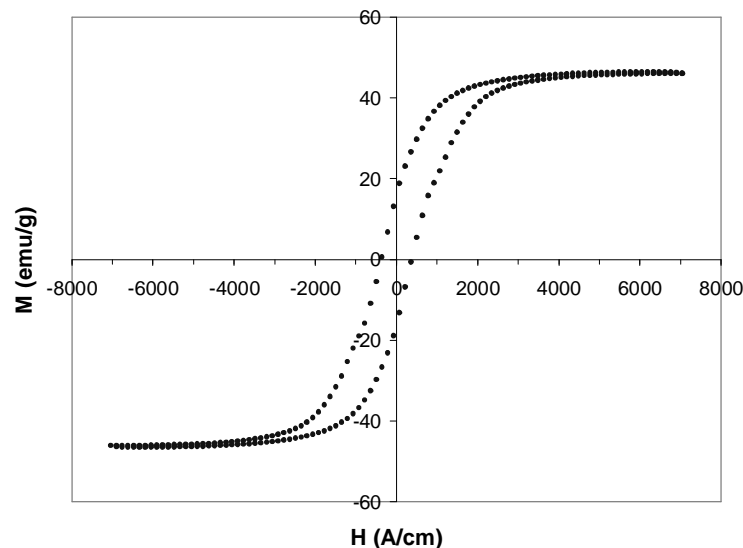
$$H_{\text{Belső}} = H_{\text{Külső}} - D \cdot M \quad (4)$$

Ahol: $H_{\text{Belső}}$ a mintán belül létrejövő mágneses térerő, $H_{\text{Külső}}$ az alkalmazott külső tér, D a minta lemágnesezési tényezője, M a mágnesezettsége.

A mágnesezési görbék felvétele a külső tér 2 másodpercenkénti léptetésével történt. A mérés során a mágneses kör ill. a detektor tekercsek révén kialakuló tranziensek lecsengésére 1950 ms-ot váratkozik a rendszer majd 50 ms alatt végrehajtja a mérést. A detektor ill. referencia tekercsek jelének mérése 100 kHz mintavételi frekvencia mellett 40 ezer mérési pont

felvételével történt. A rezgetési frekvencia 75 Hz volt, ami a rezgőrúd alpmódusban való rezgését eredményezte.

A PMVSM berendezés tulajdonságait több mintán, több mérési sorozatban körültekintően tanulmányoztuk. A legfontosabb rendszer adatokat összefoglaljuk az alábbiakban. Az M és H mérésének pontossága jobb, mint $\pm 1\%$, a mérések reprodukálhatósága $\pm 0.5\%$. A készülék érzékenysége $8,5 \times 10^{-4}$ emu-nak adódott, ami a Foner-féle magnetométerekhez képest nem kimagasló, azonban a szerkezeti acél ill. keménymágneses minták vizsgálatához tökéletesen megfelelőnek bizonyult (4. ábra).



4. ábra Alnico mágnes PMVSM segítségével felvett histerézis görbéje.

4. A hőfárasztási folyamat által létrehozott mágneses anizotrópia mérése

Vizsgálatainkat 15Mo3 típusú acélon végeztük, amelyet gyakran alkalmaznak erőművi kazánok túlhevítő csövei alapanyagául. Az alapanyag hőkezelése két lépésben történt. Az első lépésben 920°C hőmérsékleten 50 perces hőntartást követően levegőn hűlt, majd a második lépésben 720°C hőmérsékleten 90 perces hőkezelést kapott, majd levegőn hűlt. Az eredeti rúdanyagból hőfárasztó próbatesteket munkáltunk ki amelyeknek vizsgálati része 53 mm hosszúságú, 5 mm átmérőjű henger. A próbatestek végein a hőfárasztó berendezésben való rögzítéshez szükséges fejek találhatóak (5. ábra).

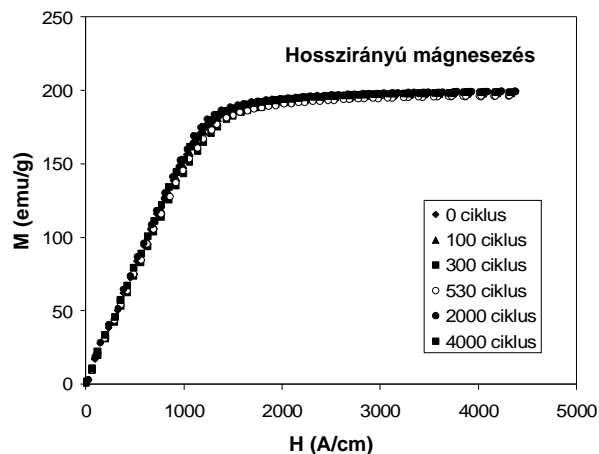
A hőfárasztó vizsgálat során, a végeiken rögzített minták periodikus felfűtése és lehűtése történt. A hőmérséklet ciklusok hozzávetőlegesen 8 másodpercesek voltak. A mintákat a rajtuk keresztülvezetett áram Joule hője fűtötte. Amikor a minta közepén mért hőmérséklet az 550°C -ot elérte a fűtés leállt és ezzel egyidőben a mintákat hideg folyóvíz gyorsan lehűtötte.



5. ábra Hőfárasztott próbatest és a középső részéből kimunkált kocka alakú minta.

A vizsgált minták 0, 100, 300, 530, 1000, 2000, 4000 fázisátviteli ciklusnak lettek kitéve. A legnagyobb alkalmazott ciklusszám esetén a minta az alkalmazás szempontjából teljesen tönkrementnek tekinthető. Felületén jól látható repedések találhatók és középső részének átmérője számottevően megnövekedett, azaz hordósodott. A hőfázisátvitelt követően a próbatestek középső részéből 3 mm élhosszúságú kocka alakú mintákat munkáltunk ki a mágneses vizsgálatokhoz (5. ábra).

A kocka alakú minták $M(H)$ mágnesesítési görbéit mértük a PMVSM segítségével. A méréseket a hőfázisátviteli próbatest hosszirányában és arra merőleges, azaz keresztirányban végeztük el. A mintákat minden mérés előtt azonos módon lemágnesesítettük. A mérések során a legnagyobb alkalmazott gerjesztő mágneses tér 4500 A/cm volt, ami elegendő a vizsgált anyag telítésig való mágnesesítéséhez.

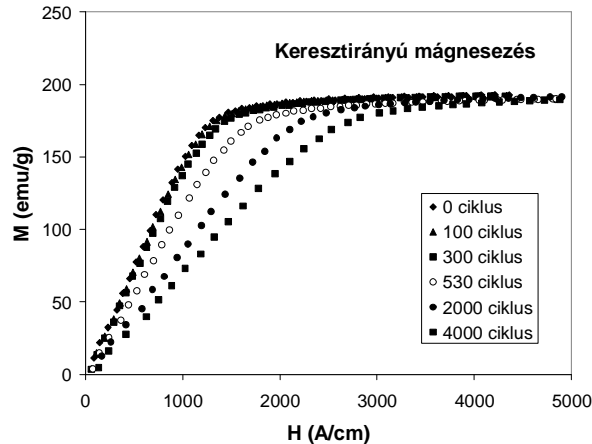


6. ábra A hőfázisátviteli próbatestből kimunkált kocka alakú minták hosszirányú mágnesesítésével kapott mágnesesítési görbék.

Amint az a 6. ábrán látható hosszirányú mágnesezés esetén, a ciklusszámtól függetlenül, lényegében mindig azonos mágnesesítési görbét mértünk.

Keresztirányú mágnesezés esetén (7. ábra) azonban jól látható módon változtak a mért mágnesesítési görbék. A hőfázisátviteli ciklusok számának növekedése csökkentette az $M(H)$ görbék meredekségét. Azaz keresztirányú mérés esetén a kezdeti permeabilitás jelentősen csökken a ciklusszám növekedésével. Az $M(H)$ görbék alakjának megváltozása az indukált mágneses anizotrópia létrejöttét mutatja. Az eredetileg izotrópnak tekinthető szerkezeti acélban a hőfázisátviteli igénybevétel olyan szerkezeti változásokat okozott, ami az indukált mágneses anizotrópiát hozott létre. A legnagyobb anizotrópia állandót a 4000 hőfázisátviteli ciklusnak kitétt mintán kaptuk, értéke $5,8 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3$ -nek adódott.

A kapott eredménynek rendkívül fontos következményei vannak az erőművi szerkezeti acélok tönkremeneteli folyamatainak vizsgálata során.



7. ábra A hőfárasztó próbatestből kimunkált kocka alakú minták keresztirányú mágnesezésével kapott mágnesezési görbék.

Láthatjuk ugyanis, hogy potenciálisan azok a mágneses vizsgálati eljárások lehetnek érzékenyek a hőfáradási folyamat által okozott szerkezeti változásokra, amelyek az igénybevétel során alkalmazott mechanikai feszültség irányára merőleges irányban képesek mérni a mágneses jellemzőket. Megállapíthatjuk továbbá, hogy a szerkezeti változásokat érzékenyen ki tudjuk mutatni az anizotrópia energia ill. az anizotrópia állandó meghatározásával. Ez az eredmény felhasználható az eróművi szerkezeti acélok maradék élettartamának meghatározása során.

5. Ferromágneses fázisarány meghatározása

Az ötvözetekben lévő rendezett mágneses szerkezetű, azaz ferro- vagy ferrimágneses tulajdonságú fázisok (a továbbiakban: mágnesezhető fázisok) relatív mennyiségének meghatározására többféle vizsgálatot alkalmazhatunk. A legismertebb, fázisarány mérésére is alkalmas vizsgálati eljárások a következők:

- Metallográfiai vizsgálat
- Visszaszórt elektron diffrakció (EBSD)
- Mössbauer-spektroszkópia
- Röntgen diffrakció
- Telítési mágnesezettség mérése
- Permeabilitás mérése

A leggyakrabban használt eljárás az ötvözetek fázisarányának mérésére a hagyományos metallográfiai vizsgálat.

Napjainkban elérhetővé váltak olyan, nagysebességű adatgyűjtésre alkalmas, a kisszögű visszaszórt elektronok diffrakcióját felhasználó (EBSD) berendezések, amelyek alkalmasak akár több tízezer képpontból álló fázistérképek gyors felvételére is.

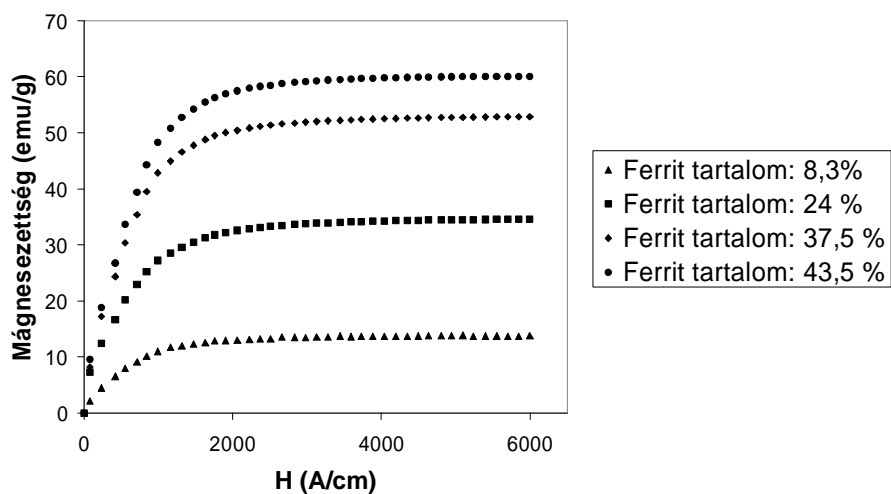
A kétdimenziós képalkotó vizsgálatok (metallográfia, EBSD) alkalmazása során figyelemmel kell lennünk arra, hogy a fázisarány meghatározásához, elméletileg, három egymásra merőleges csiszolatot kell készítenünk a vizsgálandó anyagból [3]. Ez különösen fontos, ha a minta szemcséi alakítottak.

A röntgen diffrakciós spektrumok kiértékelése információt ad a vizsgált ötvözetben lévő, eltérő kristályrácsú fázisok mennyiségére vonatkozóan. A mintában lévő maradó feszültségek és textúra azonban nagymértékben befolyásolhatja a mért eredményt.

A Mössbauer-spektroszkópia az ún. mágneses vonalfelhasadás jelensége révén szintén alkalmas a ferro- és paramágneses fázisok relatív mennyiségének mérésére ötvözetekben.

A ferro- ill. ferrimágneses fázisok relatív mennyiségét több mágneses mennyiség mérésének segítségével is meghatározhatjuk. A gyakorlatban elterjedtek azok a mérőkészülékek, amelyek a vizsgált minta permeabilitását (többnyire kezdeti permeabilitását) mérik. Léteznek alacsony, hálózati frekvencián működő, nyílt mágneskört tartalmazó berendezések ill. kHz nagyságrendű frekvencián üzemelő, örvényáramú mérőműszerek. A gyakorlat számára ezek a többnyire hordozható kivitelű eszközök sokszor rendkívül hasznosak. Figyelemmel kell azonban lenni arra a tényre, hogy a $B(H)$ mágnesezési görbe origóban vett meredeksége, azaz a kezdeti permeabilitás csak közelítőleg arányos a mágnesezhető fázis(ok) relatív mennyiségével. Ennek megfelelően a pontos mérés érdekében minden vizsgált anyagtípus esetén a megfelelő etalon segítségével szükséges kalibrálni a mérőkészüléket. Tehát minden vizsgált ötvözetből szükséges, hogy rendelkezésre álljanak kalibrációs etalonok, lehetőleg a vizsgálthoz közeli összetétellel.

Ismert, hogy a ferro- ill. ferrimágneses fázis mennyiségével arányos az ún. telítési mágnesezettség értéke. A telítési mágnesezettség állandó hőmérsékleten csak a térfogat egységenkénti Bohr-magnetonok számától függ. Azonban a szerkezeti acélok telítésig történő mágnesezése relatíve nagy gerjesztő mágneses teret (5.000 – 12.000 A/cm) igényel. Ilyen nagyságú mágneses teret csak megfelelő kialakítású vizsgáló elektromágnes légrésében tudunk létrehozni. A megépített PMVSM berendezésünk alkalmas minden a műszaki gyakorlatban használt acél ötvözet telítésig mágnesezésére. Így a telítési mágnesezettség és a mágnesezhető fázisok térfogatarányának pontos mérésére. Ez egyebek mellett módot ad pontos kalibrációs etalonok készítésére bármely ötvözetből.



8. ábra *Hőkezelt, duplex korrózióálló acélból készült minták PMVSM mérőkészülékkel felvett mágnesezési görbéi és meghatározott ferrit tartalmuk.*

Illusztrációként a 8. ábrán láthatunk néhány mérési eredményt, amit eltérő hőmérsékletű, izokronikus hőkezelésnek alávetett, SAF 2507 típusú, duplex, azaz döntően ferrit és ausztenit fázisokat tartalmazó, korrózióálló acélon mértünk a PMVSM berendezésünk segítségével. Jól látható, hogy a minták telítési mágnesezettsége jelentősen változott. Az alkalmazott hőkezelés a ferromágneses tulajdonságú ferrit fázis bomlását eredményezte paramágneses tulajdonságú, ún. szekunder ausztenit ill. szigma fázisokra, így a kiindulási ferrit tartalom (43,5 %) a hőkezelés hatására 8,3 %-ra csökkent.

6. Összefoglalás

Új konstrukciójú, elsősorban műszaki és anyagvizsgálati célú, rezgőmintás magnetométert (PMVSM) fejlesztettünk ki, amiben a minta a szokásostól eltérő módon a gerjesztő mágneses tér erővonalával párhuzamosan rezeg. Magnetométerünk rendkívül jól használhatónak és hasznosnak bizonyult számos mérnöki ill. anyagvizsgálati feladat és kutatás során. Cikkünkben a hőfárasztó igénybevétel által létrehozott mágneses anizotrópia mérésének és az SAF 2507 duplex korrózióálló acélban, hőkezelés hatására, megváltozó ferrit tartalom példáján mutattuk be a PMVSM magnetométer gyakorlati alkalmazhatóságát. A PMVSM magnetométer azonban számos egyéb műszaki területen is sikeresen alkalmazható. A teljesség igénye nélkül említünk további néhány lehetséges alkalmazási területet: lágy- és keménymágneses anyagok vizsgálata, képlékeny alakítás ill. hőkezelés hatására történő fázisátalakulási folyamatok nyomon követése, ötvözetekben a ferro- ill. ferrimágneses fázis mennyiségének mérésére.

Hivatkozások

1. **S. Foner**: Rev. Sci. Instrum, 1959, Vol. 30, p. 548-557.
2. **J. Dobránszky – P. J. Szabó**: Mat. Sci. Forum, 2003, Vol. 414-415, pp. 189-194.
3. **C.D. Graham Jr.**: J. Appl. Phys, 1982, Vol. 53, p. 2032-2034.
4. **Gácsi Zoltán (szerk)**: Sztereológia és képelemzés, egyetemi tankönyv, Well-PRess Kiadó, 2001.

Ezt a kutatási munkát az OTKA K62466 számú pályázata támogatta.