

KOVÁCS ENDRE, PARIPÁS BÉLA,

FIZIKA II.

4



A Műszaki Földtudományi Alapszak tananyagainak kifejlesztése a
TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 pályázat keretében valósult meg.

IV. MÁGNESESSÉG AZ ANYAGBAN

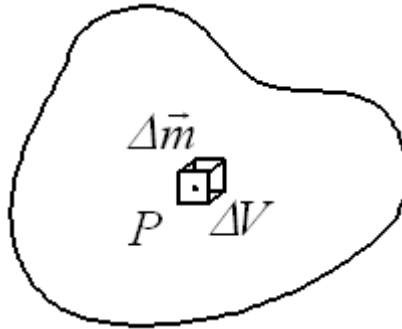
1. AZ ALAPVETŐ MÁGNESES MENNYISÉGEK

A mágneses polarizáció, a mágnesezettség vektora

A nukleonok (proton, neutron) mágneses dipólnyomatéka sokkal kisebb, mint az elektronoké, ezért egy atom vagy molekula mágneses dipólnyomatéka lényegében megegyezik az elektronok dipólnyomatékának összegével. Az elektronok mágneses dipólnyomatéka két részből áll:

1. mozgásból származó mágneses nyomaték, mivel az atommag körül mozgó elektron kicsiny köráramnak tekinthető
2. saját mágneses nyomaték (a spinből adódik)

Az anyag mágnesezettségének jellemzésére vezessünk be egy új vektort. Legyen $\Delta\vec{m}$ a ΔV térfogatban lévő mágneses dipólnyomatékok vektori összege.



Az anyag mágnesezettségének bevezetése

Definíció szerint a mágnesezettség vektora a P pontban megadja az egységnyi térfogatra jutó mágneses nyomatékot.

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{m}}{\Delta V}$$

A mágnesezettség mértékegysége: $[M] = 1 \frac{Am^2}{m^3} = 1 \frac{A}{m}$.

A mágneses térerősség

Célszerű bevezetni a mágneses térerősséget mint a \vec{B} és a \vec{M} vektorok lineáris kombinációját, mivel rá egyszerű alakú alaptörvény állapítható meg. A \vec{H} mágneses térerősség definíció szerint:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

Itt a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$ univerzális állandó a vákuum permeabilitása. A mágneses térerősség mértékegysége:

$$[H] = [M] = 1 \frac{A}{m}$$

Ezzel a permeabilitás mértékegysége: $[\mu_0] = \frac{[B]}{[H]} = \frac{1 \frac{Vs}{m^2}}{1 \frac{A}{m}} = 1 \frac{Vs}{Am}$.

A \vec{M} mágnesezettség, valamint a mágnesező tér \vec{B} indukciója közötti kapcsolatot anyagegyenletnek nevezzük. Első közelítésben B és M között arányosságot feltételezünk, ilyenkor beszélünk lineáris anyagegyenletről. Ha $\vec{B} \sim \vec{M}$ akkor $\vec{H} \sim \vec{M}$. A legtöbb izotróp közegben a \vec{H} és az \vec{M} vektorok nemcsak egyirányúak, hanem a tapasztalat szerint egymással egyenesen arányosak is:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

c a mágneses szuszceptibilitás. Ezzel

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H},$$

ahol $\mu_r = 1 + \chi$ a relatív permeabilitás, $\mu = \mu_0 \mu_r$ pedig az abszolút permeabilitás.

Az anyagegyenlet így: $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$, azaz $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ vagy $\vec{B} = \mu \vec{H}$.

A mágneses energia, mágneses energiasűrűség

Korábban már láttuk, hogy az elektromos mező energiasűrűsége az elektromos indukció és térerősség vektorok

skaláris szorzatának a fele: $w = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E}$

A mágneses mező energiasűrűsége teljesen analóg módon számítható a mágneses indukció és térerősség vektorokból:

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}$$

A w_m megadja az egységnyi térfogatban található mágneses energiát, mértékegysége (az elektromos esethez hasonlóan) J/m^3 . Ha a tér egy tetszőleges pontjában a mágneses térerősség \vec{H} és a mágneses indukcióvektor \vec{B} ,

akkor a pont körül felvett kicsiny ΔV térfogatban $\Delta W = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} \Delta V$ mágneses energia található. Ha a mező nem

homogén, egy tetszőleges véges V térfogatban természetesen integrálással nyerhetjük a mágneses energiát:

$$W = \int_V w_m dV = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} dV$$

2. AZ ANYAGOK MÁGNESES TULAJDONSÁGAI

Mai ismereteink szerint az anyagok mágneses tulajdonságai alapján három fő típusba sorolhatóak: dia-, para-, ferromágneses típusba, de ezen felül léteznek antiferromágneses anyagok és ferritek is, emellett a szupravezetőket is külön kategóriába sorolják.

Az atomok mágneses tulajdonságaiért főleg az elektronok felelősek (a mag mágneses momentum ezreléknél kisebb járulékot eredményez) és az atom mágneses momentuma az elektronok pálya- és spin-momentumából tevődik össze. Speciális esetekben – ha az atom páros számú elektront tartalmaz, amelyek spin és pályamomentumai egymást kompenzálják – az atom mágneses momentuma zérus is lehet, de általában az anyagok atomjai spontán mágneses momentummal rendelkeznek.

Külső mágneses tér hatására két folyamat zajlik le: egyrészt a spontán momentummal rendelkező atomok rendeződni

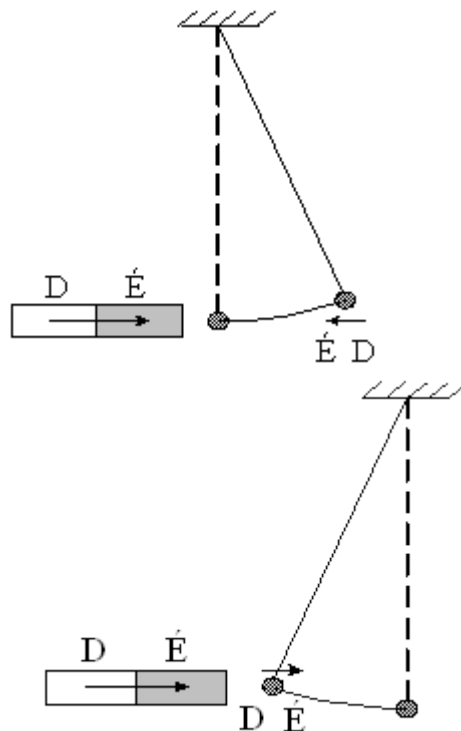
igyekeznek, a mágneses tér konkurál a hőmozgással és ezt nevezik paramágneses folyamatnak; másrészt járulékos mágneses momentum is indukálódik az atomokban függetlenül attól, hogy a mágneses tér bekapcsolása előtt rendelkeztek-e mágneses momentummal. Az így indukált momentum a *Lenz-törvény* értelmében az őt létrehozó mágneses tér ellen dolgozik, azaz \vec{M} ellenkező irányú lesz, mint a mágneses teret jellemző \vec{H} .

Mind a para-, mind a diamágneses folyamat során a keletkező mágnesezettséget a külső mágneses tér hozza létre és az $\vec{M}(\vec{H})$ függvény a kérdéses anyagra jellemző. Nem túl nagy mágneses terek esetén jó közelítésként feltételezhetjük, hogy a mágnesezettség lineárisan függ a mágneses tértől, azaz $\vec{M} = \chi \vec{H}$, ahol χ a mágneses szuszceptibilitás (ahogy néhány oldallal korábban bevezettük) és $\chi < 0$ esetén diamágneses, $\chi > 0$ esetén paramágneses anyagról beszélünk. Tehát a diamágneses folyamat minden atomnál szerepet játszik, míg a paramágneses csak abban az esetben, ha az atom spontán mágneses momentummal rendelkezik. Ha ez utóbbi a helyzet, akkor rendszerint a paramágneses folyamat felülmúlja a diamágnesest és eredőként $\chi > 0$ lesz, ezért beszélünk ilyen esetben paramágneses anyagról.

Diamágnesség

A nemesgázok, a bizmut, réz, ezüst, arany, higany, ólom, víz olyan anyagok, amelyek külső mágneses mező nélkül nem mutatnak mágneses tulajdonságokat. Inhomogén mágneses mezőbe helyezve a kis bizmut-darabot, taszító hatást észlelhetünk. A bizmut polarizálódott és a mágnesező tér indukciója ellentétes irányú a mágnesezettség vektorával, ezért, amint korábban láttuk, taszító erőhatás lép fel. Ezeknél az anyagoknál tehát $\chi < 0$, abszolút értéke általában nem több mint 10^{-4} , de ennél néhány nagyságrenddel kisebb is lehet. A relatív permeabilitás ennek megfelelően csak egy kicsit kisebb egynél: $\mu_r = 1 + \chi \approx 0,9999\dots$

Mivel χ negatív, a közegbeli \vec{B} indukció lecsökken a vákuumbeli $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ indukcióhoz képest. Ez a csökkenés nagyon kicsiny mértékű. Az ilyen anyagok atomjai külső mágneses mező nélkül nem rendelkeznek mágneses dipólyomatékkal. Az elektronok pálya- és saját- mágneses momentumaik lerontják egymást. Külső mező hatására ez a helyzet felborul, a klasszikus fizika szemlélete szerint az egyik elektron felgyorsul, a másik lelassul, és ezáltal az atomnak eredő mágneses dipólyomatéka keletkezik. A jelenség a hőmérséklettől független.



Rúd-mágnes és diamágneses, ill. paramágneses anyag kölcsönhatása

Paramágnesség

A nemesgázok azért diamágneses tulajdonságúak, mert lezárt elektronehéjaik vannak. Ha ehhez még egy elektront

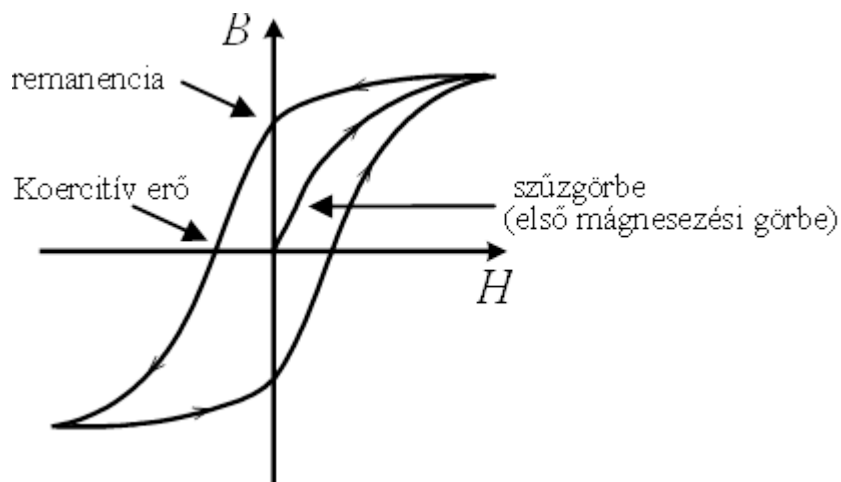
hozzáveszünk, akkor annak a mágneses momentumát nem kompenzálhatja a többi elektron, tehát az alkálifémek (nátrium, kálium...) paramágnesesek. Ezen felül paramágneses anyagok pl. az alumínium, platina, volfrám, oxigén. Külső mágneses tér nélkül adott T hőmérsékleten $\vec{M} = 0$, mert a spontán momentummal rendelkező atomok hőmozgást végeznek és a rendezetlen transláció és forgó mozgás következtében a térfogategységben a mágneses momentumok kiátlagolódnak. Külső mező híján ezek az anyagok sem mutatnak mágneses tulajdonságot. A felfüggesztett alumínium golyót az állandó mágnes vonzza. Ebben az esetben az anyag atomjainak külső mágneses mező nélkül is van eredő mágneses dipólymomentük, de külső mező híján ezek rendezetlenül állnak. A mágneses mező az atomi dipólusokat a maga irányába forgatja, mégpedig annál inkább minél erősebb az alkalmazott mágneses mező, és minél alacsonyabb a hőmérséklet. Ezt a jelenséget rendeződési polarizációnak nevezzük. Ilyenkor $\vec{B} \uparrow \vec{M}$, a szuszceptibilitás pozitív: $\chi \approx 10^{-3} - 10^{-6}$, vagyis a vákuumbeli indukcióhoz képest ilyenkor (kismértékben) növekszik az indukció. A hőmozgás a momentumok rendeződését gátolni igyekszik, ennek következtében a szuszceptibilitás a növekvő hőmérséklettel reciprokosan csökken:

$$\chi \sim \frac{1}{T}$$

Ezt az arányosságot *Curie-törvénynek* hívják.

Ferromágnesség

Egyes anyagok erősen mágnesezhető anyagok, a mágneses mezőből kiemelve többé-kevésbé megőrzik a mágnesességüket. Ilyenek pl. a vas, kobalt, nikkell és ezek ötvözetei, de olyan anyagok is lehetnek ferromágnesesek, amelyeknek egyik összetevője sem az, pl. króm-dioxid. A ferromágneses anyagok (és általában a mágnesesen rendezett szerkezetek, pl. ferrimágneses, és antiferromágneses anyagok, stb.) mind szilárd anyagok és mágneses szempontból többnyire anizotropok, a \vec{B} , \vec{H} , és \vec{M} vektorok nem esnek egy egyenesbe, ettől a továbbiakban az egyszerűség kedvéért eltekintünk. A ferromágneses anyagot külső mágneses mezőbe helyezve, az \vec{M} mágnesezettség a \vec{H} térerősség növelésével eleinte igen gyorsan nő, de csak egy bizonyos határig, utána telítődés következik be. Az ilyen anyagok esetén tehát a lineáris anyagegyenlet *nem használható*. A B és H közötti összefüggés nemcsak nem lineáris, de nem is egyértékű. Kísérletileg meghatározható a mágnesezési vagy *hiszterézis-görbe*.



Ferromágneses anyag hiszterézis görbéje

Az origóból indulunk, ahol a mágneses tér és a mágnesezettség is nulla, vagyis $H=0, M=0, \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = 0$.

Ha H növekszik, vele a B is növekszik, először gyorsan, majd a telítéshez közeledve egyre lassabban. Egy bizonyos H -nál már az összes elemi mágneses dipólus egy irányban áll, így M tovább nem növelhető. Ezt telítési mágnesezettségnek nevezzük. Ha most a H -t csökkenteni kezdjük, B is csökken, de nem ugyanazon a görbén halad visszafelé, vagyis a $H + \Delta H \rightarrow H$ csökkentés kisebb csökkenést eredményez B -ben, mint a $H \rightarrow H + \Delta H$ növelés. Hogy mennyivel kisebbet, az többek között az anyagi minőségtől függ. Amikor H már nullára csökkent, az M és így a B még mindig nem nulla, M értékét remanens mágnesezettségnek vagy *remanenciának* nevezik. Az olyan anyagokat, amelyeknek számottevő a remanens, azaz visszamaradó mágnessége, permanens mágneseknek nevezzük, ilyen például az acél. Ahhoz, hogy M nullára csökkenjen, ellenkező irányú H -t kell alkalmazni, ezt *koercitív*

erőnek nevezzük. Tovább növelve az ellenkező irányú H-t, újra telítés következik be, stb.

Az összetartozó B és H értékek hányadosából kiszámítható μ_r vagy χ már nem állandó (azaz nem csak a minta összetételétől függ), hanem függ a H -tól és a minta előéletétől. A vasnál μ_r és így χ tipikusan több száz, de egyes speciális ötvözeteknél μ_r akár egymillió fölé is lehet. Ha a ferromágneses anyag hőmérsékletét növeljük, akkor egy bizonyos T_C hőmérséklet, az úgynevezett Curie-hőmérséklet fölé a ferromágneses anyagok paramágneses anyagokká válnak. A vas Curie-hőmérséklete 769°C , a kobalté 1075°C , a nikkelé 360°C . Ha az anyagot a paramágneses tartományból kiindulva hűtjük, a szuszceptibilitás növekszik:

$$\chi \sim \frac{1}{T - T_C}$$

Ezt *Curie-Weiss törvénynek* nevezik. A T_C *Curie-hőmérsékleten* (más szavakkal a ferromágneses Curie-pontban) egy másodrendű paramágneses-ferromágneses fázisátalakulás játszódik le. Nincs latens hő és térfogatugrás, a szuszceptibilitás viszont – ahogy az a képletből is kiolvasható – divergál (a gyakorlatban ez akár 10 nagyságrendbeli változást is jelenthet).

Amikor a H változása következtében M változik, energia disszipálódik. Egy cikluson végigmenve az egységnyi térfogatban összesen irreverzibilisen hővé alakult energia mennyisége egyenlő a hurok területével. Elektromosan vezető ferromágnesekben a hő keletkezésének legfőbb oka az, hogy a változó mágneses tér változó elektromos teret indukál (lásd később az indukció fejezetnél \Rightarrow), ezért *örvényáramok* (és így Joule-hő) keletkeznek. Ha lassabban változik a mágneses tér, tehát lassabban megyünk végig ugyanazon a hurkon, akkor kisebb télerősség, kevesebb áram indukálódik, azaz a hurok területének csökkennie kell. Tehát a hurok alakja nem csak a konkrét mintától, hanem a H változási gyorsaságától is függ.

A ferromágnesség értelmezése

Mindezek magyarázata az, hogy a ferromágneses anyagokban nagy tartományon ugyanabban az irányban állnak a mágneses momentumok, ha a hőmérséklet kisebb, mint a Curie-hőmérséklet, ami elég nagy is lehet! Ha az atomok között csak mágneses kölcsönhatás lenne (mint a paramágneseknél), akkor ez csak 1K alatt következhetne be. Van tehát még egy, kvantummechanikai eredetű kölcsönhatás, melynek energiája:

$$E = -J \sum \vec{m}_i \vec{m}_j$$

Ezt Heisenberg-kölcsönhatásnak vagy kicserélődési kölcsönhatásnak nevezik, az összegzést általában az összes olyan m_i és m_j atomi momentumra veszik, amelyek egymással szomszédosak. Ha $J > 0$, akkor a momentumok párhuzamos beállása a legkedvezőbb energetikailag. Ha történetesen $J < 0$, akkor a szomszédos momentumok ellentétesen állnak be (pl. mint a sakktábla színei), ekkor az anyag antiferromágneses. Ilyen pl. nem túl magas hőmérsékleten a króm és a mangán.

A ferromágneses anyagoknak azt a tartományát, amelynek mágnesezettsége egyirányú, **doménnek** (*domain*) nevezzük. A domének 10^{-9} - 10^{-12} cm³ térfogatú tartományok $\sim 10^{15}$ számú atommal. Egy-egy domén telítésig mágnesezett, de külső tér híján a domének mágnesezettsége rendezetlen, a szomszédos domének gyakran ellentétesen mágnesezettek, így a makroszkopikus minta össz-mágnesezettsége lényegében zérus [1]. Ha elkezdjük növelni a külső mágneses teret, akkor azon domének térfogata kezd nőni, amelyek mágnesezettségének iránya kis szöveget zár be a külső mágnesező tér irányával. Ezt a jelenséget nevezzük faletolódásnak. A faletolódásokat a különféle rácshibák, pl. szennyező atomok fékezik. Nagy mágnesező tér esetén egy másik, irreverzibilis effektus is fellép, egy-egy domén mágnesezettsége ugrásszerűen befordulhat a külső mező irányába. A domének mágnesezettségének ugrásszerű változásait *Barkhausen-ugrásoknak* nevezzük. Mivel ekkor elektromos feszültség is indukálódik, ezt ki lehet vezetni egy hangszóróra, így az ugrások sistergő, sercegő zajként hallhatóak, ezt Barkhausen-zajnak nevezzük. Az újabb kutatások szerint ilyenkor egy domén hirtelen átfordulása lavinaszerű átfordulásokat indít meg a környező doménekben és valójában ezek összesített hatásából származó zajt halljuk. A telítettséget akkor éri el az anyag, ha már minden elemi momentum a tér irányában áll, az egész anyagdarab egyetlen doménnek tekinthető.

Alkalmazások:

A ferromágneses anyagokat igen sok helyen alkalmazzák, pl. villamos gépekben is.

1. Állandó mágnes: olyan anyagot célszerű választani, amelynek a remanenciája nagy (és lehetőleg a

koercitív erő sem túl kicsi).

2. Elektromágnes: ide épp ellenkezőleg, kis remanenciájú anyagra van szükség. Ha ezeket pl. egy tekercsbe teszik és a tekercsben áram folyik, a mágnesezettség nagyra nő és az elektromágnes fel tud emelni egy vasdarabot. Ha az áramot kikapcsolják, a mágnesezettségnek töredékére kell csökkennie, különben nem tudnák leszedni róla a rátapadt vasat.

3. Transzformátor: mint később látni fogjuk – két tekercsből áll, amely közös vasmagon van. Ha az egyik (a primer) tekercsben növekvő áramerősség folyik, ott növekszik a H is, a vasmag miatt ott és a másik (a szekunder) tekercsben is nő a B, ez pedig a szekunder tekercsben elektromos térerősséget indukál. Így alakítják át a különböző feszültségeket egymásba. Alacsony ára miatt a lágyvas használata a legelterjedtebb. Jellemző rá nagy relatív permeabilitása –kb. 2000-, melyből adódóan ugyanazon értékű mágneses indukció létrehozásához csupán század annyi gerjesztőáram szükséges a tekercsekben, mint például légmagos tekercselés esetén. Mint azt említettük, a ferromágneses anyagok B-H diagramjában egy cikluson végigmenve az irreverzibilisen hővé alakult energia mennyisége egyenlő a hurok területével. Váltakozó áram esetén annak egy periódusa alatt megtörténik a hurok körüljárása a változó áramirány miatt. Így minden periódusban energiavesztés lép fel, mely energia melegíti a vastestet. Ezekből adódóan a gyakorlatban a cél az, hogy minél kisebb hurokterületű anyagot használjanak a villamos gépekben; tehát olyan anyagokat amelyek remanenciája közelítsen a 0-hoz.

Mivel a veszteségeket (melegedést) nagymértékben az örvényáramok okozzák, így ezek ellen lehetőség szerint védekezni kell. Egyik mód a vastest lemezelése. Ekkor az áramirányokra merőlegesen mintegy "felszelelik", lemezelik a vastestet. A lemezek vastagsága általában 0.25-2mm. Lemezelésnél fontos az egyes lemezek között szigetelőanyagot elhelyezni, hogy két lemez között a felületeiken keresztül áram ne folyhasson. Ezt általában vékony lakkréteggel oldják meg. Egy másik módja az örvényáramú veszteségek csökkentésének, ha nagyobb elektromos ellenállású anyagot használunk. Ezt a gyakorlatban a vas 3% szilíciummal történő ötvözésével érik el.

4. Adattárolás: az állandó mágnesekhez hasonló tulajdonságú anyagok kellenek. Korábban nagy jelentősége volt pl. a vasoxid (vagy króm-dioxid) réteggel beborított műanyag magnószalagoknak, floppy-lemezeknek. A merevlemezek (winchesterek) is hasonló, a hiszterézis jelenségén alapuló módszerrel tárolják az adatokat.

Geofizikai alkalmazás: A földtani szerkezetek vagy egyes nyersanyag-telepek (vasérc) által előidézett anomáliák nagysága a kőzetek mágneses tulajdonságainak függvénye. A mágneses geofizikai mérések tervezésében fontos a mágnesezettség ismerete, ugyanis ez alapján dönthető el, hogy a kutatott földtani test mágneses mérési módszerekkel kimutatható-e vagy sem. A mágneses anomáliák kialakításában mind az indukált, mind a remanens mágnesezettség fontos szerepet játszik.

Tapasztalatok szerint a kőzetek mágnesezettsége kevés ásvánnyal van összefüggésben. Ezek két csoportba oszthatók: vas-titánoxidokra (magnetit, ilmenit, hematit, limonit) és vasszulfidokra (pirit, pirhotin). Ezek közül a magnetitnek van kimagaslóan nagy szerepe a szuszceptibilitás kialakításában.

A fentiekből következik, hogy általában a magmás és metamorf kőzetek rendelkeznek nagyobb szuszceptibilitással. Az üledékes kőzeteké lényegesen kisebb, a legtöbb esetben el is hanyagolható.

[1] A domének nem keverendők össze a szemcsékkel. Utóbbiakban az atomok helyzete periodikusan ismétlődik és a szemcsehatáron ez megtörik, a doménekben az atomi mágneses momentumok állnak egy irányban, a szomszédos doménben pedig egy másik adott irányban. Két domént egy doménfal választ el, amely jóval szélesebb, mint a szemcsehatár.