

## Лекция №8. Заттың магниттік қасиеттері.

8.1 Магнетиктер. Магнетиктердің магнит өрісі.

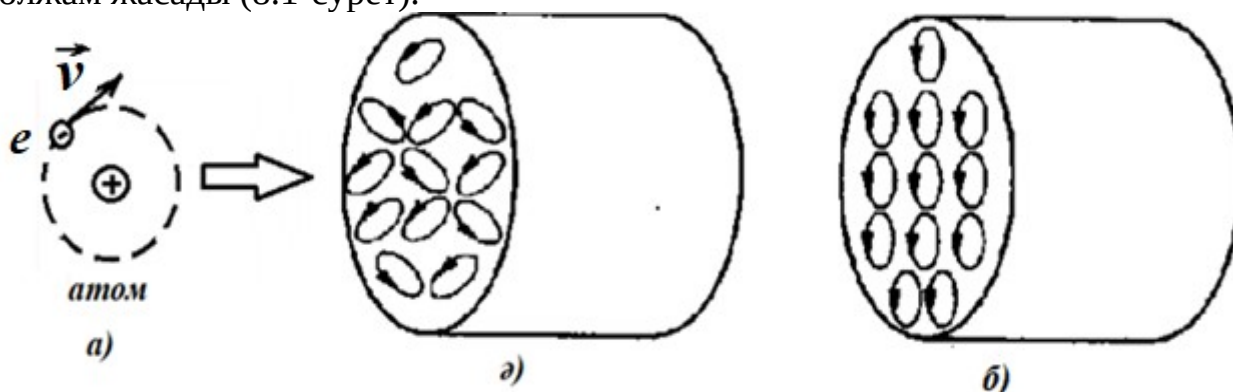
8.2 Диамагнетиктер мен парамагнетиктер табиғаты.

8.3 Ферромагнетиктер. Магниттік гистерезис. Кюри температурасы.

*8.1 Магнетиктер. Магнетиктердің магнит өрісі.* Магнит өрісіне әртүрлі заттарды енгізгенде олардың магнит өрісіне тигізетін әсерін қарастырайық.

Магнетиктер деп өздігінен магнит өрісін тудыра алатын, сыртқы магнит өрісіне ендірілгенде өзінің магнит өрісі арқылы оны өзгерте алатын заттық ортаны айтады.

Кез келген заттық ортаның өзінің меншікті магниттік қасиеттері болады, өйткені затты құрайтын жеке молекулалардың, атомдардың, оларды құрайтын электрондар мен ядролардың магниттік қасиеттері болады. Олай болса, заттың магниттік қасиеттері олардың атомдары мен олардың құрылымына, өзара әсерлесу сипатына тәуелді болады. Осы тұжырымды негізге ала отырып, Ампер 1820 жылы «Заттардың магниттік қасиеттері олардың молекулаларының дөңгелек токтарының, яғни молекулалық токтардың салдарынан болады» деген болжам жасады (8.1-сурет).

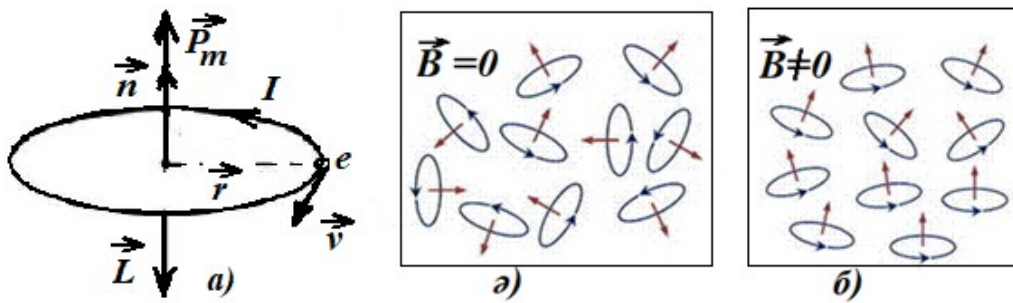


8.1-сурет: а) сыртқы магнит өрісі жоқ кезде; б) сыртқы магнит өрісіне енгізгенде.

Ампердің болжамы бойынша заттардың магниттік қасиетті молекулалық токтардың нәтижесі, сыртқы магнит өрісі жоқ кезде заттың молекулалық токтарының орбиталды магниттік моменттерінің ( $\vec{P}_m$ ) бағыты бейберекет орналасады (8.1 және 8.2-суреттің а-жағдайы), сондықтан заттың меншікті магнит өрісінің орбиталды магниттік моменттерінің ( $\vec{P}_m$ ) қорытқы мәні нөлге тең болады да, оның магниттік қасиеті білінбейді.

Затты сыртқы магнит өрісіне орналастырғанда молекулалық токтардың орбиталды магниттік моменттерінің ( $\vec{P}_m$ ) бағыты сыртқы өрістің әсерінен бағдарлана бастайды да, заттың меншікті магнит өрісінің орбиталды магниттік моменттерінің ( $\vec{P}_m$ ) қорытқы мәні нөлден өзгеше мәнге ие болады, заттың өзі магнит өрісін тудырады (8.1 және 8.2-суреттің б-жағдайы) және ол сыртқы өрісті өзгертеді.

Заттың электрондық теориясы бойынша атомдағы электрондар дөңгелек орбитамен қозғалады (8.1-суреттің а-жағдайы).



8.2-сурет

Дөңгелек орбитамен айналатын электронды дөңгелек ток деп қарастырайық. Электрон орбитасының радиусы  $r$  шеңбер бойымен  $\vec{v}$  сызықтық жылдамдықпен айналысын. Электрон дөңгелек орбитамен 1 с-та  $N$  рет айналатын болса, онда орбита бойымен 1 с-та тасымалданатын заряд шамасы ( $eN$ ) ток күшінің шамасына тең болады десек,  $I=eN$ , мұндағы айналым саны мен электронның сызықтық жылдамдығының байланысы:  $v = \frac{2\pi r N}{t} \Rightarrow t = 1 \text{ с}$ ,

$$N = \frac{v}{2\pi r} \Rightarrow I = e \frac{v}{2\pi r} \quad (8.1)$$

Электронның орбиталды магниттік моментінің  $\vec{P}_m = IS\vec{n}$  екендігі белгілі, мұндағы  $S = \pi \cdot r^2$  – дөңгелек орбитаның ауданы екендігін ескерсек:

$$P_m = \frac{1}{2} e v r \quad (8.2)$$

$\vec{P}_m$  векторының бағыты токтың бағытымен оң бұранда, ал электронның қозғалыс бағытымен сол бұранда жүйесін құрайды. Дөңгелек орбитамен айналған электронның орбиталды механикалық (импульс) моменті:

$$\vec{L}_e = m[\vec{v}\vec{r}] \Rightarrow L_e = mvr \quad (8.3)$$

$\vec{L}_e$  векторының бағыты электронның қозғалыс бағытымен оң бұранда жүйесін құрайды, яғни  $\vec{P}_m$  векторы мен  $\vec{L}_e$  векторының бағыттары бір-біріне қарама-қарсы болады (8.2-суреттің а-жағдайы).

$$\vec{P}_m \text{ векторы мен } \vec{L}_e \text{ векторының арасындағы байланыс } \vec{P}_m = \frac{-e}{2m} \cdot m[\vec{v}\vec{r}]$$

$$(8.3)\text{-өрнекті ескерсек: } \vec{P}_m = \frac{-e}{2m} \cdot \vec{L}_e \quad (8.4)$$

Мұндағы:  $g = \frac{-e}{2m}$  – *гирромагниттік қатынас* деп аталады, минус таңбасы моменттер бағытының қарама-қарсы екендігін көрсетеді.

$$\text{Сонда: } \vec{P}_m = g \cdot \vec{L}_e \quad (8.4^*)$$

Электронның орбиталды магниттік моменті ( $\vec{P}_m$ ) мен орбиталды механикалық моменті ( $\vec{L}_e$ ) арасында байланыстың болатындығын 1908 жылы О.Ричардсон болжаған болатын, 1915 жылы А.Эйнштейн мен де Гааз теориялық жолмен оны анықтады.

Электрондардың меншікті моменттерінің болуын электронды өз осінен айналып тұрған зарядталған шар ретінде қарастыра отырып түсіндіруге болады. Осыған сәйкес электронның меншікті механикалық моменті *спин* деп аталады. Спин тек электронға ғана емес, басқа да элементар бөлшектерге тән қасиет.

$$\vec{P}_{ms} = -g_s \cdot \vec{L}_s \quad (8.5)$$

мұндағы:  $g_s = \frac{e}{m}$ ,  $\vec{L}_s = \pm \frac{1}{4\pi} h$   $h$  - Планк тұрақтысы.

Жалпы жағдайда атомның магниттік моменті оның құрамына енетін электрондардың орбиталды және меншікті моменттері мен ядроның магниттік моментінің жиынтығынан тұрады. Ядроның магниттік моменті электрондардың орбиталды және меншікті моменттерімен салыстырғанда едәуір кем болағандықтан, көп мәселелерді қарастырғанда ядроның магниттік моментін ескермей кетуге болады, яғни:  $\vec{P}_a = \sum \vec{P}_m + \sum \vec{P}_{ms}$  (8.6)

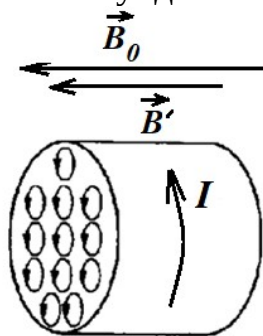
Тоғы бар өткізгіш тудыратын индукциясы  $\vec{B}_0$  болатын сыртқы магнит өрісіне магнетик зат енгенде ол магниттеледі де өзі индукциясы  $\vec{B}'$  магнит өрісін тудырады. Сонда ортадағы магнит өрісінің индукция векторы макроскопиялық ( $\vec{B}_0$ ) және микроскопиялық ( $\vec{B}'$ ) токтар тудыратын магнит өрісі индукция векторларының векторлық қосындысымен анықталады.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (8.7)$$

Жүргізілген тәжірибелер нәтижесі барлық заттарды магниттік қасиеттері бойынша, яғни кеңістікті толтырып тұрған біртекті магнетик заттың тудыратын меншікті магнит өрісінің индукциясы векторының бағыты мен сыртқы магнит өрісінің индукциясы векторының бағытына байланысты парамагнетик, диамагнетик және ферромагнетик деп үш топқа жіктеуге болатындығын көрсетеді.

**8.2 Парамагнетиктер мен диамагнетиктер табиғаты.** Сыртқы магнит өрісінің әсерінен магнетик заттың тудыратын меншікті магнит өрісі индукциясы векторының бағыты сыртқы магнит өрісі индукциясы векторының бағытымен бағыттас болса, ортаның қорытқы магнит өрісі индукциясы векторы олардың қосындысымен анықталады ( $B = B_0 + B'$ ), сондықтан ортадағы өріс шамасы күшейеді. Мұндай қасиетке ие заттарды *парамагнетиктер* деп атайды. Парамагнетиктердің магнит өтімділігі  $\mu > 1$ , олардың тудыратын меншікті магнит өрісі индукциясының шамасы негізінен сыртқы магнит өрісі индукциясының шамасынан кіші болады  $B' < B_0$ .

Парамагнетиктік қасиетке ие заттарды сыртқы магнит өрісіне енгізгенде молекулалық токтарының бағыты оның тудыратын меншікті магнит өрісінің индукциясы векторының бағыты сыртқы магнит өрісінің индукциясы векторының бағытымен бағыттас болатындай ретпен бағытталады, осы құбылыс парамагнетиктің магниттелуі деп аталады (8.3-сурет).

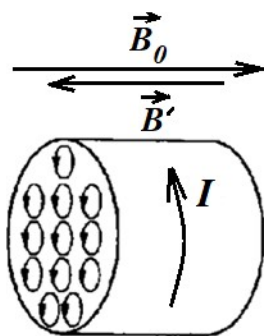


8.3-сурет

Парамагнетиктер әлсіз магниттік заттарға жатады, вакуумде олардың магнит өтімділігі диамагнетиктердің магнит өтімділігіне өте жақын болады, сондықтан парамагнетик заттардың сыртқы өріске әсері немесе сыртқы өрістің осы заттарға әсері байқалмайды. Парамагнетиктік қасиетке ие заттарға алюминий (Al), платина (Pt), вольфрам (W), сілтілі металдар, жер-сілтілі металдар, олардың қорытпалары, оттегі(O), азот оксиді (NO), марганец оксиді (MnO) т.б. жатады. Сыртқы магниттеуші өрістен тыс жерде парамагнетиктердің меншікті магнит өрісі болмайды, магнит өтімділігі температураға тәуелді болады және температураның артуымен магнит өтімділігі төмендейді.

Сыртқы магнит өрісінің әсерінен магнетик заттың тудыратын меншікті магнит өрісі индукциясы векторының бағыты сыртқы магнит өрісі индукциясы векторының бағытына қарама-қарсы болса, ортаның қорытқы магнит өрісі индукциясы векторы олардың айырмасымен анықталады ( $B = B_0 - B'$ ), сондықтан ортадағы өріс шамасы әлсірейді. Мұндай қасиетке ие заттар *диамагнетиктер* деп аталады. Диамагнетиктердің магнит өтімділігі  $\mu < 1$ , диамагнетиктер тудыратын меншікті магнит өрісі индукциясының шамасы әрқашан сыртқы магнит өрісі индукциясының шамасынан кіші болады ( $B < B_0$ ).

Диамагнетиктік қасиетке ие заттарды сыртқы магниттеуші өріске енгізгенде молекулалық токтар индукцияланады, индукцияланған молекулалық токтарының бағыты оның тудыратын меншікті магнит өрісінің индукциясы векторы бағыты сыртқы магнит өрісінің индукциясы векторының бағытына қарама-қарсы болатындай ретпен бағытталады, сондықтан ондай заттар өрісті әлсіретеді (8.4-сурет).



8.4-сурет

Диамагнетиктік қасиеті бар заттарға инертті газдар, азот ( $N_2$ ), сутегі ( $H_2$ ), германий (Ge), кремний (Si), мыс (Cu), мырыш (Zn), фосфор (P), висмут (Bi), алтын (Au), күміс (Ag), шайыр, су, шыны т.б. жатады. Сыртқы магниттеуші өріс болмаған жағдайда диамагнетик заттардың молекулалары мен атомдарының магниттік моменттері ( $\vec{P}_m = 0$ ) нөлге тең болады.

Сыртқы магнит өрісіне магнетик затты енгізгенде ортаның магниттелу дәрежесін сипаттау үшін магниттелу векторы  $\vec{i}$  деген шама енгізіледі.

*Магниттелу векторы  $\vec{i}$  деп ортаның бірлік көлеміндегі магнит моментіне тең шаманы айтады.*

Магнетик ортаның  $V$  көлемі ішіндегі молекулаларының магниттік моменттерінің қосындысы  $\vec{P}_m = \sum \vec{P}_{mi}$  болсын. Сонда біртекті магниттелген магнетиктердің магниттелу векторы мына өрнекпен анықталады:

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{V} \quad (8.8)$$

Магниттелу векторының сан мәні ұзындық бірлігіне келетін молекулалық токтың күшіне тең болады, ал бағыты Магнетик заттың тудыратын меншікті магнит өрісінің индукциясы векторының ( $\vec{B}'$ ) бағытына сәйкес келеді, яғни

$$\vec{B}' = \mu_0 \cdot \vec{J} \quad (8.9)$$

Жүргізілген көптеген эксперименттер ферромагнетик емес заттар үшін магниттелу векторының ( $\vec{J}$ ) шамасы сыртқы магнит өрісінің кернеулік векторының ( $\vec{H}_0$ ) шамасына тура пропорционал болатындығын көрсетеді, яғни

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}_0, \quad (8.10)$$

мұндағы:  $\chi$  - магниттелу коэффициенті немесе *магниттік алғырлық (қаблеттілік)* деп аталатын өлшем бірліксіз пропорционалдық коэффициент.

Магниттік алғырлық ( $\chi$ ) шамасы әртүрлі магнетиктерде әртүрлі, мысалы диамагнетик заттар үшін магниттік алғырлықтың шамасы теріс мәнге ( $\chi < 0$ ) тең болса, парамагнетик заттар үшін оң мәнге ( $\chi > 0$ ) тең болады.

Заттық ортадағы қорытқы магнит өрісінің индукциясы векторының өрнегіне, яғни (8.7)-өрнекке  $\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}_0$  және (8.9), (8.10)-өрнектерді апарып қойса:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \mu_0 \cdot \vec{H}_0 + \mu_0 \cdot \vec{J} = \mu_0 \cdot \vec{H}_0 + \mu_0 \cdot \chi \cdot \vec{H}_0 = (1 + \chi) \mu_0 \cdot \vec{H}_0$

мұндағы:  $1 + \chi = \mu$  – ортаның магниттік қасиетін сипаттайтын магнит өтімділігі деп аталатын пропорционалдық коэффициент. Сонда:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}_0 \quad (8.11)$$

Магнит өрісінің кернеулік векторының циркуляциясы арқылы заттық ортадағы толық ток заңын былайша жазуға болады:  $\oint \vec{H}_L \cdot d\vec{l} = \int (I + I')$  немесе

$$\oint \vec{B}_L \cdot d\vec{l} = \mu \cdot \mu_0 \cdot (I + I') \quad (8.12)$$

мұндағы:  $I$  және  $I'$  - макро және микротоктардың алгебралық қосындысы.

Сонымен, тұйық контурдағы магнитөрісінің индукция векторының циркуляциясы өткізгіштегі ток пен молекулалық токтардың алгебралық қосындысын  $\mu \cdot \mu_0$ -ға көбейткенге тең болады.

**8.3 Ферромагнетикдердің табиғаты. Магниттік гистерезис. Кюри температурасы.** Сыртқы магнит өрісі болмаған жағдайдың өзінде магниттелуге бейім заттар болады, олардың магнит өрісі индукциясының шамасы сыртқы магнит өрісі индукциясының шамасынан артық болады ( $B' > B_0$ ). Сыртқы магнит өрісінің әсерінен мұндай заттар тудыратын магнит өрісі индукциясы векторының бағыты сыртқы магнит өрісі индукциясы векторының бағытымен бағыттас болады, сондықтан ортаның қорытқы магнит өрісінің индукциясы олардың қосындысымен анықталады ( $B = B_0 + B'$ ), сондықтан ортадағы магнит өрісінің шамасы өте көп күшейеді. Осындай қасиетке ие заттарды *ферромагнетиктер* деп атайды, өйткені ең алғаш бұл қасиет темірде байқалған. Ферромагнетиктердің магнит өтімділігі  $\mu \gg 1$  болуымен ерекшеленеді.

Ферромагнетиктерге темір ( $Fe$ ), никель ( $i$ ), кобальт ( $Co$ ), гадолиний ( $Gd$ ), олардың қорытпалары мен қоспалары ( $Fe+i$ ), ( $Fe+i+Al$ ) және ферромагнитті емес металдардың қорытпалары ( $61,5\%Cu+23,5\%Mn+15\%Al$ ), сол сияқты ( $Mn+Bi$ ), ( $Cr+Te$ ) қорытпалары жатады.

Диамагнетиктер мен парамагнетиктер нашар магниттелетін заттар, олармен салыстырғанда ферромагниттердің магниттелуі өте көп артық, сондықтан олар күшті магниттелетін заттар болып саналады.

Ферромагнетиктердің магнит өтімділігі өте жоғары ( $\mu \gg 1$ ), ол сыртқы магнит өрісі кернеулігінің шамасына тәуелді болады. Сыртқы магнит өрісінен алшақтатқанның өзінде ферромагнетиктер магниттелуін ұзақ уақыт сақтай алады, «қалдық» магниттелуі болады. Ферромагниттердің мұндай қасиеттерін олардың домендер деп аталатын кішігірім ерекше аймақтардан тұратын құрылымдық ерекшеліктерімен түсіндіреді. Домендер өлшемдері  $10^{-3} \div 10^{-4}$  см-ге жуық ұсақ магниттік тілшеге ұқсас магнетиктер болып келеді. Домендер өздігінен магниттелу аймағын түзіп, ферромагниттік қанығуға дейін өздігінен магниттеледі де, белгілі бір магнит моментіне ( $\vec{P}_m$ ) ие болады. Әр домендердің магнит моменттерінің бағыттары түрліше болады, сыртқы магнит өрісі болмаған жағдайда барлық моменттердің қосындысы ( $\vec{P}_m=0$ ) нөлге тең болады. ферромагнетиктерді сыртқы магнит өрісіне енгізгенде өріс әсерінен домендердің магнит моменттері ( $\vec{P}_m$ ) сыртқы магнит өрісінің бағытымен реттеледі де ферромагниттердің магнит өтімділігінің тез өсуіне мүмкіндік туады.

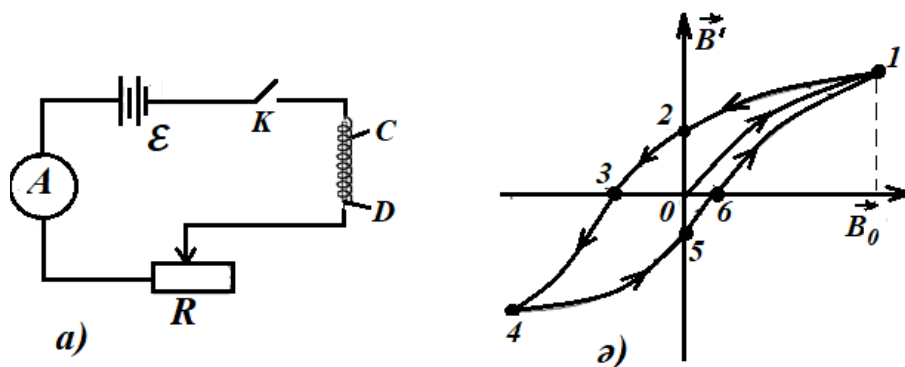
Кристалл ферромагнетиктерде, мысалы темір кристалдарында анизотропты магниттік қасиеттер байқалады, яғни бір бағыттарда кристалл оңай магниттелсе, екінші бағыттарда оның магниттелуі баяу өтеді. Егер ферромагнетик ұсақ кристаллдардан құралатын болса, онда магниттік қасиеттері изотропты болып шығады.

Ферромагнетиктерге тән құбылыс гистерезис (кешігу). Осы құбылысқа тоқталайық. 8.5-суреттің а) бөлігінде келтірілгендей электр тізбегін жинақтап, ЭҚК-і  $E$  болатын ток көзіне жалғап,  $K$  кілті арқылы тізбекті тұйықтайық.  $R$  реостаттың көмегімен  $C$  соленоидтегі ток күшінің шамасын біртіндеп арттырғанда ондағы магнит өрісі индукциясының ( $\vec{B}_0$ ) шамасы артады, онымен ілесе соленоидтың  $D$  темір өзекшесінде (ферромагнитте) пайда болатын магнит өрісі индукциясының ( $\vec{B}'$ ) шамасы алғашқыда тез артады да, кейінірек баяулай бастайды (8.5-суреттің ә) бөлігіндегі 0-1 қисығы). Осының әсерінен бір мезетте  $D$  темір өзекшедегі домендердің бағыттары сыртқы магнит өрісіне бағыттас болып, 1-нүктеде магниттелу қанығуына жетеді.

Одан соң тізбектегі  $I$  токтың шамасын реостат арқылы біртіндеп төмендеткенде, соленоидтағы магнит өрісінің шамасы кемиді, соның салдарынан темір өзекшенің магниттелуінің кемиді (1-2 қисығы). Тізбекті кілт арқылы ток көзінен айырғанда сыртқы магнит өрісі кемиді де  $\vec{B}_0=0$  болғанда темір өзекшедегі магнит өрісі индукциясы  $\vec{B}'$  әлі де болса нөлге тең болмайды, яғни қалдық магниттелуі байқалады (0-2 қисығы). Қалдық магниттелудің болу себебі сыртқы магнит өрісі жойылғанда да темір өзекшедегі домендер



өздерінің магнит моменттерін ( $\vec{P}_m$ ) толығымен жоғалтпайтындығын білдіреді. Осы қалдық магниттелуді жою үшін соленоидтағы кері токты арттырып, темір өзекшедегі магнит өрісі индукциясы  $\vec{B}'$  нольге тең болатын жағдайға алып келуге болады (3-нүкте). Тізбектегі кері токты одан әрі арттыра бастағанда темір өзекше қайтадан магниттеле бастайды да (3-4 қисығы), темір өзекше кері токтың әсерінен магниттелудің қанығуына жетеді (4-нүкте). Осы сәтте тізбекті ток көзінен ажыратқанда темір өзекшенің магниттелуі біртеңдеп кему бастайды (4-5-6).



8.5-сурет

8.5-суреттің ә) бөлігіндегі 0-5 қисығы бұл жағдайда да қалдық магниттелудің болатындығын көрсетеді. Қайтадан тізбектегі тура токтың шамасын біртіндеп арттырғанда темір өзекшенің магниттелуінің артатындығын байқаймыз (6-1 қисығы). 8.5-суреттің ә) бөлігіндегі 0-1, 6-1, 3-4 қисықтары магниттелу қисықтары, ал 1-2-3 және 4-5-6 қисықтары магнитсіздендіру қисықтары деп аталады. Магнитсіздендіру қисықтарының магниттелу қисықтарынан қалып қоюын немесе кешігуін *гистерезис* деп атайды.

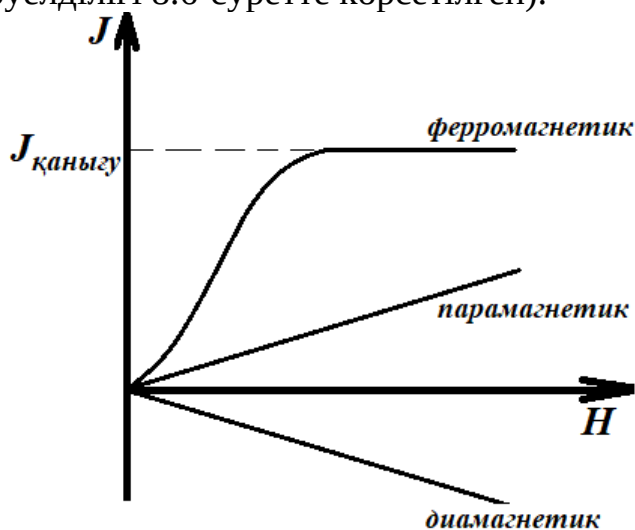
1-2-3-4-5-6 толық тұйық сызба *гистерезис тұзағы* деп аталады. Ордината осіндегі 0-2 және 0-5 кесінділері қалдық магниттелуді сипаттайды. Ал абсцисса осіндегі 0-3 және 0-6 кесінділері кідірткіш (коэрцитивті) күш деп аталады. Ол қалдық магниттелуді жою үшін қажетті сыртқы магнит өрісінің индукциясы ( $\vec{B}_0$ ) тарапынан болатын әсер. Кідірткіш күштің шамасына байланысты ферромагнетиктер «жұмсақ» магниттік және «қатаң» магниттік материалдар болып екіге бөлінеді. «Жұмсақ» магнитке жұмсақ темір, темірдің никелді қорытпасы (пермалой) жатады. Олар трансформаторлардың өзектерін жасауға қолданылады. «Қатаң» магнитке көміртекті және арнаулы болаттардан (Fe, Al, Cu, Ni, CO) тұратын «магнито» деген қорытпалар жатады. Осындай материалдар тұрақты магниттерді жасауда пайдаланады.

Ферромагнитті денелер магниттелгенде олардың сызықтық өлшемдері мен көлемдері де өзгереді, яғни деформацияланады. Бұл құбылыс магнострикция деп аталады. Бұл құбылысты 1842 жылы Джоуль ашты.

Ферромагнетизм теориясын алғаш П.Вейс жасады, оны кванттық механика тұрғысынан Я.И.Френкель мен В.Гейзенберг дамытты.

Ферромагнетик заттарды сыртқы магнит өрісіне енгізгенде олардың магниттелуі қанығу күйіне тез жетеді, ал парамагнетик заттардың магниттелуі қанығу күйінен алшақ болады, өйткені сыртқы өріс шамасы үлкен болған жағдайдың өзінде парамагнетиктердің молекулаларының сыртқы өріс

бағытымен бағдарлануы бірыңғай болмайды. (Магнетиктерді сыртқы магнит өрісіне енгізгенде олардың магниттелу векторының сыртқы магнит өрісінің кернеулігіне тәуелділігі 8.6-суретте көрсетілген).



8.6-сурет

Сыртқы магнит өрісінің кернеулігінің шамасын біртіндеп арттыра бастағанда ферромагнетиктік заттың молекулалық магнит моменттерінің өріске бағдарлану дәрежесі пропорционал түрде арта бастайды да, магнит өрісі кернеулігі бір шамасына жеткеннен бастап бірте-бірте баяулап, өріс бағытымен бағдарланып үлгермеген магниттік моменттер саны мүлдем азайып, магниттелу  $J_{\text{қанығу}}$  қанығу дәрежесіне жетеді. Парамагнетик заттардың магниттелу векторы төменгі температураларда сыртқы магнит өрісінің үлкен мәндерінде ғана қанығу дәрежесіне жетуі мүмкін.

Ферромагнетиктерді белгілі бір температураға дейін қыздырғанда олардың магниттік қасиеттері түгелдей жойылады. Ферромагнетиктердің магниттік қасиеттері түгелдей жойылатын температураны Кюри температурасы деп атайды. Кюри температурасынан жоғарғы температурада ферромагнетиктер парамагнетикке айналады. Ферромагнетикті Кюри температурасынан төменгі температураға дейін салқындатқанда қайтадан домендер пайда болады да, ол қайтадан ферромагнетикке айналады.

Парамагнетиктердің  $\chi$  магниттелу коэффициенті П.Кюри заңымен анықталады: 
$$\chi = \frac{C}{T} \quad (8.13)$$

мұндағы:  $C$  - берілген зат үшін тұрақты шама - Кюри тұрақтысы деп аталады.

Кюри температурасына жеткенде ферромагнетиктерде екінші фазалық ауысумен байланысты бірқатар физикалық қасиеттерінің өзгеріс сипаттарында ауытқушылық байқалады. Кейбір жағдайларда ол антиферромагнетиктердің пайда болуына ықпал жасайды. Антиферромагнетиктер туралы алғашқы тұжырымды 1933ж. Л.Ландау ашқан болатын.

Антиферромагнетиктерде электрондардың меншікті магнит моменттері өздігінен бір-біріне антипараллель болып бағдарланады да, ол көрші атомдарға әсерін тигізеді. Нәтижесінде антиферромагнетиктердің магниттік алғырлығы өте аз шамаға ие болады, олардың қасиеттері өте әлсіз парамагнетиктер қасиеттеріне ұқсайды.



Техникада феррит деп аталатын магниттік заттардың алатын орны орасан, өйткені оларда электротехникалық сипаты жағынан зиянды болып саналатын құйынды токтар болмайды. Ферриттер электрлік қасиеттері бойынша жартылай өткізгіштерге жатады. Олардың кедергілері өте жоғары ( $\approx 10^2 - 10^8$ ) Ом·м. Ферриттерді өте ұсақталған металл оксидтерін араластырып, оларды 900-1500°C температурада пісіру арқылы жасайды. Олардан тұрақты магниттер, трансформатордың өзекшелерін, индукциялық катушкалардың стержендерін және т.б. жасайды.

#### **Бақылау сұрақтары**

1. Магнетиктердің магнит өрісінің табиғаты туралы пікіріңді айт.
2. Парамагнетиктер мен диамагнетиктердің магниттік қасиеттерінің ерекшеліктерін баянда.
3. Ферромагнетиктердің магнит өрісінің табиғатын түсіндір.
4. Магниттік гистерезис құбылысын түсіндір.
5. Кюри температурасында ферромагнетиктердегі құбылыстар туралы баянда.