

Krzysztof TUREK *
Władysław PILCH **
Karol NOWAKOWSKI **

MAGNESY STAŁE NOWEJ GENERACJI JAKO ŹRÓDŁO POLA MAGNETYCZNEGO W SEPARATORACH MAGNETYCZNYCH

Wczesna historia separacji magnetycznej jest ściśle związana z magnesami trwałymi. Niskie parametry ówczesnych magnesów ograniczały ich zastosowanie jedynie do silnie magnetycznych materiałów. Źródłem silnego pola magnetycznego w separatorach stały się zużywające ogromne ilości energii elektromagnesy. Wraz z rozwojem magnesów nowej generacji, opartych na stopach ziem rzadkich z metalami przejściowymi, pojawiła się możliwość uzyskiwania silnych pól magnetycznych za pomocą magnesów stałych. Układy nieruchomych, supersilnych magnesów służą w separatorze do oddzielania ziaren słabomagnetycznych od niemagnetycznych. Wirujące magnesy wytwarzają zmienne pole magnetyczne, w którym można oddzielać ziarna przewodzące od nieprzewodzących. W artykule omówiono separatory zarówno ze stałym, jak i zmiennym polem magnetycznym, generowanym przez magnesy nowej generacji. Zreferowano również stan technologii wytwarzania tych magnesów w Polsce.

WSTĘP

Złoża surowców łatwo dostępnych, tanich w eksploatacji, o wysokich zawartościach składników użytecznych, zwłaszcza metali, zmniejsza się. W konsekwencji staje się koniecznością wydobywanie surowców coraz uboższych. Równocześnie rozwijają się metody wykorzystania surowców wtórnych jako źródła różnych metali i innych użytecznych składników. W ostatnich latach powstały nowe technologie przeróbki surowców wtórnych, w których wykorzystuje się, w pewnym zakresie, znane z technologii surowców metody separacji: grawitacyjne, magnetyczne, elektryczne, flotacyjne i inne. Jednak klasyczne metody separacji są niewystarczające do bezpośrednich zastosowań do surowców, takich jak złomy metali nieżelaznych (przeróbka kabli, złomy elektro-elektroniczne). W związku z tym rozwinęły się nowe technologie niekonwencjonalne. Powstały nowe generacje urządzeń, nie stosowane dotychczas w klasycznych procesach przerobczych, np. maszyny granulujące wszelkiego rodzaju złomy i umożliwiającym samym ich przerób, czy też separatory z cieczą magnetyczną, rozdzielające składniki niemagnetyczne o różnej gęstości. Osobną grupę niekonwencjonalnych urządzeń

* Zakład Fizyki Ciała Stałego, Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

** Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych, Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

stanowią separatory, w których pole magnetyczne generowane jest supersilnymi magnesami typu Nd-Fe-B.

W praktyce przemysłowej znalazły zastosowanie dwie grupy separatorów: nisko- i wysokogradientowe. Do pierwszej grupy zaliczają się separatory, których indukcja na powierzchni nie przekracza 0,2 T, a więc klasyczne separatory bębnowe do separacji na mokro i na sucho. Ponadto grupa ta obejmuje separatory z wirującym układem magnesów oraz separatory, w których pole magnetyczne jest wytwarzane prądem przemiennym. Za pośrednictwem separatorów niskogradientowych można wydzielać z mineralnych surowców wtórnych i odpadowych składniki ferromagnetyczne o bardzo szerokim zakresie ziarnistości, praktycznie od wielkości mikronowych do frakcji gruboziarnistych. Do drugiej grupy zaliczane są następujące typy separatorów: separatory indukcyjne, separatory poligradientowe, separatory nadprzewodnikowe i separatory o konstrukcji specjalnej. Indukcja magnetyczna tych separatorów waha się w granicach od 0,5 do 2 T, a w separatorach nadprzewodnikowych do 5 T.

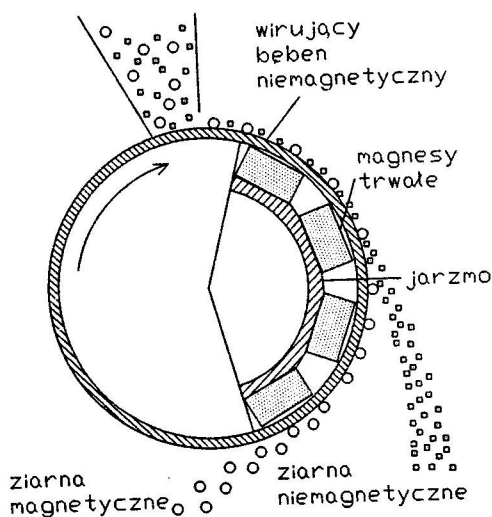
Jak już wspomniano wyżej, nowymi typami separatorów są separatory, w których pole magnetyczne wytwarzane jest za pomocą supersilnych magnesów stałych. W artykule zostaną omówione dwa typy separatorów z tej grupy: separatory z otwartym polem magnetycznym do separacji gruboziarnistych granulowanych złomów magnetycznych oraz separatory z wirującym multipolowym układem magnesów stałych do separacji złomów metali niemagnetycznych. Zreferowany również zostanie stan wytwarzania magnesów nowej generacji w Polsce.

SEPARATORY OPARTE NA MAGNESACH NOWEJ GENERACJI

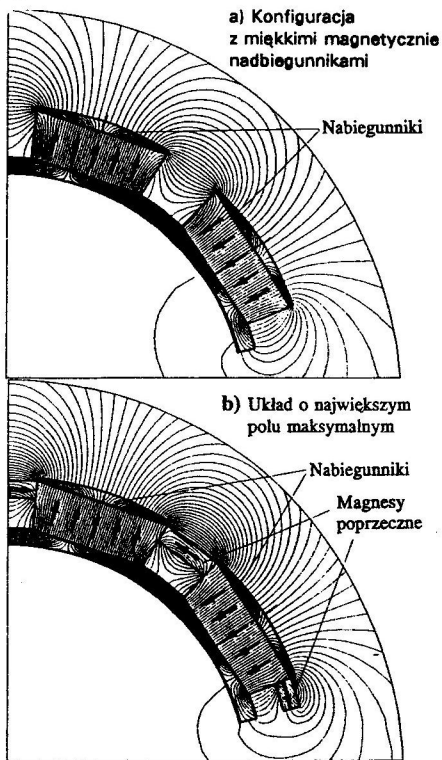
Nowe możliwości w dziedzinie separacji stwarzają supersilne magnesy stałe typu Sm-Co i Nd-Fe-B. Wysokogradientowe separatory skonstruowane w oparciu o te magnesy mogą mieć istotne znaczenie nie tylko w procesach separacji surowców mineralnych, lecz również, co jest bardzo istotne, w procesach przeróbki surowców, a zwłaszcza złomów metali nieżelaznych.

Separatory ze stałym polem magnetycznym

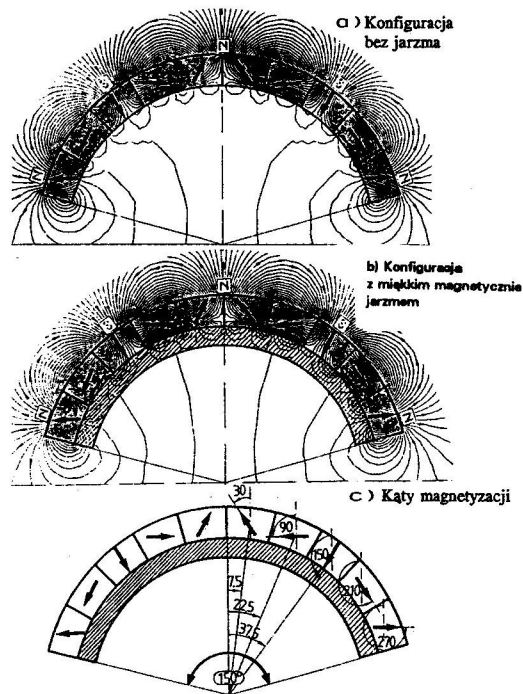
Przykładowy układ wykorzystujący magnesy trwałe do separacji na sucho przedstawiony jest na rys. 1. Mieszanina cząstek magnetycznych i niemagnetycznych podawana jest na pobocznice obracającego się bębna, wykonanego z niemagnetycznego materiału. Wewnątrz bębna, możliwie blisko strumienia cząstek, znajduje się w stałym położeniu układ magnesów, który wytwarza pole magnetyczne na zewnątrz bębna w obszarze mijającego go strumienia. Rozkład indukcji B tego pola zobrazowano na rys. 2a.



Rys. 1. Schemat separatora magnetycznego z magnesami stałymi do separacji na sucho



Rys. 2. Konfiguracje pól magnetycznych w separatorach z magnesami trwałymi



Rys. 3. Rozkład magnetyzacji i konfiguracji pól w separatorach o kierunku magnetyzacji zmieniającym się od bieguna do bieguna

Cząstki magnetyczne są przyciągane do bębna i transportowane pod bęben, gdzie są odbierane. Niemagnetyczne cząstki są odrzucane jak w rzucie poziomym w przeciwną stronę.

Siła magnetyczna działająca na dającą się magnesować cząstkę wyraża się wzorem:

$$F = \frac{1}{2} V \chi \nabla(B^2) \quad (1)$$

gdzie χ jest podatnością magnetyczną cząstki, a V jej objętością. Wzór powyższy dotyczy słabych magnetycznie cząstek z liniową zależnością magnetyzacji M od H i również odnosi się, z pewnymi ograniczeniami (czynnik odmagnesowania, nasycenie), do silniejszych magnetycznie cząstek.

Aby uzyskać duże siły, czynnik $\nabla(B^2)$ lub $B \nabla B$ powinien zostać zoptymalizowany w pobliżu powierzchni bębna. Do skutecznej separacji wymagana jest więc duża gęstość strumienia i duży gradient. Jednakże, jeżeli będziemy chcieli wytworzyć silny gradient na powierzchni bębna, wówczas strumień będzie gwałtownie malał w kierunku radialnym. Aby uzyskać duże siły w zewnętrznym obszarze objętości roboczej, należy starannie dostosować gradient do konkretnych zastosowań (rozmiaru ziaren, szybkości przesuwu, szerokości szczeliny, itd.).

Cząstki przyciągnięte do powierzchni bębna powinny na niej pozostawać podczas transportu do miejsca rozładowania. Dla tego gradienty pola równoległe do drogi cząsteczki (zmiany pola wywołujące siły poprzeczne) powinny być zminimalizowane. Takie siły zatrzymują cząstki w obszarze względnie wyższego pola i powodują powstawanie zatorów oraz utratę cząstek magnetycznych.

Z drugiej strony wielokrotna zmiana biegunów wzdłuż drogi cząstek jest korzystna. Magnetyczne cząstki obracają się ze zmianą polaryzacji i niemagnetyczne cząstki, które mogły być uwięzione w zatorze cząstek magnetycznych, mogą być uwolnione. Prowadzi to do czystszej produktu wyjściowego i lepszej selektywności.

Wymagania dotyczące idealnego separatora magnetycznego można podsumować następująco:

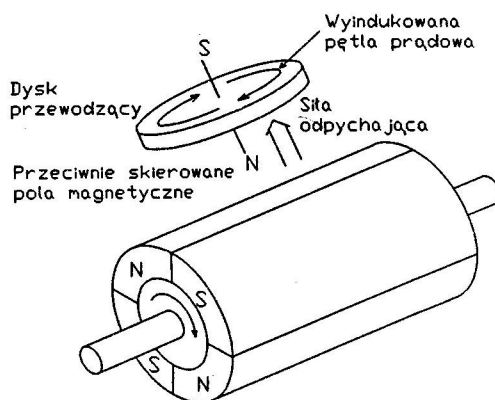
1. Duża gęstość strumienia na powierzchni bębna.
2. Silny gradient pola stosowny do wymagań konkretnego zastosowania.
3. Dużo zmian biegunów.
4. Minimalne poprzeczne zmiany pola na powierzchni bębna.

Wymagania te są do pewnego stopnia wzajemnie sprzeczne, zwłaszcza w systemie konwencjonalnym, przedstawionym na rys.1.

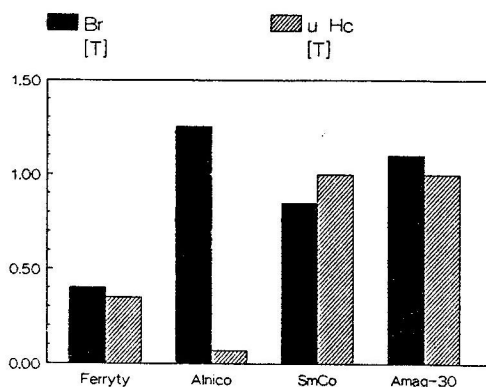
W celu zwiększenia lokalnie indukcji na powierzchni bębna pomiędzy bieguny wprowadza się magnesy poprzeczne (rys.2b). Magnesy te redukują strumień rozproszony i w efekcie w pobliżu krawędzi biegunów pojawia się szereg silnych maksimów indukcji. Maksimom tym towarzyszy niekorzystny, silny gradient poprzeczny pola.

W najnowszych rozwiązaniach gradient poprzeczny eliminowany jest poprzez stosowanie układów multipolowych o kierunku magnetyzacji zmieniającym się od bieguna do bieguna tak jak, pokazano to na rys. 3.

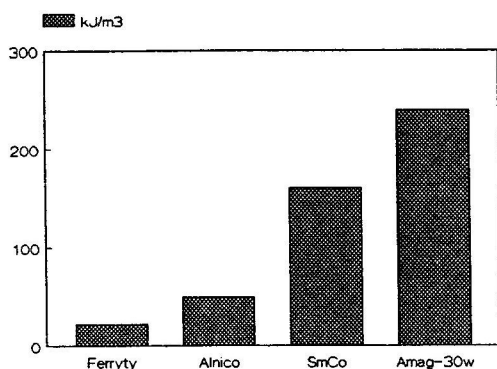
W innym rozwiązaniu aktywna część separatora jest walcem składającym się z dysków stałych magnesów Sm-Co lub Nd-Fe-B ułożonych na przemian z dyskami stalowymi. W dyskach



Rys. 4. Schemat działania separatora z wirującym układem magnesów

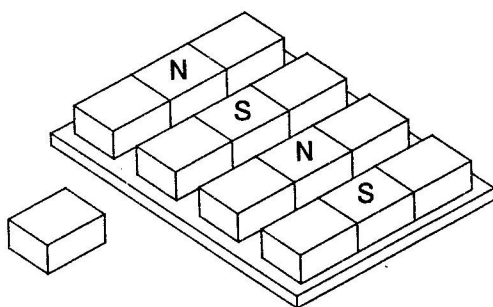


Rys. 5. Remanencja B_r i koercja H_c magnesów produkowanych w Polsce



Rys. 6. Porównanie iloczynów energetycznych $(BH)_{max}$ magnesów produkowanych w Polsce.

cym się w jego zasięgu przewodnik indukowane będą prądy wirowe wytwarzające pole magnetyczne o kierunku przeciwnym do kierunku pola źródłowego. W konsekwencji na przewodnik będzie działała siła odpychająca. Zmienne pole magnetyczne można więc wykorzystać do separacji składników przewodzących od nieprzewodzących.



Rys. 7. Płaski układ multipolowy

do jego masy m , przewodnictwa σ i czynnika geometrycznego s , a odwrotnie proporcjonalna do gęstości

$$F \sim m \frac{\sigma}{\rho} s \quad (2)$$

Z równania (2) wynika, że wielkością charakteryzującą skuteczność separacji jest iloraz σ/ρ . Siła odpychająca będzie tym większa, im lepsze jest przewodnictwo i mniejsza gęstość. W tab. 1. zestawiono wielkości tego ilorazu dla niektórych metali.

Oddziaływanie wirującego pola magnetycznego z wyindukowanymi w przewodniku pętli prądowych zależy będzie od kształtu tych pętli, a więc i od kształtu przewodnika. Efekt ten

stalowych następuje koncentracja strumienia magnetycznego generowanego przez magnesy, dzięki czemu indukcja magnetyczna na ich pobocznicach osiąga duże wartości.

Separatory magnetyczne ze zmiennym polem magnetycznym generowanym przez wirujące układy magnesów stałych

W technologii przeróbki złomów, a zwłaszcza złomów metali nieżelaznych, znalazły zastosowanie różne separatory magnetyczne, w których wykorzystuje się oddziaływanie pól magnetycznych generowanych w pobliżu powierzchni bębna separatora. W szczególności, jeżeli będzie to szybko zmienne pole, wówczas w znajdującym się w jego zasięgu przewodnik indukowane będą prądy wirowe wytwarzające pole magnetyczne o kierunku przeciwnym do kierunku pola źródłowego. W konsekwencji na przewodnik będzie działała siła odpychająca. Zmienne pole magnetyczne można więc wykorzystać do separacji składników przewodzących od nieprzewodzących.

Zmienne pole magnetyczne można wytworzyć za pośrednictwem prądu przemiennego lub wirujących układów multipolowych magnesów trwałych. Urządzenia, w których pole generowane jest prądem przemiennym, noszą nazwę separatorów liniowych. W niniejszej pracy zajmiemy się bliżej tą drugą grupą separatorów.

Na rys. 4 przedstawiono schematycznie zasadę działania separatora z wirującym polem magnetycznym. Siła odpychająca F działająca na przewodnik jest proporcjonalna

Tab. 1. Wartości stosunku przewodnictwa do gęstości dla różnych metali

Metal	σ/ρ
Aluminium	14,0
Magnez	12,9
Miedź	6,7
Srebro	6,0
Cynk	2,4
Złoto	2,2
Mosiądz	1,7
Cyna	1,2
Ołów	0,4

opisany jest we wzorze (2) czynnikiem kształtu s.

W KIERUNKU SEPARATORÓW NOWEJ GENERACJI. W POLSCE

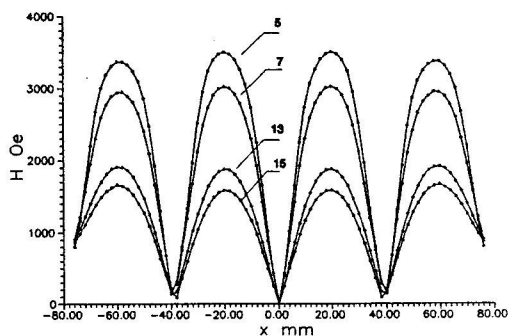
Rosnące zainteresowanie przemysłu efektywnym separowaniem surowców wtórnych ze złomów oraz uruchomienie przez firmę AMAG Sp. z o.o. w Krakowie produkcji spiekanych magnesów Nd-Fe-B rokuje nadzieję na rychłe powstanie separatorów nowej generacji w Polsce.

Materiał uważany jest za magnes trwały, jeżeli po namagnesowaniu, czyli poddaniu go działaniu wystarczająco silnego pola magnetycznego, zachowuje znaczną część swojego magnetyzmu charakte-

ryzowanego parametrem B_r (remanencja) oraz, gdy do jego całkowitego odnamagnesowania potrzebne jest duże pole H_c (koercja). Maksymalne wielkości tych parametrów uzyskuje się w przypadku magnesów anizotropowych, tzn. takich, które najlepiej magnesują się w jednym wyróżnianym w procesie produkcji kierunku. Na rys. 5 zestawiono wartości remanencji i koercji

dla różnych typów magnesów produkowanych w Polsce.

W zastosowaniach magnesów trwałych wykorzystywana jest energia (E) wytwarzanego przez nie pola magnetycznego. Zamiast maksymalnej energii, możliwej do uzyskania z jednostki objętości magnesu, w charakterystykach magnesów podawana jest wielkość dwukrotnie większa, tzw. iloczyn energetyczny $(BH)_{max}$. Jest on tym większy, im większa jest remanencja i koercja magnesu. Jak wynika z rys. 6, największy iloczyn energetyczny ze wszystkich typów magnesów produkowanych w Polsce posiadają magnesy neodymowe AMAG. Biorąc pod uwagę fakt, że efektywność separacji jest z grubsza proporcjonalna do



Rys. 8. Zmiany modułu składowej pola H prostopadłej do powierzchni biegunów wzdłuż układu multipolowego, zmierzone w różnych odległościach od płaszczyzny biegunów

$(BH)_{max}$, magnesy te najlepiej nadają się do tego celu. Warto nadmienić, że drugie co do wartości iloczynu energetycznego magnesy Sm-Co są znacznie droższe od magnesów neodymowych.

W firmie AMAG przebadano serię układów multipolowych magnesów Nd-Fe-B pod kątem ich zastosowań do budowy separatorów magnetycznych. W ramach tych prac zmierzono konfiguracje pól magnetycznych dla układów takich, jak przedstawiono na rys. 7 w funkcji wymiarów biegunów i odległości między nimi. Celem tych pomiarów było ustalenie jak zmienia się gradient i indukcja w funkcji wymiarów biegunów i odległości między biegunami. Przykładowe

zmiany pola wzdłuż układu przedstawiono na rys.8.

Z przeprowadzonych wstępnych prób separacji wybranych próbek złomów wynika, że za pomocą odpowiedniego zestawu neodymowych magnesów stałych można skutecznie wydzielać frakcje słabomagnetyczne. Wyniki są bardzo obiecujące i zachęcają do dalszych badań w tym zakresie.

Według wstępnego rozeznania istnieje możliwość zaprojektowania i zbudowania separatora magnetycznego bębnowego do separacji składników o właściwościach słabomagnetycznych. Przeprowadzone pomiary rozkładów pól magnetycznych, jak również rozwijane oprogramowanie do numerycznego obliczania rozkładów pól magnetycznych, pozwolą w znacznym stopniu zoptymalizować projektowany obiekt.

LITERATURA

1. M. Marinescu, N. Marinescu i K.H.Unkelbach, *Proc. IX Int. Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Bad Soden, 1987, str. 163.*

K. Turek, W. Pilch, and K. Nowakowski, 1992, Permanent Magnets of New Generation as a Source of Magnetic Field in Magnetic Separators, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 25, 25-32 (Polish text)

The early history of magnetic separation is closely related to permanent magnets. Low parameters of the magnets confined their applications only to strongly magnetic materials. High intensity magnetic fields in separators were produced by power hungry electromagnets. Together with the impressive development of permanent magnets of new generation, based on rare earth-intermetallic alloys, there appeared a possibility of producing strong magnetic fields with these magnets. Whereas arrangements of static high energy magnets are used in separators to capture weakly magnetic particles, rotating magnets produce alternating field which can be used to remove metals from highly resistive wastes. In the paper separators both with steady and alternating magnetic field generated by the magnets of the new generation are discussed. The state-of-art in the technology of manufacturing of these magnets in Poland is also reported.