

Debreceni Egyetem
Természettudományi és Technológiai Kar
Szilárdtest Fizika Tanszék

Barkhausen-zaj vizsgálata FINEMET típusú fémüveg szalagon

TDK Dolgozat

Írta: Molnár Zsolt, villamosmérnök hallgató

Témavezetők: Dr. Beke Dezső, egyetemi tanár
Dr. Daróczy Lajos, adjunktus

Debrecen 2011

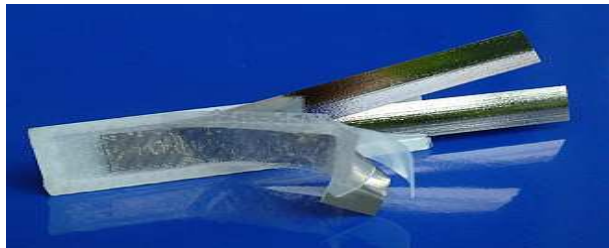
Tartalomjegyzék

<u>1. A Fémüvegek</u>	3
1.1 A fémüvegek tulajdonságai és előállítása	3
<u>2. FINEMET típusú anyagok</u>	5
2.1 A FINEMET típusú anyagok előállítása és tulajdonságai.....	5
<u>3. A Barkhausen zaj mérése</u>	7
3.1 Doménszerkezet, dománfal mozgás.....	7
3.2 Diszkrét lépések	8
3.3 Önhasonló jelenségek.....	8
3.4 A mérési metodika	9
3.5 A Barkhausen-zaj ipari alkalmazása	10
3.6 A Barkhausen- zaj laboratóriumi méréstechnikája	11
<u>4. Mérések, eredmények</u>	14
4.1 Az háttéranyagként szolgáló elmélet áttekintése.....	14
4.2 Az mágnesezési görbe megismerése	15
4.3 Az elméleti modell	18
4.4 A vizsgált paraméterek.....	21
4.5 Az önszerveződő rendszerekre jellemző eloszlási görbe jellege.....	22
<u>5. Eredmények</u>	23
5.1 Tapasztalataink:.....	23
5.2 A Fe(Si) kísérleti eredménye.....	26
5.3 További célok	27
<u>6. Összefoglalás</u>	29
<u>7. Irodalom:</u>	30
<u>8. Melléklet:</u>	32

1. A Fémüvegek

1.1 A fémüvegek tulajdonságai és előállítása

Az első fémüveget 1960-ban egy $(\text{Au}_{75}\text{Si}_{25})$ összetételű ötvözetből a California Institute of Technology Egyetemen állították elő [1]. A nevével ellentétben, a fémüveg nem átlátszó, egyedül az anyag belső szerkezete hasonlít az üveg szerkezetére. Különleges tulajdonságaik miatt fémüvegek felhasználási területe roppant sokrétű. Külön ki kell emelni a ferromágneses fémüvegeket, amelyek kiemelkedően jó lágymágneses tulajdonságokkal rendelkeznek és ezért az elektronikai iparban egyre szélesebb körben kerülnek alkalmazásra.



1. ábra: A fémüveg szalag

A fémüvegeket fémolvadékból meglehetősen gyors hűtéssel ($1 \text{ K/s} - 10^5 \text{ K/s}$) állítják elő, mely során az atomoknak nincs idejük megtalálni egyensúlyi helyzetüket ezáltal nem tud kikristályosodni az anyag. A hagyományos technológia során a fémolvadékot egy gyorsan forgó hengerre lövik fel, mely során közvetlenül felhasználható formájú fémüveg szalag keletkezik.

A fémüvegeket ötvözetekből állítják elő. Speciális összetételeknél nem szükséges a korábbi igen gyors lehűtési sebességet sem elérni. Az eljárással néhány milliméter vastagságú fémlapot vagy rudat állítanak elő, melyet tömbös fémüvegnek is neveznek. Ma már a lantán, magnézium, cirkónium, palládium, vas, réz és titán ötvözetekkel az 1 K/s -tól a 100 K/s -ig terjedő lehűtési sebességekkel is elő tudnak állítani fémüvegeket.

A fémüvegek egyik előnyös tulajdonsága a szuper lágymágneses viselkedés. Továbbá jobban ellenállnak a mechanikai hatásoknak, deformálódásnak, amorf szerkezetük miatt a folyáshatáruk igen magas lehet. Keményebbek és mégsem oly ridegek, mint a szilikátos üvegek vagy kerámiák.

Napjainkban is számos kutatás folyik az újabb fémüvegek előállítására. Az egyik legújabb eredmény: A Kaliforniai Műszaki Egyetem kutatócsoportja által kifejlesztett új fémüveg kevésbé kemény, de éppolyan erős, mint az elnyúlhatatlan Gorilla üveg [2], melyet többek között magasabb árkategóriás telefonok kijelzőjeként is egyre gyakrabban láthatunk. Ez azonban csupán egy, a speciális célokra alkalmazott területek közül. A fémüvegek egyik legfontosabb felhasználási területe az induktív elektronikai elemek maganyagaként való alkalmazása.

2. FINEMET típusú anyagok

2.1 A FINEMET típusú anyagok előállítása és tulajdonságai

Az amorf fém mátrixú nanokompozitok vizsgálata elterjedt kutatási téma a 90-es évek óta. Az eredmények pedig kedvezőek mind kristályos szerkezetű, mind amorf anyagokban kristályos részecskéket tartalmazó mágneses anyagok vizsgálata során.

Az eddigi kutatások jelentősen a lágy mágneses anyagokra terjedtek ki, hiszen ott értek el nagyobb eredményeket. A Hitachi Metal CO. szakemberei két évtizeddel ezelőtt számoltak be az eddigieknél kedvezőbb mágneses tulajdonságokkal rendelkező nióbium és réz ötvözőelemeket is tartalmazó amorf Fe-Si-B szalag részleges átkristályosított változatáról, melyet FINEMET névre kereszteltek és hoztak kereskedelmi forgalomba. A szó eredetét a FINE (finom) és a METAL (fém) szavakból tevődik össze utalva ezzel az anyag meglehetősen egyedi mivoltára, mint a kiváló lágymágneses tulajdonságok és a finom kristályos szemcsék. Előállításuk többféle módon készülhet. Folyékony fázisból történő gyors megszilárdulással, porlasztásos technikával vagy plazmából párologtatással, ám ezek közül nem minden gyártási technológia alkalmazható, ha megfelelő lágymágneses tulajdonságú fémüveget szeretnénk gyártani [3].

Megfelelő lágymágneses tulajdonságokkal rendelkező nanokompozitot akkor tudunk létrehozni, ha a Fe az amorf állapotból térben középpontos kockarács szerkezetben kristályosodik ki, még azelőtt, hogy intermetalikus fázisok jöhetnének létre [4]. Lágymágneses fémüvegek átkristályosítása során gyakran mikroszerkezetű szemcsék, illetve kristályos szerkezet jöhet létre, mely kevésbé jó lágymágneses tulajdonságokat eredményez. Mindezen hiba kivédése állandó hőmérsékletű hőkezeléssel és rézzel való ötvözéssel lehetséges, mely során elősegítjük a vas tércentrált köbös szerkezetének kialakulását. Ezzel a technikával készülnek a nanokristályos-amorf kompozitok is 500-600°C közötti hőkezelési technológiával.

A hőkezelés eredményeként egy kiváló lágymágneses tulajdonságokkal rendelkező, a teljes térfogat 20%-át kitevő tércentrált köbös szerkezetű Fe-Si nanoszemcséket tartalmazó, amorf-kristályos nanokompozit kapható: A nanokristályos fémüvegkompozitok mágnesezési görbéjét viszonylag magas telítési indukció (B_s), rendkívül kis koercitív térerősség (H_c) és remanens indukció (B_r) és kiemelkedően magas permeabilitásértékek (μ_r) jellemzi.[5]. Ez utóbbi akár 10^7

nagyságrendő is lehet, ami a ma ismert legnagyobb értékeknek felel meg. Amint az a felsorolt jellemzőkből is látható, ezek az anyagok igen alacsony hiszterézisveszteséggel rendelkeznek. Ehhez alacsony magnetostrikció és kiváló hőmérsékleti stabilitás társul, ami az induktív elektronikai elemek készítésére rendkívül alkalmassá teszi őket.

Mivel a fémüvegek eleve kis vastagságú (0.02mm) szalag formájában kerülnek előállításra, ezért belőlük tekercselési technológiával gazdaságosan gyárthatók vasmagok. A kis szalagvastagság miatt ezekben az örvényveszteség is igen alacsony értékű. Az ilyen magok vasvesztesége tehát kis frekvenciákon rendkívül kicsi és még magasabb frekvenciákon is elfogadható értékű.

A gyártástechnológiában reléket, készítenek belőlük külföldön, valamint hazánkban is a MAGNETECH Hungaria Kft.-ben.

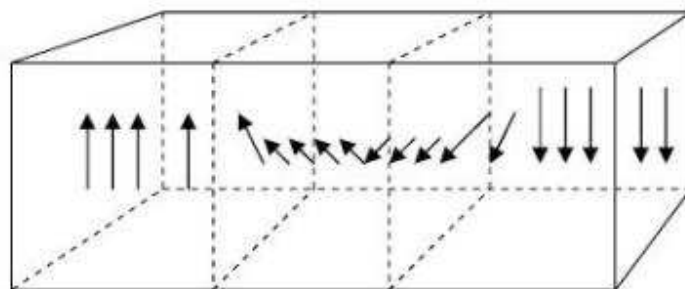
3. A Barkhausen zaj mérése

3.1 Doménszerkezet, doménfal mozgás

A Barkhausen effektus tárgyalása előtt röviden kitérek annak okára hogy miért keletkezik doménszerkezet. A domének a magnetosztatikai energia (kiszórt saját mágneses térrel kölcsönhat az eredő mágnesezettségű minta) csökkentése érdekében keletkeznek. [6, 7] Több ellentétes domén jelenlétében jelentősen csökken ez az energia. A közben keletkező doménfalak többletenergiáját pedig a kicserélődési kölcsönhatásból származó energia és az anizotrópia energia tagok ellentétes hatásainak kompromisszumainak eredménye adja. Ennek megfelelően a domén falak vastagságát is ez szabja meg: $\delta \sim (J/K)^{1/2}$ [8]. ahol J a kicserélődési kölcsönhatást, K az anizotrópia energiát jellemző parameter Végeredményben 50-1000 atomsornyi vastagságú doménfalak is létre jöhetnek. Nagy anizotrópia esetén a doménfal keskeny, míg kis anizotrópia esetén nagyobb szélességű lesz. A doménfal (egységnyi hosszra jutó) energiája pedig arányos $(JK)^{1/2}$ -vel .

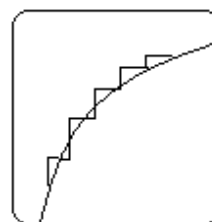
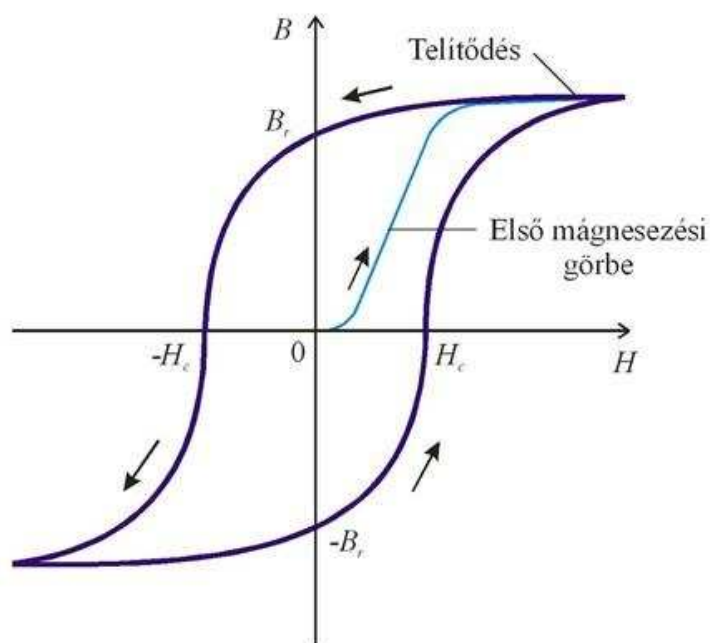
Az anyag átmágnesezése során a külső tér hatására a térrel egyező irányú vagy azzal csak kis szöget bezáró mágneses domének válnak energetikailag kedvezővé. Ezen domének területe a külső tér iránnyal nagy szöget bezáró domének területének rovására növekszik. Ebben a folyamatban a doménfal mozgások játszanak domináns szerepet. A domének, doménfalak mozgásához energia szükséges.

Reális anyagban a mágnetrostrikciónak (deformáció hatására változik a könnyű mágnesezési irány, azaz K értéke) illetve a szerkezeti hibáknak (diszlokációknak, zárványoknak) köszönhetően megfigyelhetők lokálisan eltérő könnyű irányok, melyek akadályozzák a doménfalak elmozdulását (az energia függ K-tól). Így a mágnesezési folyamat során, a doménfalak nem folyamatosan, hanem szakaszosan mozognak és energiavesztéssel jár. A doménfalak szakaszos mozgása közben, mintát körülvevő detektor tekercsben, a doménfal szakaszos elmozdulása közben fellépő ugrásokhoz tartozó indukció változások következtében kis, különálló feszültségjelek indukálódnak. Ezt nevezik Barkhausen zajnak (ha a detektor tekercsből jövő jeleket egy hangszóróra vezetjük pattogó zajt hallunk).



2. ábra: A domének és az őket határoló doménfal

3.2 Diszkrét lépések



A folytonosnak látszó görbék alaposabban vizsgálva láthatók, hogy felhasadnak diszkrét lépésekre.

3. ábra: Histerézis görbe telítési irányai és az első mágnesezési görbe.

3.3 Önhasonló jelenségek

Az előzőekben említett diszkrét lépések lavinaszerű jelenségek formájában lépnek fel. A véletlenszerűen egymást követő jelek önhasonlóak (önszerveződő kritikusság), azaz fraktál jellegűek [11].

Ez azt jelenti, hogy ha pl. a fenti feszültségjeleket egy oszcilloszkóp segítségével vizsgáljuk, akkor az idő tengelyt több lépésben kinyújtva - több nagyságrend tartományban – nem lehet látható különbséget tenni a jelek véletlenszerű előfordulásait tekintve. A fenti tulajdonság azt jelenti, hogy ha a jelek bizonyos x adatának (pl. jel magasság, időtartam, terület, stb.) a gyakoriságát (adott intervallumba eső jelek száma per az összes jel), $P(x)$ felrajzoljuk x függvényében akkor egy

$$P(x) \sim x^{-\beta} \exp(-x/x_0), \quad (1)$$

összefüggést kapunk, ahol β a kritikus exponens és x_0 az u.n. levágási sugár. [12-15]

A Barkhausen jelenségek vizsgálatakor azt is megfigyelték, hogy a fenti szakaszos doménfal mozgáshoz tartozó jelek legintenzívebben a koercitív térerősség, H_c , környéken figyelhetők meg, a mágnesezési görbe könyökei körül jóval kisebb zajt lehet tapasztalni és eredete is valószínűleg más (pl. doménfal mozgások helyett domén forgások történnek). Így érthető, hogy eddig elsősorban a legintenzívebb zajt adó mágnesezési szakaszon vizsgálták a zaj tulajdonságait és azt is gyakran kiátlagolva, azaz az egy (negatív telítéstől pozitív telítésig tartó) mágnesezési ciklusra véve. Ez igaz akkor is, ha a fenti összefüggést tekintjük, azaz a kapott kinetikus exponensek értékeit zömmel a H_c környékén zajló folyamatok szabták meg.

3.4 A mérési metodika

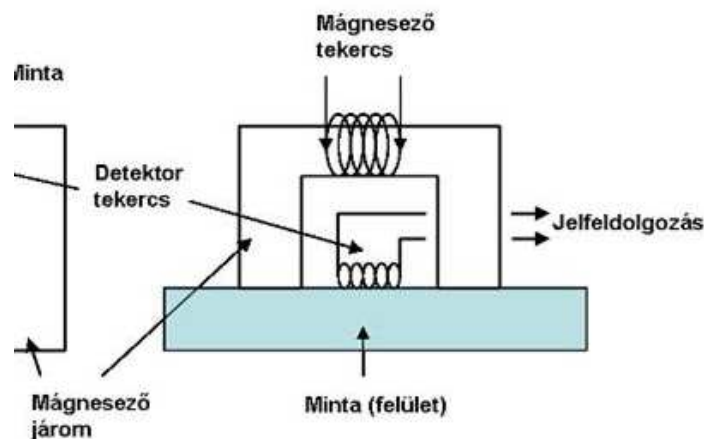
Dolgozatomban éppen azt vizsgálom, hogy ha a mágnesezési görbét egy adott ΔB szélességű ablakkal (ezen belül a középpontjához tartozó B érték körül) gerjesztve és az ablakot a negatív telítéstől a pozitív telítésig lépésenként elcsúsztatva vizsgálom a jelek tulajdonságait, akkor milyen eredményeket kapunk. Ilyen vizsgálatot eddig még fémüveg ferromágneses anyagon nem végeztek és csak egyetlen hasonló közlemény van erre polikristályos Fe(Si) ötvözetben [16]. Az ilyen mérések kivitelezésében van még egy fontos szempont: a B értékét csak külső gerjesztő tekercsben keltett H értékével lehet változtatni. Ugyanakkora zaj jellege valójában a dB/dt értéktől függ, és nem dH/dt -től. Tehát ki kellett dolgoznom egy olyan eljárást, amely biztosítja, hogy a fenti vizsgálatot konstans dB/dt végezhessem el a mágnesezési görbe minden pontján. A doménfalak mozgását a mágneses anyagban lévő hibahelyek erősen befolyásolják [8, 9].

Ebből a szempontból hibának minősül minden olyan dolog, amely az ideális kristálystruktúrától való eltérést eredményez, így pl. az anyag mechanikai feszültségi állapota is jelentős hatással van a doménfalak mozgására és ezáltal a Barkhausen zajra is.

A Barkhausen zajmérés legfontosabb ipari alkalmazása éppen ezen alapul, segítségével roncsolásmentes eljárással kaphatunk információt a ferromágneses (acél) szerkezeti elemek feszültségi állapotáról.

3.5 A Barkhausen-zaj ipari alkalmazása

Az ipari alkalmazások gyors, egyszerűen alkalmazható és interpretálható mérési módszereket kívánnak meg. A leggyakrabban az alábbi ábrán látható mérőfejet alkalmazzák viszonylag magas frekvenciájú 10-100Hz-es gerjesztőtér mellett. A nagy gerjesztőfrekvencia miatt a zajintenzitás is viszonylag magas, ipari körülmények között is jól detektálható. Ugyanakkor az egyedi Barkhausen ugrásokat az ipari készülékek nem képesek detektálni, csak a zaj valamilyen átlagértékét (leggyakrabban az RMS értéket használják). Mindazonáltal megfelelő kalibráció után a zaj átlagértékéből is fontos információkat lehet nyerni az anyag feszültségi állapotáról.



4. ábra: Az ipari mérési technika modellje



A roncsolásmentes Barkhausen-zaj ipari alkalmazásmódja, mely nélkülözhetetlen anyagvizsgálati módszer a Paksi atomerőmű acéltartályánál, illetve a vasúti sínek letétele és állapota is ellenőrzés alatt tartható segítségével.

5. ábra: A Barkhausen-zaj ipari alkalmazásának megvalósítása

3.6 A Barkhausen- zaj laboratóriumi mérés technikája

A modern zajanalízisen alapuló-jelenleg még csak laboratóriumban alkalmazott- mérési módszerek jelentősen eltérnek az előbb említett ipari technikától.

Ebben az esetben alapkövetelmény, hogy az egyedi doménfalugrásokat, lavinákat külön-külön is tudjuk érzékelni. Ez csak az ipari berendezésekben megszokottól lényegesen alacsonyabb (mHz nagyságrendű) gerjesztő frekvenciák mellett lehetséges. Az alacsony gerjesztési sebesség miatt a zaj jelszintje igen alacsony, ezért a mérés az erősítőkkel és a rendszer árnyékolásával szemben fokozott követelményeket támaszt.

A gyakorlatban vizsgálatink folyamán a következő hardveres berendezéseket illetve szoftvert használtuk:

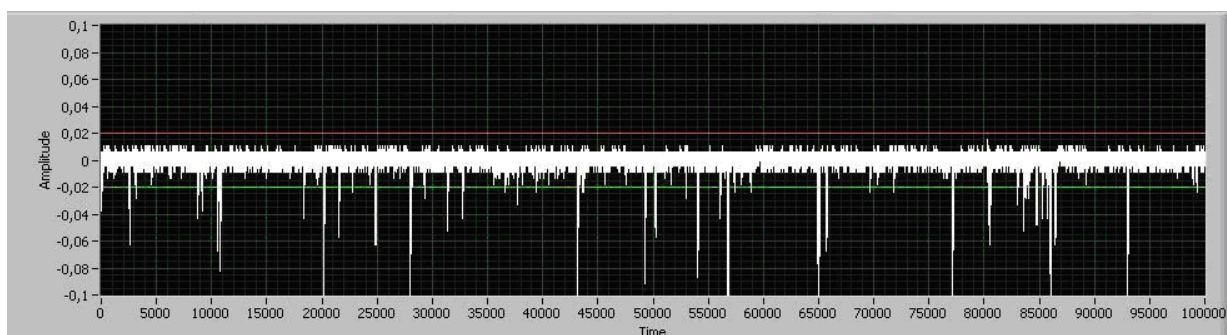
A minta gerjesztését egy, a mintánál 8-10-szer hosszabb szolenoiddal végeztük. A szolenoid gerjesztő árama időben lineárisan, állandó meredekséggel változott.(háromszögjel)

A Barkhausen jeleket egy, közvetlenül a mintára tekercselt kis menetszámú ($n=100$) detektortekercssel érzékeltük.

Ez a hozzá kapcsolódó előerősítővel együtt képes az egyedi lavinák érzékelésére. A gerjesztőtekercs és a minta egy mágneses árnyékoló burkolatban került elhelyezésre a külső mágneses mezők által okozott zaj csökkentése céljából.

A detektortekercset a mintával együtt egy külön erre a célra épített mérőkeret segítségével rögzítettük a gerjesztőtekercs belsejében, ami lehetővé tette, hogy súlyterheléssel húzófeszültség hatása alatt is végezhesünk méréseket. Amint az az ipari mérésekből már régóta ismert a húzófeszültség alkalmazása növeli a Barkhausen zaj nagyságát. Tekintettel arra, hogy rendszerünk megfelelően érzékenynek bizonyult így a dolgozatban ismertetésre kerülő méréseknél külső feszültség alkalmazására nem volt szükség. Ugyanakkor a feszültség alatti mérések további igen érdekes eredményekhez vezethetnek.

A Barkhausen-zaj mérésére egy Labview-ban külön erre a célra megírt programot használtunk, mely képes nagy mintavételezési sebességgel (200000 scan/sec) rögzíteni a jeleket (melléklet 20.ábra). A rögzített jelcsomagokat egy kiértékelő programmal dolgoztuk fel, amely az egyedi zajesemények amplitúdóját, szélességét, területét, energiáját és egyéb paramétereit kiszámítja majd a kapott adatokat statisztikailag is feldolgozza. Mivel a mérések kis gerjesztési sebességgel történnek, ezért a mérési idő igen hosszú és az adatok tárolásához igen nagy háttértároló kapacitás szükséges.



6. ábra: A Barkhausen-zaj alapjele, illetve a doménfalak negatív tartományba tartó átfordulása látható

Az ismertett mérési elrendezés blokkvázlatát a 7. ábrán láthatjuk.

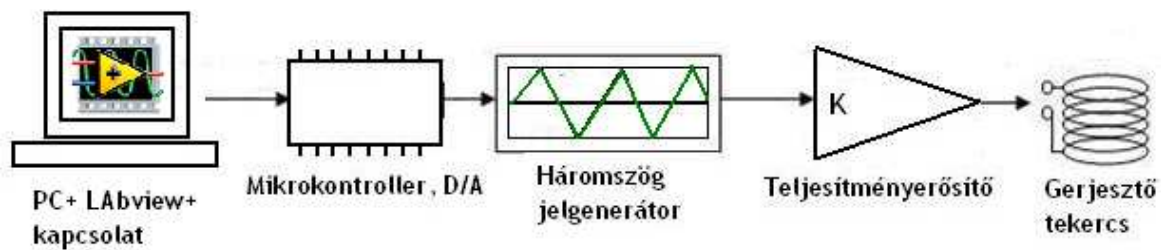
A kísérleti berendezés az alábbi fő elemekből áll:

Gerjesztő egység (7.a ábra)

- Mikrokontroller (D/A)
- Jelgenerátor
- Teljesítmény erősítő
- Gerjesztő tekercs

Erősítő és jelkondicionáló egység (7. b ábra)

NI 6070E típusú mérőkártyával és Labview programmal ellátott számítógép (20. ábra)



7.a ábra: A gerjesztő egység blokkvázlata



7.b ábra: Erősítő és jelkondicionáló egység blokkvázlata

4. Mérések, eredmények

4.1 Az háttéranyagként szolgáló elmélet áttekintése

Méréseinket egy olaszországi kutatóintézetben Fe-Si kristályos ötvözetben végzett vizsgálatok előzték meg, mely rendkívül precíz eredményeket szolgáltatott a kristályos ferromágneses anyagról. [16] A kísérleti tapasztalatok és elméleti meggondolások alapján a szerzők rámutattak arra, hogy az átmágnesezés folyamatának mechanizmusa a mágnesezési görbe különböző részein más és más. Ebből az is következik, hogy a zajparaméterek eloszlásfüggvényei is különbözhetnek a különböző szakaszokon. A korábban alkalmazott mérési módszerrel szemben- amikor a teljes átmágnesezési folyamat során begyűjtött összes zajimpulzust egy eloszlásfüggvénnyel igyekeztünk jellemezni - sokkal célravezetőbb az, ha csak a mágnesezési görbe egy-egy szűk szakaszáról begyűjtött impulzusokat vizsgáljuk statisztikailag.

A másik fontos dolog az, hogy az átmágnesezési folyamatot és így a zajtevékenységet is az anyag belsejében uralkodó mágneses indukció (B) változási sebessége kontrollálja. Tehát, ha összehasonlítható és reprodukálható méréseket akarunk csinálni, akkor az indukció változási sebességét $\frac{dB}{dt}$ kell állandó értéken tartanunk az eddig szokásos (és technikailag lényegesen

könnyebben megvalósítható) térerősség változási sebesség $\frac{dH}{dt}$ helyett. Könnyű belátni, hogy

állandó $\frac{dH}{dt}$ mellett a mágnesezési görbe nagy permeabilitású (a koercitív tér környékén lévő)

szakaszain az indukció változási sebessége sokkal nagyobb mint a kis permeabilitású telítési

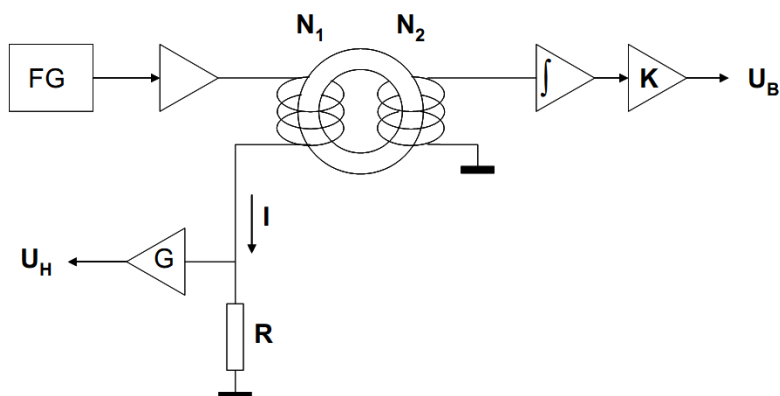
szakaszokon. A kívánt állandó $\frac{dB}{dt}$ biztosításához tehát a $\frac{dH}{dt}$ értékét a mágnesezési görbe

permeabilitásának megfelelően folyamatosan változtatni kell. Ez technikailag nehezebben megoldható feladat, ezért azt a megoldást választottuk, hogy a mágnesezési görbét szűk (0.1T szélességű) tartományokra osztottuk. (Erre a fentebb már említett okokból egyébként is szükség lenne)

Mindegyik tartományra kiszámítottuk a rá jellemző átlagos permeabilitási értéket és ennek segítségével meghatároztuk, hogy egy állandó $\frac{dB}{dt}$ indukcióváltozási sebességhez mekkora lokális $\frac{dH}{dt}$ gerjesztési sebességre van szükség. A teljes átmágnesezést ezzel a sebességgel végeztük, de a zajt csak a kiválasztott tartományból gyűjtöttük be és dolgoztuk fel. Hasonló módon mindegyik vizsgálati tartományból a megfelelő gerjesztési sebességgel begyűjtve az adatokat a teljes mágnesezési görbe végigmérhető úgy, hogy közben az indukcióváltozás sebessége az anyagban állandó marad.

4.2 Az mágnesezési görbe megismerése

A fenti mérés megtervezéséhez először is pontosan ismernünk kell az anyag mágnesezési görbáját. Ezt indukciós módszerrel vettük fel a 8. ábrán látható elrendezésben. A fémüveg szalagot egy szigetelő csévetestre tekercseltük fel 4 rétegben. Az így kapott toroidmagon két tekercset (N_1 és N_2) helyeztünk el.



8.ábra: Az általunk használt indukciós módszer elrendezése az anyag mágnesezési görbéjének megállapításához

A mérés során az FG függvénygenerátor által előállított szinuszos gerjesztőáramot használtunk, amelynek a frekvenciája 0.5Hz volt.

A mágnesezési görbe felrajzolásához szükséges H mágneses térerősséget a primer tekercsen folyó gerjesztőáram mérésével határozhatjuk meg:

$$H = \frac{N_1 I}{\pi \left(\frac{D+d}{2} \right)} \quad (2)$$

A fenti képletben D és d a toroidmag külső és belső átmérőjét jelöli.

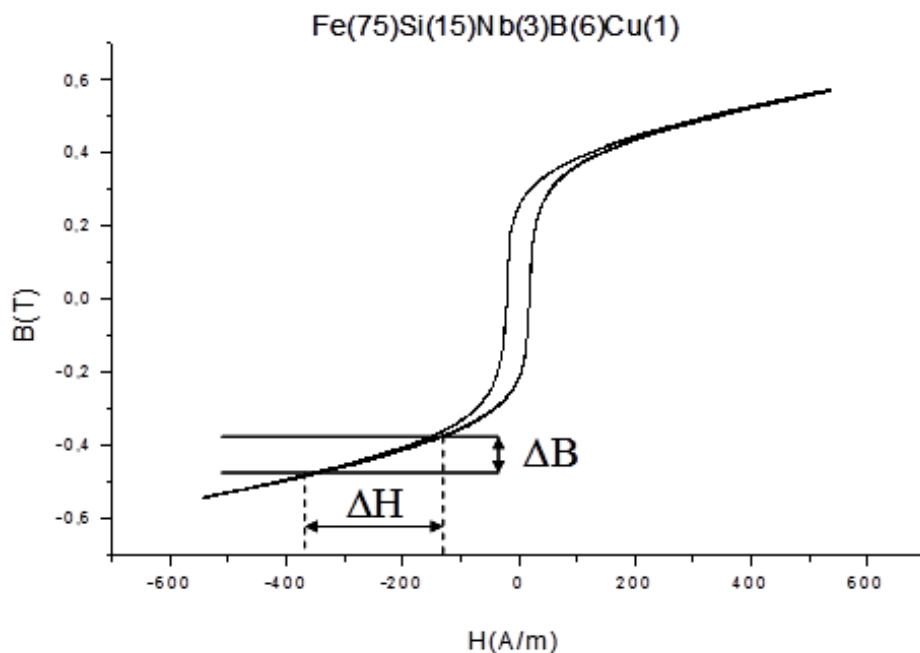
A B mágneses indukció meghatározásához az N_2 szekunder tekercs kapcsain mérhető U feszültséget használjuk fel:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt}(BA) = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

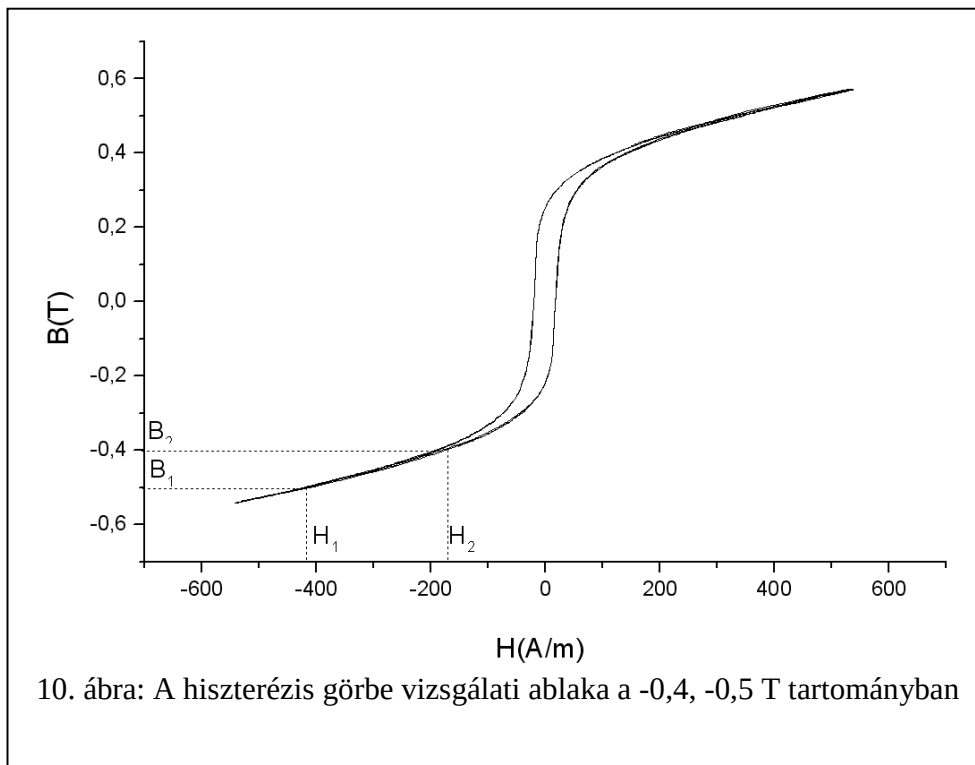
$$B = -\frac{1}{N_2 A} \int U dt \quad (3)$$

A fenti képletben A a toroidmag keresztmetszete

Az alacsony frekvencia miatt az bizonyult a legcélravezetőbbnek ha több periódusra begyűjtöttük a nyers primer áram és szekunder feszültség adatokat. A szekunder feszültség numerikus integrálása után a mágnesezési görbe felrajzolható.(9. ábra)



9. ábra: A mágnesezési görbe vizsgálati ablaka



A mérések során mindig a hiszterézis görbe ugyanazon ágán, ugyanolyan irányú mágnesezés mellett gyűjtöttünk adatokat. A korábbiakban említett vizsgálati ablakok egyikét az 10. ábrán is bejelöltük.

Meg kellett állapítanunk még a gerjesztőáram és a gerjesztő tér közötti pontos összefüggést is. Ehhez az I gerjesztőáram függvényében mértük a gerjesztő szolenoidban fellépő H térerősséget. A térerősség mérését egy FW.Bell 5100 gyártmányú axiális Hall szondával végeztük. A két mennyiség között az általunk használt tekercsben az alábbi összefüggés áll fenn:

$$H = 7579.1 \frac{1}{m} I \quad (4)$$

Mivel a lineáris időfüggésű gerjesztő áram amplitúdójának és meredekségének a beállítása is digitális vezérléssel történt ezért a legcélszerűbb megoldás az volt hogy közvetlenül a vezérlőegység D/A konverterébe beírt számérték és a térerősség közötti összefüggést határozzuk meg.

Az gerjesztőáram amplitúdója és az X digitális vezérlőjel közötti összefüggés egyszerű áramméréssel meghatározható:

$$I = 4.79 \times 10^{-5} A * X \quad (5)$$

A fenti két egyenlet alapján a digitális amplitúdó vezérlőjel és a térerősség között a következő összefüggés áll fenn:

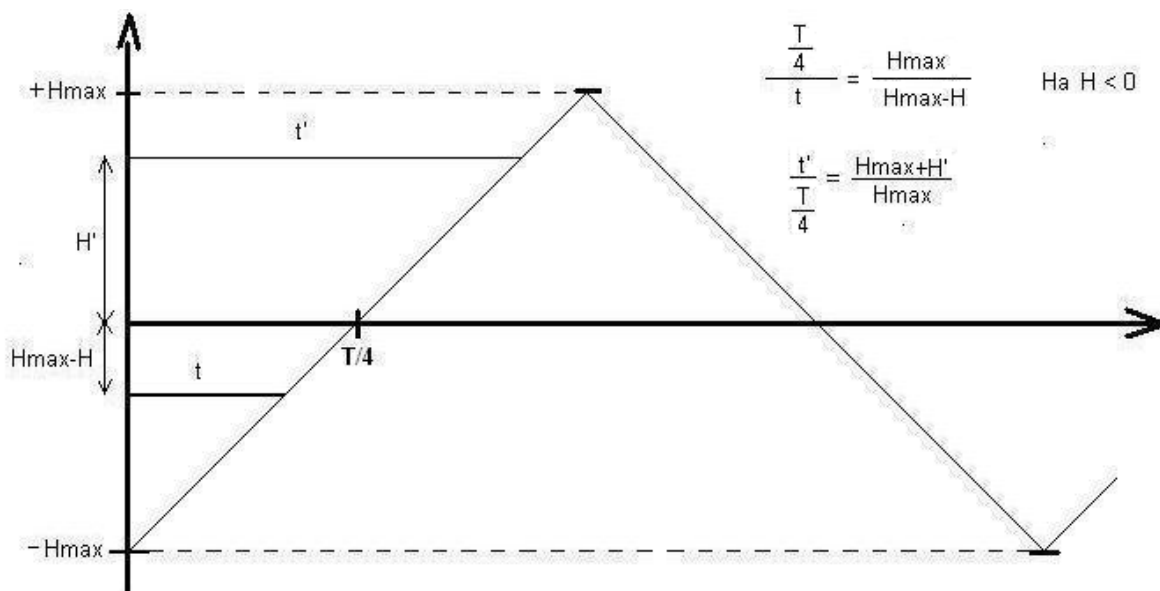
$$H = 0.363 \frac{A}{m} X \quad (6)$$

4.3 Az elméleti modell

Mint azt már említettem 10 egyforma szakaszra volt felosztva fél periódusunk, mely szakaszok egyesével lettek mérve, hiszen eltérő meredekséggel rendelkeztek. A meredekség befolyásolta a mérések nehézségi fokát, időtartamát. Külön hangsúlyt kellett fektetünk a hiszterézis görbe külön területeire. A hiszterézis görbe megfigyeléseim szerint 5 részre bontható melyek a következők:

- Telítésből visszafelé jövő ág, negatív tartomány
- Görbület, magasabb fokú meredekség kezdete
- Meredek szakasz
- Görbület, magasabb fokú meredekség vége
- Telítődés irányába tartó ág, pozitív tartomány

Amint azt már korábban említettük igen lényeges az, hogy mindig csak a mágnesezési görbe egy szűk tartományából érkező, azonos mágnesezési mechanizmushoz tartozó Barkhausen ugrásokat vegyük figyelembe az adatfeldolgozás során. Az adatgyűjtő program számára azt kell megadnunk, hogy a mérési tartomány a teljes T gerjesztési periódusidő hány százalékánál kezdődik illetve, hány százaléknál szűles mért tartomány. (melléklet 20.ábra)
Az alábbiakban (11. ábrán) részletesen bemutatjuk a fentebb említett lépéseket.



11. ábra: A T gerjesztési periódusidő megállapítására szolgáló modell

$$H = K \cdot I = 7579,8 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot I$$

$$I = 4,79 \cdot 10^{-5} \cdot x$$

$$H_{\max} = 7579,8 \cdot 4,79 \cdot 10^{-5} \cdot x = 5,99,79 \sim 600 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

ahol $x = 1652$, vagyis a maximálisan megállapított amplitúdó

(7)

Kezdő lépésként az egységesen 10 szakaszra felosztott hiszterézis görbe mentén mintavételeztünk 0,1 B(T)-ként. Első szakaszunk, mely górcső alá került a -0,5T-től, -0,4T-ig tartó része volt a hiszterézisünknek (10. ábra).

A megfelelő távolságban lévő (ablakolás által határolt terület peremén) két pontot kijelölve és megmérve a hiszterézis görbén megkaptuk a B_1 , B_2 , illetve a H_1 és H_2 értékeket. Ezen adatok a relatív permeabilitás számításához feltétlenül szükségesek.

Kiindulási adatainkra hagyatkozva azt mondhatjuk, hogyha $B_1 = -0,5T$, $B_2 = -0,4T$, valamint $H_1 = -409,81 \text{ A/m}$ és $H_2 = -175,73 \text{ A/m}$ pontokban mintavételeztünk, akkor ennek függvényében meg tudjuk állapítani az említett számítással az ablakolást (t/T), a relatív permeabilitást (μ_r) majd ebből a megfelelő meredekséget, mely háromszögjelünket vezérli, tehát a periódusidőt befolyásolja.

A relatív permeabilitást a következőképpen állapítottuk meg a mintavételezett értékekből: A mágneses indukciók értékét kivonjuk egymásból majd a mágneses térerősség esetén is ugyanezt tesszük a táblázat alapján

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \left| \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} \right| \quad \text{ahol } \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am} \quad (8)$$

Mindezek után a következő képlettel felírható a megfelelő ablak beállítási paramétereket:

$$t / T = 0,25 \cdot (1 + H_{\max}) / H_{\max} \quad \text{ahol } H_{\max} = 600, \quad (9)$$

0,25 pedig a $T/4$ szakaszt jellemzi

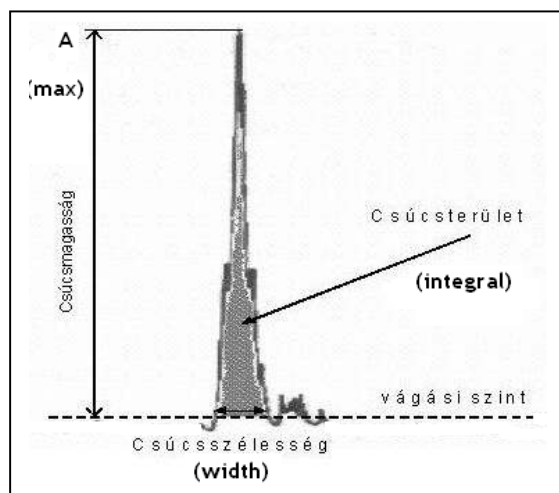
A következő lépés vizsgálatunk finomítása volt, ahol is az első 10 ponton kívül további vizsgálatoknak tettük ki mintánkat a hiszterézis görbe mentén, főként a két görbületi szakaszon, ahol két nagyságrenddel nagyobb jelszintet detektáltunk.

	$B(\text{T})$	$H(\text{A/m})$	$t_{\text{per}}T(\text{s})$	decrement(γ)	$U_r(\text{V})$
1	-0,5	-409,81	0,07925	257,10119	341,92762
2	-0,4	-175,73	0,17678	257,10119	341,92762

12.ábra: A meghatározott értékek a fentebb hivatkozott $B_1 = -0,5$, $B_2 = -0,4$ valamint $H_1 = -409,81$ és $H_2 = -175,73$ mintavételezett pontokban

A mérési eredmények kiértékelése minden esetben a hiszterézis görbe könyökpontjai mentén volt a legnehezebb meghatározni az értékeket, ezeken a pontokon gyakran volt szükségünk nagyobb periódusszámmal végzett vizsgálatokra a kiértékelhetőbb eredmények érdekében.

4.4 A vizsgált paraméterek



13. ábra: Detektált csúcsaink alapvető tulajdonságainak megnevezése

-A Barkhausen zaj mérések során leggyakrabban az alábbi zajparaméterek eloszlásfüggvényeit vizsgálják:

Csúcs alatti terület

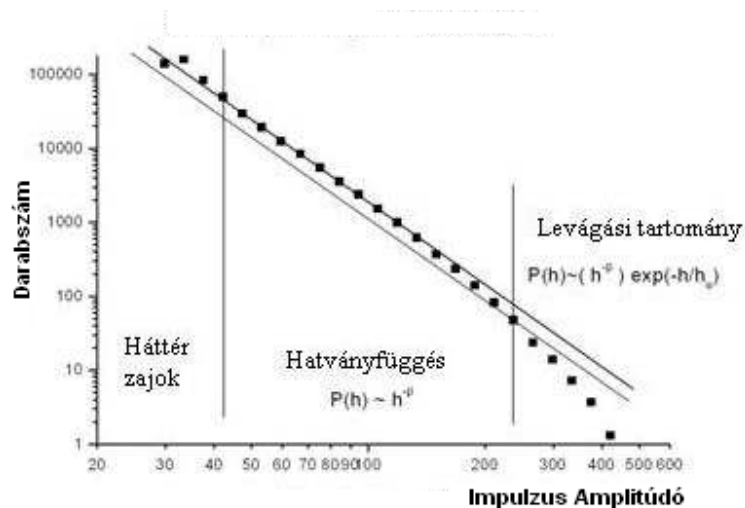
Csúcsszélesség

Impulzus energia: egy Barkhausen impulzus négyzetének integrálja

Átlagos zajteljesítmény (a megfigyelési ablakban rögzített zajesemények összenergiája /gyűjtési idő)

4.5 Az önszerveződő rendszerekre jellemző eloszlási görbe jellege

Egy önszerveződő kritikus folyamatra jellemző tipikus eloszlási görbe látható a (14. ábrán) a szokásos kétszer logaritmikus ábrázolásban.



14.ábra: Az önszerveződő kritikus folyamatokra jellemző eloszlási görbe

A fizikai folyamat legfontosabb jellemzője a 14. ábrán látható eloszlásfüggvény lineáris szakaszának meredekségéből meghatározható β exponens, amelynek értéke alapján a folyamatok univerzalitási osztályokba sorolhatók. A szintén a 14. ábrán látható h_0 levágási (cutoff) érték a fizikai folyamathoz kapcsolható karakterisztikus méretekre jellemző.

A megfelelően húzott görbe a hatványfüggvény eloszlására éppolyan fontos mint a mérésünk pontossága, hiszen egy pontosabb illesztés után kaphatjuk meg a precíz végeredményt. (melléklet 22., 23. ábrák)

5. Eredmények

A terület illetve energia esetén az egyes mérések után kiértékelt eloszlásfüggvényre illesztett görbe kitevőinek értéke adta meg a pontokat, melyeket a 14. ábrán láthatunk. Az ábrákon a 0.1T szélességű tartományokra jellemző hatványkitevő értékeket rajzoltuk fel a tartományok centrumát jellemző indukcióérték függvényeként. Érdekes elvi kérdés, hogy a kapott gyakorisági függvények egyáltalán követik-e a (1) összefüggést vagy nem B_c -től távolabbi tartományban is. Elméletileg a H_c környezetében ($B=0$ -nál) felvett eloszlásokra kaptak a kísérleti értékekkel megegyező kitevőket [16], ettől távolabbi pontok környezetében, minthogy eltérő lehet a mágnesezési folyamat esetleg (1) érvényessége is kérdésese lehet. A 22. és 23. ábrákon látható, hogy pl. a terület gyakorisági függvény nem csak a $B=0$ környezetében (melléklet 22. ábra), hanem attól eltérő értékeknél is jól közelíthető egy (1) által megadott függvénnyel (melléklet 23. ábra). Továbbá, az is megállapítható, hogy a $B=0$ körüli három pont átlaga jól egyezik a [13]-ben ugyancsak amorf fémüveg szalagon kapott kitevővel (1.25). Érdemes megjegyezni, hogy ez kitevő, valószínűleg tükrözve a mágnesezési folyamatok részleteinek különbözőségét, polikristályos Fe(Si) ötvözetekben eltérő (1,45), és ennek alapján [13]-ben két, skála viselkedés szempontjából különböző, családról beszélnek.

5.1 Tapasztalataink:

Megállapíthatjuk, hogy a csúcsterület, az energia gyakorisági függvények is jól leírhatók az (1) összefüggéssel, bár a kitevő jelentősen változik B függvényében. A telítéshez közeledve a kitevőértékek növekednek. Mindkét esetben törés figyelhető meg a görbén a hiszterézisgörbe könyökpontjainak (legnagyobb görbületű szakasz a mágnesezési görbén 0.3T indukcióérték körül) környezetében. (15, 16 ábrák). A mérési adatokból kiértékeltük a csúcsszélesség eloszlás függvényeket is.

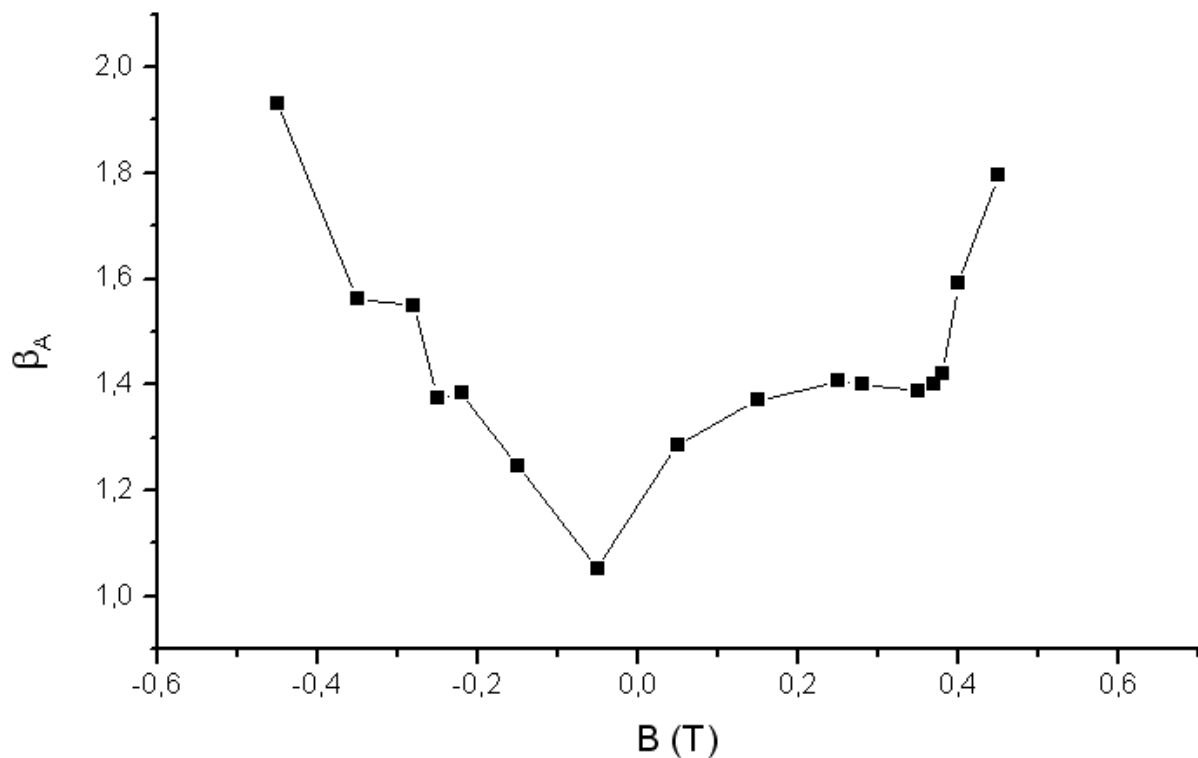
Ezek kitevői a B függvényében a 17. ábrán láthatóak. Megjegyezzük azt, hogy a csúcsszélesség gyakorisági görbéken a hatványfüggvénnyel illeszthető egyenes szakasz nagyon rövid, ami miatt a kapott kitevő értékeket meglehetősen pontatlanok.

Ezért a 17. ábrán látható mérési pontok alapján csak azt állíthatjuk, hogy a $B = 0$ környezetében a csúcsszélesség kitevő feltehetőleg nagyon enyhe maximumot mutat. Az eredmények igen nagy szórása miatt ez további ellenőrzésre szorul.

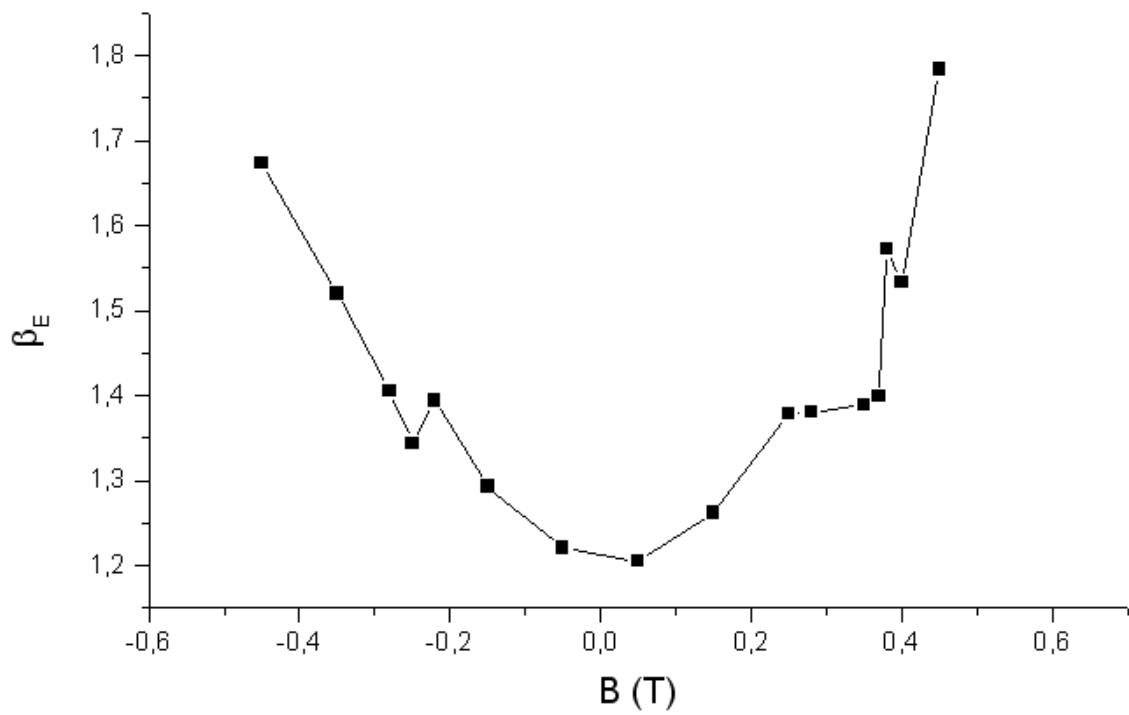
Eredményünket érdemes összevetni az [16] illetve [17] munkákban polikristályos Fe(Si) ötvözetben közölt azon kísérleti eredménnyel, hogy az egy ciklus alatt disszipált energia, E , a B függvényében a következő empirikus viselkedést követi

$$E \sim a\mu + b\partial\mu/\partial B, \quad (10)$$

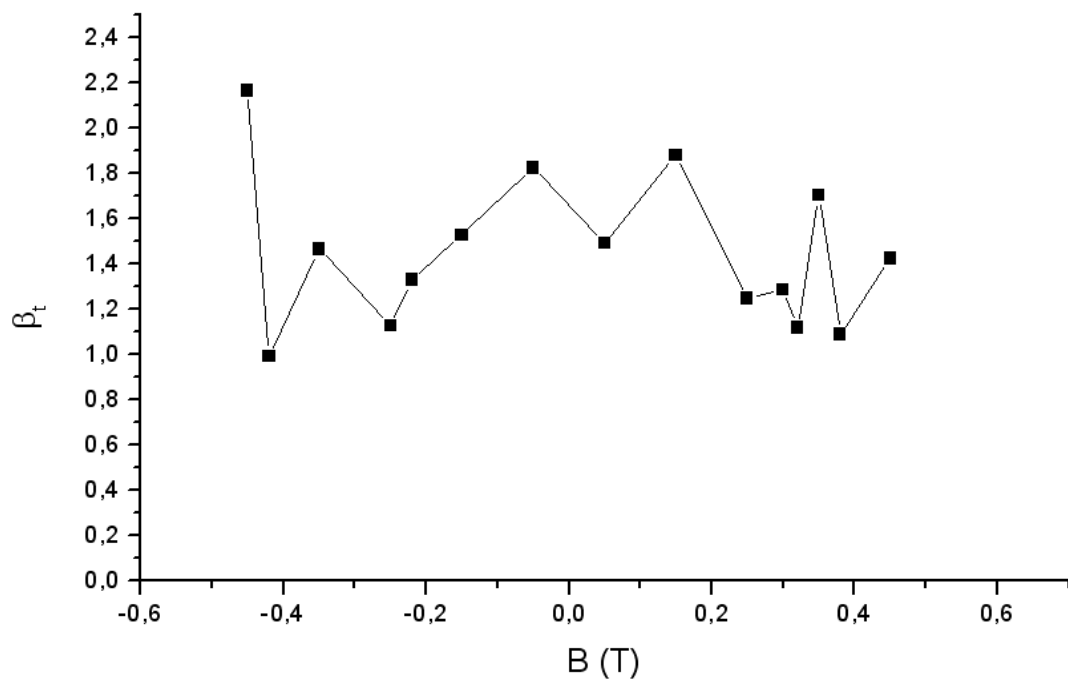
ahol μ a permeabilitás. Ennek megfelelően az $E(B)$ függvénynek maximuma van a $B(H)$ függvény könyökpontjainál (18. ábra). Mint látható az amorf féműveg szalagokban is hasonló eredményt kaptunk (19. ábra)



15. ábra: A csúcsterület eloszlásfüggvények kitevői a detektálási ablak helyzetének függvényében



16. ábra Az impulzus energia eloszlásfüggvények kitevői a detektálási ablak helyzetének függvényében

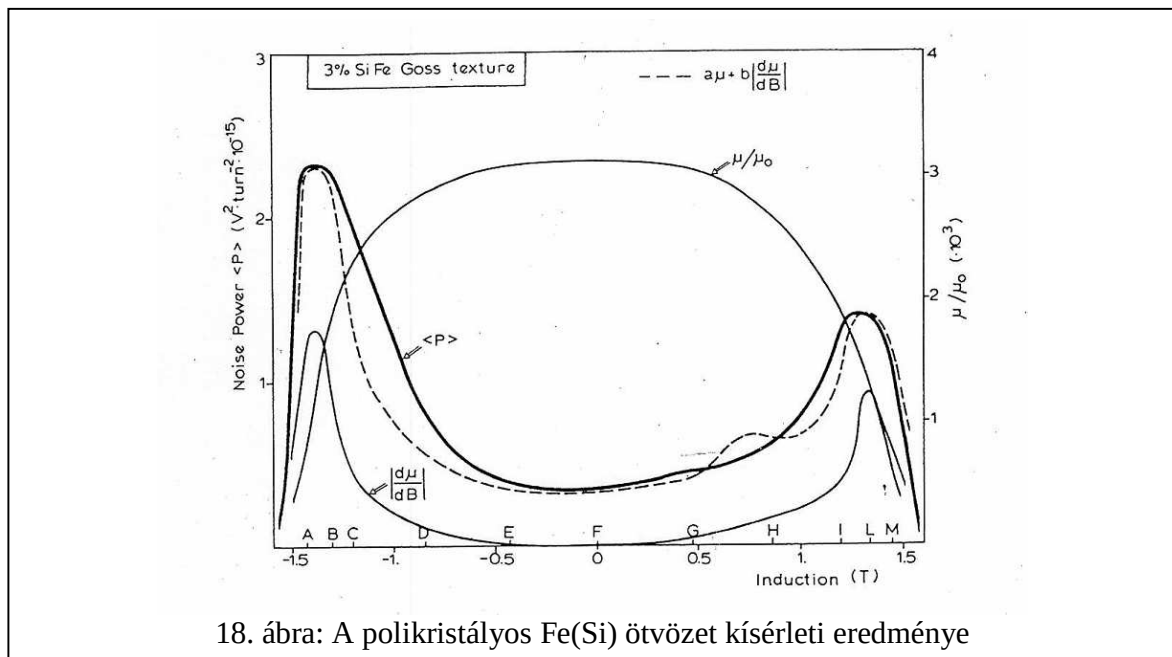


17. ábra: A csúcsszélesség eloszlásfüggvények kitevői a detektálási ablak helyzetének függvényében

Amint az az ábrákból látható mind a csúcsterületek mind az energia exponensek hasonló viselkedést mutatnak. A legalacsonyabb értékek a koercitív tér ($B=0\text{T}$ indukció) környezetében figyelhetők meg. Az anyag telítődéséhez közeledve a kitevőértékek növekednek. Mindkét esetben törés figyelhető meg a görbén a hiszterézis görbe könyökpontjainak (legnagyobb görbületű szakasz a mágnesezési görbén 0.3 T indukcióérték körül) környezetében.

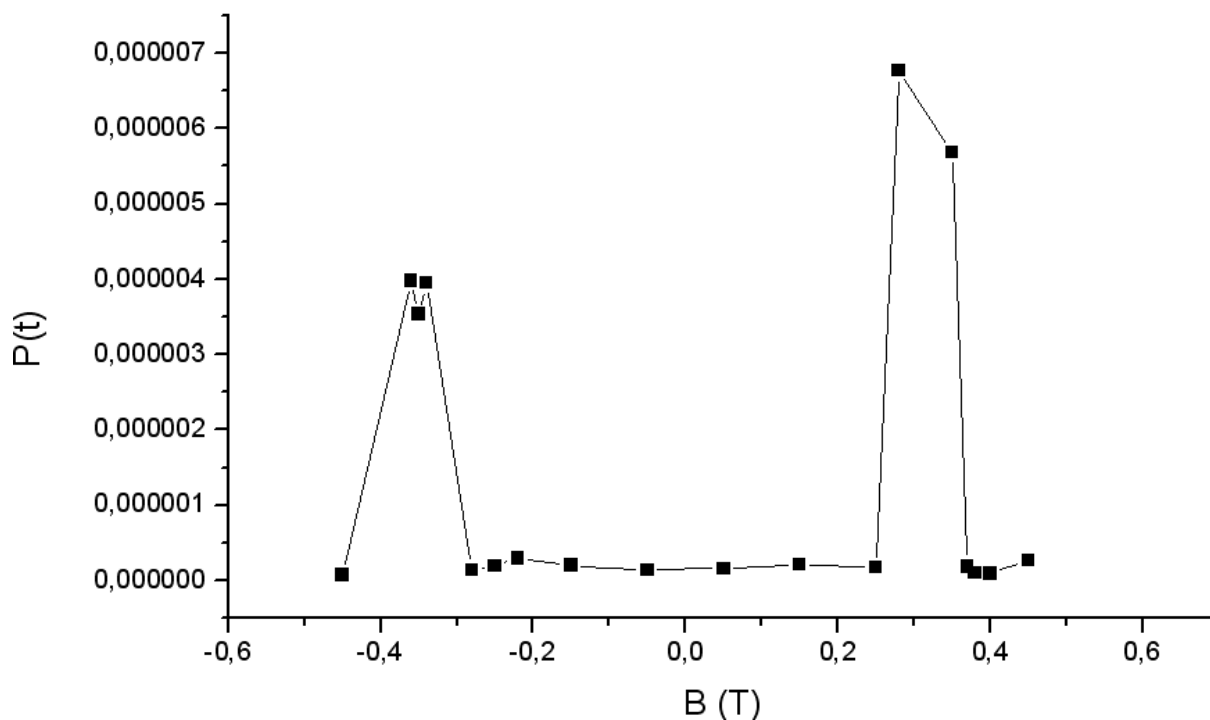
5.2 A Fe(Si) kísérleti eredménye

A zajteljesítmény értékei elméleti és kísérleti eredmények [16] alapján kiugróan magasak a mágnesezési görbe könyökpontjai körül. A szerzők ezt a doménstruktúrában fellépő hosszú távú instabilitásokkal magyarázzák. Kísérletileg ezt eddig csak Fe-Si kristályos ötvözetrendszerben sikerült kimutatni.



18. ábra: A polikristályos Fe(Si) ötvözet kísérleti eredménye

A kérdés az általunk vizsgált amorf fémüveg szalag viselkedési formája volt. A fémüveg szalagon kapott eredményeinket a (18. ábrán) ábrán mutatjuk be.



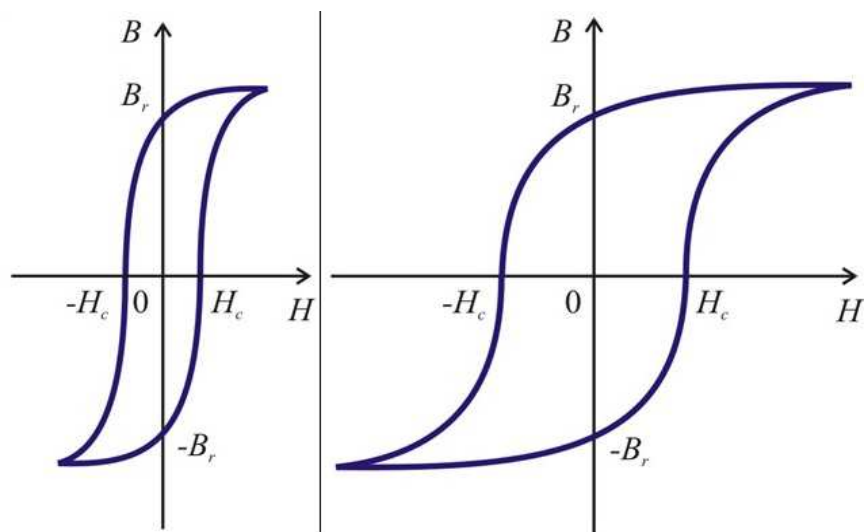
19: ábra: Amint látható az idézett irodalmi eredményekhez nagyon hasonló viselkedést sikerült megfigyelnünk amorf anyagon is.

5.3 További célok

Ellentétben az eddigi lágy mágneses anyagokon folytatott kutatásoktól jelenlegi tervünk, hogy egy kemény mágneses anyagon, illetve a Ni_2MnGa ötvözetünkön is végrehajtsuk eddigi méréseinket.

Méréstechnikailag talán még könnyebb lesz lekövetni a kemény mágneses anyagok hiszterézis görbáját, hiszen azok területe nagyobb (19. ábra), meredekségük kisebb így az eddigiek során megépített konfiguráció jobban tudja majd követni az egyes szakaszokat, főként azokon a részeken ahol a legnagyobb a relatív permeabilitás.

Továbbá nehézséget is hordoz magában a feladat, ugyanis az eddigi kis H terű lágymágneses anyaggal szemben kiszélesített tartományban kell majd méréseinket végeznünk.



20. ábra: A lágy és kemény mágneses anyagok hiszterézis görbéje

6. Összefoglalás

Megmutattuk, hogy:

- 1) FINEMET amorf szalagokban a Barkhausen zaj statisztikus viselkedését leíró [12] szerinti hatvány függvényekkel való illesztés, a mágnesezési görbén negatív telítéstől pozitív telítésig haladva, $B=0$ környezetétől távol is lehetséges. Természetesen a kritikus kitevők változnak.
- 2) A kritikus kitevők $B=0$ környezetében egyeznek korábbi mérések eredményeivel, ettől távolodva értékük nő, és 0.3 T érték közelében kisebb törést mutatnak
- 3) A fenti töréspont helye megegyezik az egy ciklusra jutó energia—indukció függvényen megfigyelhető maximum helyével, azaz a $B(H)$ függvény könyök pontja közelébe esik. Az $E(B)$ függvény hasonló ahhoz a polikristályos Fe(Si) ötvözetben kapott eredményhez, hogy a függvény a permeabilitást és ennek deriváltját tartalmazó két tag összegeként írható le.

Köszönetnyilvánítás:

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Beke Dezső professzor úrnak, amiért figyelmemet a témára felhívta és munkámat konzultációkkal, útmutató tanácsaival segítette.

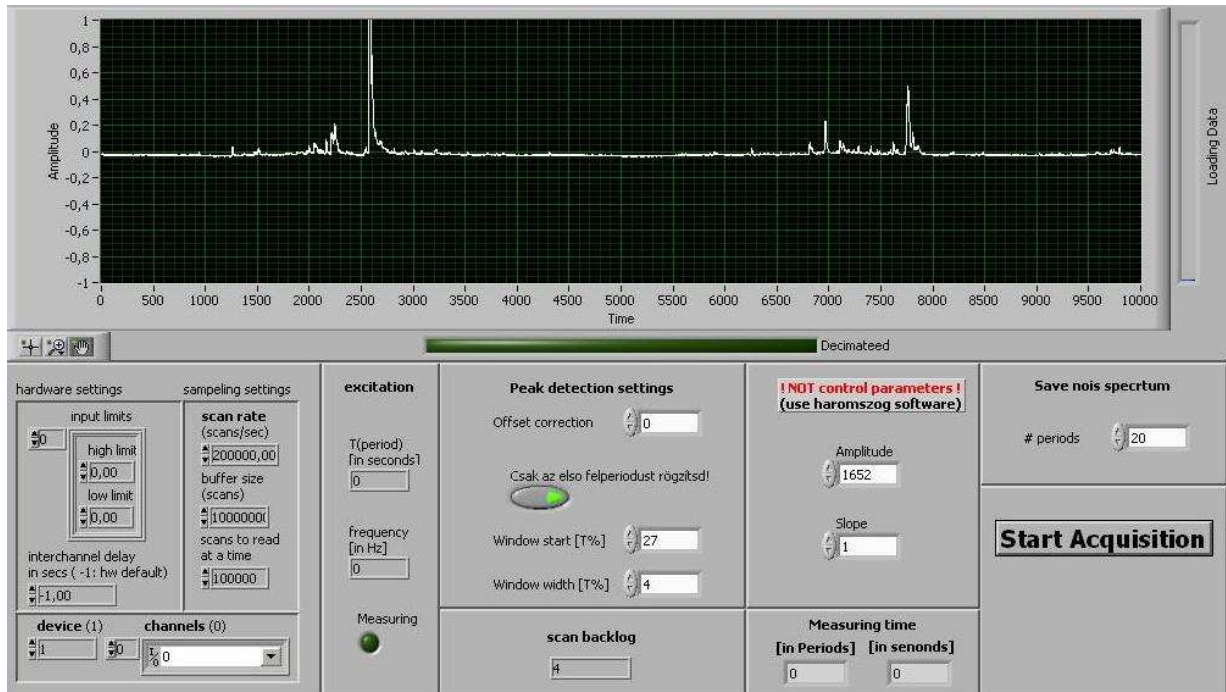
Szintén köszönetet mondok Dr. Daróczi Lajos úrnak a mérések kivitelezésében nyújtott segítségéért, hozzáértő szakmai tanácsaiért és támogatásáért.

7. Irodalom:

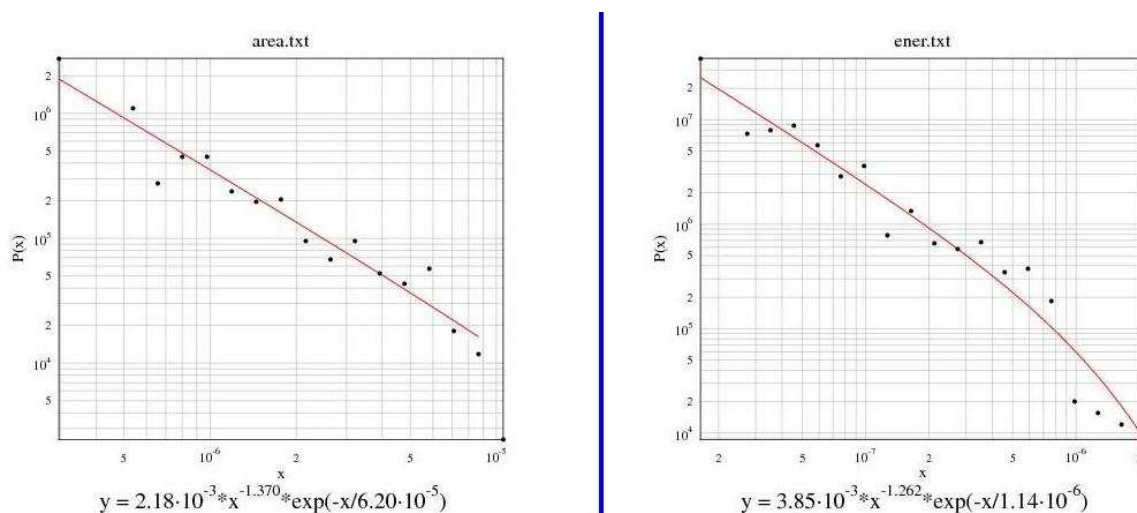
1. <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/03/090324091211>
2. <http://hirek.prim.hu/cikk/80436/>
3. G. Herzer, Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys 420-425, (1997)
4. T. Yamane, H. Sugihara, Common mode choke cores using the new Fe-based alloys composed of ultrafine grain structure, J. Appl. Phys. 64, 6047-6049 (1988)
5. G. Herzer, Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets, IEEE Trans. Magn. 26, 1397-1402, (1990)
6. H. Barkhausen, Geräusche beim Ummagnetisieren von Eisen, Phys. Z. 20 401-402 (1919)
7. Pasley, RL, Barkhausen effect - an indication of stress, Mater. Eval. 28, 157-161, (1970)
8. J. Crangle, Solid State Magnetism, Edward Arnold Inc., London, (1991)
9. G. Bertotti, Hysteresis in Magnetism, Academic Press Inc., San Diego, (1998)
10. T. Musha, S. Sato and M. Yamamoto, Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations, Ohmsha Ltd., 95-98, (1992)
11. Kun Ferenc, Fragmentációs folyamatok univerzalitási osztályai, Fizikai Szemle, 221, (2008)
12. S.Zapperi, P. Cizeau, G. Durin, H.E. Stanley: Dynamics of a ferromagnetic domain wall: avalanches, depinning transition, and the Barkhausen effect, Phys. Rev. B 58, 10 (1998)

13. Durin, S.Zapperi: Scaling Exponents for Barkhausen Avalanches in Polycrystalline and Amorphous Ferromagnets, Phys. Rev. Lett. 84, 20 (2000)
14. D. Spasojevic, S. Bukvic, S. Milosevic, E. Stanley: Barkhausen noise: Elementary signals, power laws, and scaling relations, Phys. Rev. B 54,10,(1996)
15. G. Durin, S.Zapperi:The Microscopical Origin of Barkhausen Noise: A Review of Recent Results: ICBM-4, pp:11.-17
16. Bertotti Hysteresis in Magnetism, Academic Press Inc., San Diego, 1998
17. Durin and S. Zapperi: Barkhausen noise in soft amorphous magnetic materials under applied stress. J. Appl. Phys. 85(8), 5196 (1999).

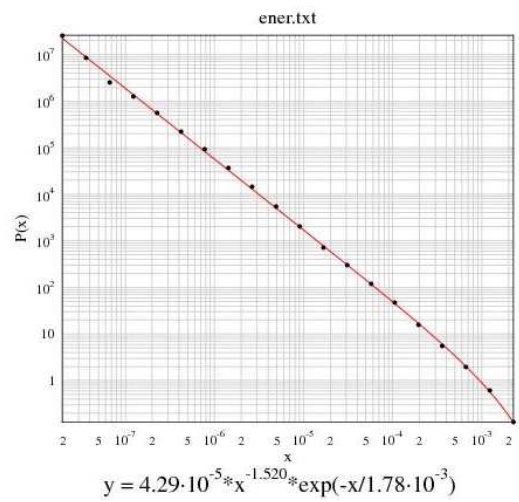
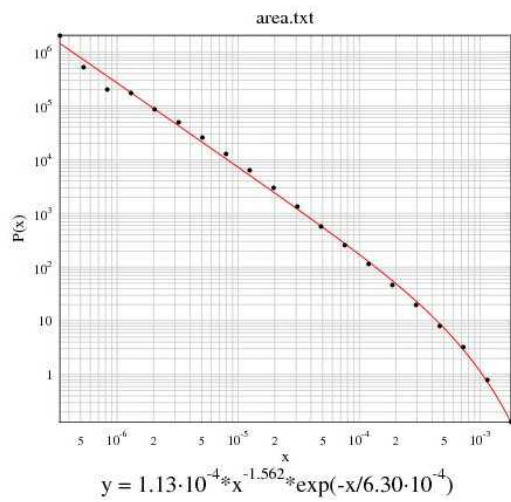
8. Melléklet:



21. ábra. A Labview mérőprogramra jellemző beállítások (balról: mintavételi idő, vizsgálati ablak tartományának beállítása, első fél periódus rögzítésének lehetőség, amplitúdó, periódusszám)



22. ábra: A csúcsterület valamint a impulzus energia eloszlásfüggvények kitevői a detektálási ablak helyzetének függvényében a $B = 0$ környezetében



23. ábra: A csúcsterület valamint a impulzus energia eloszlásfüggvények kitevői a detektálási ablak helyzetének függvényében a telítés közeli állapotban