

# WŁASNOŚCI MAGNETYCZNE MINERALÓW

opracowanie dr inż. Andrzej Łuszczkiewicz

## 1. WSTĘP

Jedną z najważniejszych metod rozdziału mieszanin minerałów, znajdującą zastosowanie w przeróbce wielu surowców mineralnych jest rozdział ziarn przy wykorzystaniu różnic we własnościach magnetycznych minerałów - nazwany **separacją magnetyczną** lub **wzbogacaniem magnetycznym**. Rozdział ten polega na wprowadzeniu mieszaniny ziarn minerałów w przestrzeń oddziaływania pola magnetycznego, wytworzonego np. pomiędzy biegunami magnesu (elektromagnesu); w polu magnetycznym ziarna zachowują się w różny sposób zależnie od ich własności fizycznych a w szczególności od ich własności magnetycznych. Magnetyczne własności ciał stałych, w tym także i minerałów charakteryzuje się wielkością zwaną podatnością magnetyczną  $\chi$ , zdefiniowaną następująco:

$$\chi = \mu - 1 = B/B_0 - 1$$

gdzie:  $\mu$  - względna przenikalność magnetyczna (wielkość bezwymiarowa)  
 $B$  - indukcja magnetyczna w ciele stałym  
 $B_0$  - indukcja magnetyczna w próżni

W praktyce częściej używa się wielkości zwanej podatnością magnetyczną właściwą definiowaną następującą formułą:

$$X = \chi/\delta, [m^3/kg]$$

gdzie  $\delta$  jest gęstością substancji w  $kg/m^3$ .

*Określenie podatności magnetycznej właściwej będzie jednym z celów tego ćwiczenia.*

Własności magnetyczne minerału są wypadkową własności magnetycznych pierwiastków chemicznych, z których zbudowany jest minerał. Własności magnetyczne pierwiastka silnie zależą od temperatury i wynikają z budowy jego atomu a głównie ze struktury jego zewnętrznej powłoki elektronowej i są opisywane tzw. wypadkowym momentem magnetycznym definiowanym jako suma wektorowa momentu orbitalnego i spinowego elektronów. Na tej podstawie fizyka dzieli ciała stałe w tym także i minerały na 5 grup [1, 2]:

- **diamagnetyki** ( $X < 0$ ) np. kwarc  $SiO_2$ , korund  $Al_2O_3$ , kalcyt  $CaCO_3$ , dolomit  $CaCO_3MgCO_3$ , baryt  $BaSO_4$ , magnezyt  $MgCO_3$ , sfaleryt  $ZnS$ , galena  $PbS$ , chalkozyn  $Cu_2S$ , cyrkon  $ZrSiO_4$ , rutil  $TiO_2$ , anhydryt  $CaSO_4$ , gips  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , skalenie np. ortoklaz (skaleń potasowy),  $K[AlSi_3O_8]$  lub albit (skaleń sodowy),  $Na[AlSi_3O_8]$ .
- **paramagnetyki** ( $X > 0$ ) np. piryt  $FeS_2$ , markasyt  $FeS_2$ , bornit  $Cu_5FeS_4$ , chalkopiryt  $CuFeS_2$ , getyt  $FeOOH$ , almandyn  $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$  (minerał z grupy granatów).
- **antyferromagnetyki** ( $X = f(H)$ ) np. hematyt  $Fe_2O_3$ , ilmenit  $FeTiO_3$ , syderyt  $FeCO_3$ , limonit, monacyt  $(Ln)PO_4$ , turmalin, piroluzyt  $MnO_2$ .
- **ferrimagnetyki** ( $X = f(H)$ ) np. magnetyt  $Fe_3O_4$ , maghemit  $\gamma-Fe_2O_3$ , pirotyn  $FeS$ .
- **ferromagnetyki** ( $X = f(H)$ ) np. żelazo rodzime, żelazo-platyna, żelazo-nikiel oraz wytworzone przez człowieka stopy żelaza jak np. stal.

gdzie  $H$  - natężenie pola magnetycznego

Własności magnetyczne minerałów silnie zależą od niemal zawsze obecnych w ich strukturze zanieczyszczeń lub domieszek izomorficznych pierwiastków "silnie magnetycznych" (wykazujących własności ferromagnetyczne) takich jak żelazo, nikiel, kobalt i niektóre lantanowce jak samar, dysproz a zwłaszcza terb. Domieszki tych

pierwiastków mogą na tyle zmienić własności minerałów, że np. minerał z teoretycznie (tzn. w stanie "czystym") wykazujący własności diamagnetyczne staje się antyferromagnetycznym. Stąd często można zauważyć poważne różnice w klasyfikacjach minerałów według ich własności magnetycznych, podawane przez różnych autorów.

Podatność magnetyczną ciał o *własnościach magnetycznych stałych* określa się metodami statycznymi Faradaya lub Gouya posługując się tzw. wagami magnetycznymi (różnej konstrukcji dla obu metod) oraz mając do dyspozycji bryłkę badanego minerału o określonej objętości [3]. Podatność magnetyczną materiałów sypkich można wyznaczyć w warunkach dynamicznych w separatorze izodynamicznym typu Frantz metodą Nesseta-Fincha [4].

Pomiar podatności magnetycznej ciał stałych, których *własności zależne są od natężenia pola magnetycznego  $H$* , wykonuje się w urządzeniach z niejednorodnym polem magnetycznym, wyznaczając tzw. krzywe namagnesowania. Pomiaru podatności magnetycznej takich ciał w postaci sypkiej można też dokonać przy pomocy separatora typu Frantz [4].

Z technologicznego punktu widzenia, surowce mineralne, trochę niezależnie od ich natury fizycznej i przedstawionego powyżej podziału ciał stałych, dzielimy na cztery grupy [2], t.j. minerały:

- silnie magnetyczne (np. magnetyt, maghemit, pirotyn),
- średnio magnetyczne (np. syderyt, ilmenit, hematyt, granaty, ksenotym, )
- słabo magnetyczne (np. limonit, monacyt, ciemny rutil, piryt, piroluzyt)
- niemagnetyczne (np. kwarc, kalcyt, skalenie, gips, cyrkon, rutil).

Podatność magnetyczną niektórych surowców można zmieniać drogą tzw. prażenia magnetyzującego. Dotyczy to szczególnie niektórych rud żelaza zawierających słabomagnetyczne minerały użyteczne o własnościach paramagnetycznych jak limonit, syderyt i niektóre odmiany hematytu. Prażenie takich surowców w temperaturze 600 - 800°C w atmosferze obojętnej powoduje zmianę wymienionych minerałów w magnetyt  $Fe_3O_4$  lub maghemit  $\gamma-Fe_2O_3$  lub też na ferryty które wykazują silne własności magnetyczne i łatwo można je wydzielić drogą wzbogacania (separacji) magnetycznego. Urządzenia służące do realizacji procesu separacji magnetycznej są nazywane separatorami lub wzbogacalnikami magnetycznymi. Omówienie różnych typów separatorów magnetycznych przewidziane jest w programie wykładów.

W procesie separacji magnetycznej ważną rolę odgrywają następujące parametry:

1. natężenie pola magnetycznego w przestrzeni roboczej separatora,
2. podatność magnetyczna rozdzielanych materiałów,
3. wielkość ziarn,
4. opór ruchu ziarn wywołany siłami grawitacji i tarcia,

oraz jak w każdym procesie wzbogacania, stopień uwolnienia ziarn.

W celu wyraźnego obniżenia wpływu grawitacji i tarcia na proces separacji magnetycznej w praktyce stosowane są różnego typu separatory wykorzystujące obracające się bębny (wałki), wibrujące rynienki, w których rozdzielane minerały, w obszarze działania pola magnetycznego, są przesuwane ruchami skokowymi. Dla podwyższenia skuteczności procesu ziarna mogą być poddawane separacji magnetycznej zawieszanie wodnej. Ten ostatni sposób pozwala na przeprowadzenie separacji nawet dla materiału bardzo drobnoziarnistego (np. <0.01-0.001mm).

## 2. LABORATORYJNY SEPARATOR MAGNETYCZNY FRANTZ'A

W laboratoryjnych badaniach nad magnetycznym rozdziałem mieszanin mineralnych szczególnie przydatny jest skonstruowany przez S. Frantz'a w 1936 roku izodynamiczny separator magnetyczny. Jest to urządzenie laboratoryjne służące do testowania własności minerałów i ich mieszanin. Służy on do precyzyjnego rozdziału

minerałów wykazujących nawet bardzo słabe własności magnetyczne oraz nieznacznie różniących się podatnością magnetyczną. Separator ten pracuje na sucho choć znane są jego wersje pracujące na mokro. Cechą szczególną tego urządzenia, odróżniającą go od innych powszechnie stosowanych typów separatorów magnetycznych (gdzie materiał magnetyczny jest przyciągany) jest charakterystyka pola magnetycznego w przestrzeni roboczej powodująca odpychanie minerałów ("wypychanie"). Zasadniczą częścią tego separatora jest elektromagnes składający się z dwóch zwojnic nawiniętych na rdzeń tworzący dwa bieguny, pomiędzy którymi znajduje się rynienka. Pomiedzy biegunami, w przestrzeni roboczej (na rynience) wytwarza się pole, którego linie sił skierowane są antyrównoległe w przeciwnych kierunkach. W celu obniżenia wpływu sił tarcia na separowany materiał, do rynienki przymocowany jest trwale wibrator, który przekazuje swoje drgania do nachylonej rynienki wymuszając tym ruch (przesypywanie się) ziarn rozdzielanego materiału. Amplituda drgań wibratora jest regulowana. Nadawa przeznaczona do separacji podawana jest na rynienkę za pomocą lejka - którego odkręcanie lub dokręcanie reguluje ilość zasypywanego materiału.

Separator posiada szczególnie przydatną cechę - możliwość płynnej regulacji wielkości pola magnetycznego - kontrolowanego natężeniem płynącego przez zwojnice prądu przy pomocy wbudowanego w korpusie amperomierza. Konstrukcja separatora Frantz'a pozwala na dowolne ustawienie położenia rynienki transportującej ziarna minerałów w czasie separacji magnetycznej - regulując nachylenie wzdłużne i poprzeczne. Wypadkowa wszystkich wyżej wymienionych parametrów: natężenia pola magnetycznego, amplitudy drgań rynienki, ilości zasypywanego przez lejek materiału i położenie rynienki transportującej - pozwalają na precyzyjny rozdział minerałów o zbliżonych podatnościach magnetycznych jak również na jej wyznaczenie. Np. dla minerałów paramagnetycznych, dla których podatność nie zależy od natężenia pola magnetycznego, podatność właściwą można wyznaczyć ze wzoru opracowanego przez Nesseta i Fincha [4]:

$$X=19.2 \sin\Theta_{50} \cdot 10^{-6}/I^2$$

gdzie:

$\Theta_{50}$  - kąt nachylenia bocznego elektromagnesu, przy którym 50% materiału rozdzielonego trafia do frakcji magnetycznej, a drugie 50% do niemagnetycznej.

I - natężenie prądu zasilającego elektromagnes,

### 3. WYKONANIE ĆWICZENIA

*UWAGA!*

*Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia należy zdjąć z rąk zegarki zwłaszcza elektroniczne, jak i wyjąć z kieszeni inne urządzenia elektroniczne (np. kalkulatory itp.), które w wyniku działania pól magnetycznych mogą ulec nieodwracalnym uszkodzeniom.*

Celem ćwiczenia jest określenie podatności magnetycznej właściwej badanego minerału oraz stwierdzenie jakiego rodzaju własności magnetyczne minerał ten wykazuje. Badanie to określono nazwą procedury Nesseta-Fincha.

#### A. **Materiał do badań.**

Do badań przygotowano jednorodny materiał o uziarnieniu 0.1-0.2 mm stanowiący minerał z grupy granatów: *almandyn*  $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ , pochodzący z jednego z rozsypisk Dolnego Śląska.

#### B. **Wykonanie badania**

1. Odważyć w naczyniu wagowym 5 g badanego minerału.
2. Sprawdzić kompletność wyposażenia separatora zwłaszcza właściwe umieszczenie naczynek odbierających rozdzielone produkty separacji i zwrócić uwagę na kolor i przeznaczenie naczynek: srebrne na produkt niemagnetyczny (FN), złote na produkt magnetyczny (FM).

3. Ustawić według wskazówek prowadzącego i zanotować kąty bocznego ( $\Theta^\circ$ ) i wzdłużnego nachylenia separatora.
4. Sprawdzić czy pokrętko regulacji amperomierza i wibratora ustawione są na zerze.
5. Włączyć prąd zasilający uzwojenie elektromagnesu i kierując się wskazaniem amperomierza nastawić odpowiednie (wg polecenia prowadzącego) natężenie prądu  $I_1$ . Do zakręconego lejka nadawczego separatora wsypać naważkę badanego minerału następnie włączyć zasilanie wibratora i ustawić jego drgania pokrętkiem na głośne "brzęczenie". Powoli odkręcać lejek nadawczy obserwując pojawienie się cienkiego strumienia materiału wysypującego się z lejka materiału i doprowadzając strumień do stałej niewielkiej wydajności.
6. Po przepuszczeniu przez separator całej masy naważki, produkty rozdziału poważyc, wagi produktów zanotować i wyliczyć wychody  $\gamma$ , %. Oba produkty połączyć (zsypać razem) i materiał wsypać powtórnie do lejka nadawczego separatora powtarzając całą operację rozdziału od początku. Porównać oba wyniki i jeśli wychody procentowe produktów nieznacznie się różnią wyliczyć średnie arytmetyczne mas produktów, wyliczyć wychody ostateczne i wpisać je do tabeli wyników.
7. Zwiększyć o  $2^\circ$  kąt nachylenia bocznego separatora i powtórzyć wszystkie operacje opisane w poprzednim punkcie.
8. Zwiększyć o następne  $2^\circ$  kąt nachylenia bocznego separatora i powtórzyć wszystkie operacje opisane w punkcie 6.
9. Zwiększać lub zmniejszać o  $2^\circ$  kąt nachylenia bocznego separatora i powtarzać wszystkie operacje opisane w punkcie 6 zwracając uwagę by wśród otrzymanych wyników (wyliczonych wychodów produktów FM i FN) wszystkich doświadczeń znalazły się takie dla których wychody np. FM znajdują się w pobliżu 50% oraz są znacznie większe i znacznie mniejsze od 50%.
10. Wykonać drugą serię pomiarów: zwiększyć nieznacznie natężenie prądu zasilającego uzwojenie separatora do wartości  $I_2$  i powtórzyć wszystkie operacje opisane w punktach 5 do 9. Wymagana jest tylko nieznaczna zmiana natężenia prądu zasilającego, rzędu  $0.2 \div 0.4$  A, gdyż taka właśnie już wywołuje wystarczająco, dla tego pomiaru, silną zmianę w natężeniu pola magnetycznego.
11. Wykonać trzecią serię pomiarów: zwiększyć nieznacznie natężenie prądu zasilającego uzwojenie separatora o kolejne  $0.2 \div 0.4$  A, do wartości  $I_3$  i powtórzyć wszystkie operacje opisane w punktach 5 do 9. Ten punkt wykonać jeśli pozwoli na to czas przeznaczony na ćwiczenie.

#### 4. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ.

Sporządzić sprawozdanie z wykonanego ćwiczenia zgodnie z zasadami podanymi na pierwszych (wprowadzających) zajęciach.

Wyniki z wszystkich trzech (dwóch) serii pomiarów wpisać i opracować zgodnie z podaną w dalszej części [tabelą](#).

Wyniki zestawione w tabeli nanieść na papierze milimetrycznym na wykresy  $\gamma = f(\Theta)$  i odczytać wartości kąta  $\Theta_{50}$ , (dla wychodu  $\gamma = 50\%$ ) dla przyjętych ustawień natężenia pola magnetycznego następnie wyliczyć kolejne wartości podatności magnetycznej właściwej dla badanego minerału dla poszczególnych serii doświadczeń, według wzoru:

$$X = \frac{19.2 \sin \Theta_{50} \cdot 10^{-6}}{I^2}$$

Oceń i przedyskutować otrzymane wyniki i podać wnioski końcowe z badań.

## 5. Bibliografia

1. **Detlaw A.A., Jaworski B.N.**, *Elektryczność i magnetyzm*. PWN Warszawa 1970
2. **Blaschke Z. i inni**, *Górnictwo. Cz.V. Zarys technologii procesów przerobczych*. Skrypty uczelniane AGH, Nr 931. Kraków 1981.
3. **Praca zbiorowa**, *Poradnik Górnika, Tom V*. Wyd. Śląsk, Katowice 1976.
4. **Nesset J.N., Finch J.A.**, *Determination of magnetic parameters for field dependent susceptibility minerals by Frantz isodynamic magnetic separator*. Trans. Inst. Min. Metall. (sec.C), v.89, 1980, C161-C166.
5. **Tabela 1.** Wyniki badań podatności magnetycznej właściwej według procedury Nesseta-Fincha

I <sub>1</sub> =			I <sub>2</sub> =			I <sub>3</sub> =		
Θ°	[g]	γ, %	Θ°	[g]	γ, %	Θ°	[g]	γ, %
	FM=							
Θ <sub>1</sub> =	FN=		Θ <sub>1</sub> =			Θ <sub>1</sub> =		
	Σ=	100.0						
Θ <sub>2</sub> =								
Θ <sub>3</sub> =								
Θ <sub>4</sub> =								
Θ <sub>5</sub> =								
Θ <sub>50</sub> =			Θ <sub>50</sub> =			Θ <sub>50</sub> =		
X <sub>1</sub> =			X <sub>2</sub> =			X <sub>3</sub> =		

## SEPARACJA MAGNETYCZNA

**Rozdział skalenia i kwarcu od biotyту i innych zanieczyszczeń żelazistych dla drobnoziarnistych odpadów granitowych**

### 1. Wprowadzenie

W trakcie przeróbki granitu na kruszywa drogowe i budowlane powstaje drobnoziarnisty odpad stanowiący rozdrobiony granit przeważnie do ziarn o wielkości mniejszej od 1 mm. Materiał ten może być cennym surowcem skaleniowym dla przemysłu szklarskiego i ceramicznego. Granit jak wiadomo składa się z trzech głównych minerałów: ze skalenia (sodowych, potasowych lub wapniowych), kwarcu i łuszczyków ciemnych (biotyt) i jasnych (muskowit) oraz minerałów akcesorycznych. Granity z

rejonu Płyty Strzegomskiej składają się głównie ze skalenia sodowo-potasowego, kwarcu i biotytu. Zanieczyszczeniem tego materiału jako surowca dla ceramiki są związki żelaza głównie biotyt. Związki (w tym i minerały zawierające żelazo są składnikami barwiącymi i z tego powodu niekorzystnymi dla celów produkcji materiałów ceramicznych. Wydzielenia biotytu z takiego materiału najprościej można dokonać drogą separacji magnetycznej. Celem tego ćwiczenia jest przeprowadzenie doświadczeń z rozdziałem takich właśnie minerałów oraz zaznajomienie się z przebiegiem typowego rozdziału magnetycznego minerałów występujących razem w typowych skałach magmowych jakimi są granity.

Skalenie i kwarc są minerałami wykazującymi własności diamagnetyczne zatem z punktu widzenia technologii są minerałami "niemagnetycznymi" natomiast biotyt jest minerałem wykazującym dość silne własności magnetyczne i zaliczany jest do materiałów antyferromagnetycznych. Jak łatwo jest się domyślić oba te typy minerałów w polu magnetycznym będą zachowywać się diametralnie różnie.

#### A. *Materiał do badań.*

Do badań przygotowano odmulony (zatem pozbawiony na mokro najdrobniejszych ziarn) materiał o uziarnieniu -0.3 mm stanowiący rozdrobniony (odpadowy) granit z rejonu Płyty Strzegomskiej.

#### B. *Wykonanie badania*

1. Odważyć w naczynku wagowym 25 g badanego materiału.
2. Sprawdzić kompletność wyposażenia separatora zwłaszcza właściwe umieszczenie naczynek odbierających rozdzielone produkty separacji i zwrócić uwagę na kolor i przeznaczenie naczynek: srebrne na produkt niemagnetyczny (FN), złote na produkt magnetyczny (FM).
3. Ustawić według wskazówek prowadzącego i zanotować kąty bocznego ( $\Theta^0$ ) i wzdłużnego nachylenia separatora.
4. Sprawdzić czy pokrętko regulacji amperomierza i wibratora ustawione są na zerze.
5. Włączyć prąd zasilający uzwojenie elektromagnesu i kierując się wskazaniem amperomierza nastawić odpowiednio (wg polecenia prowadzącego) natężenie prądu  $I_1$ . Do zakręconego lejka nadawczego separatora wsypać naważkę badanego materiału następnie włączyć zasilanie wibratora i ustawić jego drgania pokrętkiem na głośnie "brzęczenie". Powoli odkręcać lejek nadawczy obserwując pojawienie się cienkiego strumienia materiału wysypującego się na rynienkę z lejka materiału, doprowadzić strumień materiału do stałej niewielkiej wydajności.
6. Po przepuszczeniu przez separator całej masy naważki, frakcję magnetyczną zważyć, masę frakcji zanotować. Frakcję niemagnetyczną wsypać ponownie do zakręconego lejka nadawczego.
7. Zwiększyć nieznacznie natężenie prądu zasilającego elektromagnes do wartości  $I_2$  i powtórzyć wszystkie operacje opisane w punktach 5 i 6. Wymagana jest tylko nieznaczna zmiana natężenia prądu zasilającego, rzędu  $0.2 \pm 0.4$  A, gdyż taka właśnie już wywołuje wystarczająco, dla tego pomiaru, silną zmianę w natężeniu pola magnetycznego.
8. Zwiększyć dalej nieznacznie natężenie prądu zasilającego elektromagnes do wartości  $I_3$  i powtórzyć operacje opisane w punktach 5 i 6
9. zwiększyć jeszcze raz nieznacznie natężenie prądu zasilającego uzwojenie separatora do wartości  $I_4$  i powtórzyć wszystkie operacje opisane w punktach 5 i 6 z tym, że oprócz frakcji magnetycznej zważyć także frakcję niemagnetyczną.

