



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.7>

## Przegląd literatury dotyczącej odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE

Paweł Friebe – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale przeprowadzono przegląd literatury dotyczącej recyklingu ZSEiE (zużyte sprzęty elektryczne i elektroniczne) wyposażonych w magnesy NdFeB. Magnesy te zawierają w swoim składzie REE (Rare Earth Elements – pierwiastki ziem rzadkich), takie jak: Nd – neodym, Dy – dysproz, Pr – prazeodym. Sprzęty wyłączone z eksploatacji zawierające magnesy NdFeB mogą stać się źródłem pozyskiwania REE. W przeglądzie literatury zebrane zostały informacje dotyczące ilości magnesów NdFeB, wykorzystywanych do produkcji urządzeń komercyjnych w danych latach, co pozwoli oszacować ilość przyszłych odpadów zawierających te magnesy. Zamieszczono również zestawienie metali zawartych w ZSEiE, na przykładzie dysków twardej, co wykorzystano następnie do wyznaczenia potencjalnych przychodów ze sprzedaży metali pochodzących z recyklingu 1 Mg ZSEiE. W niniejszej publikacji przedstawiona została koncepcja technologii recyklingu REE z ZSEiE z zastosowaniem podejścia Magnet-to-Magnet. Technologia ta obejmuje przetwarzanie dysków twardej począwszy od ich pozyskania, a skończywszy na uzyskaniu sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB, przy zachowaniu niskiej emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Słowa kluczowe: ZSEiE, recykling, Magnet-to-Magnet, magnesy NdFeB, gospodarka o obiegu zamkniętym

### Literature review on the recovery of powdered mixed NdFeB alloy from WEEE

**Abstract:** This chapter presents a literature review on the recycling of WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) containing NdFeB magnets. These magnets contain REE (Rare Earth Elements) in their composition such as Nd - Neodymium, Dy - Dysprosium, Pr - Praseodymium. Waste equipment containing NdFeB magnets can be a source of REEs. The literature review includes information on the quantities of NdFeB magnets used in the manufacture of commercial equipment in specific years, which allows an estimation of future waste containing these magnets. A summary of the metals contained in WEEE was also included, using hard drives as an example, which was then used to determine the potential revenue from the sale of metals from the recycling of 1 Mg of WEEE. This publication presents the concept of a technology for recycling REE from WEEE using a magnet-to-magnet approach. This technology involves the processing of the REE from collection to the production of a powdered NdFeB alloy mixture with low emissions to the environment.

Keywords: WEEE, recycling, Magnet-to-Magnet, NdFeB magnets, circular economy

### 1. Wprowadzenie

REE są stosowane w elektronice, ale również w medycynie oraz przy wytwarzaniu specjalnych materiałów. Pierwiastki te znajdują się między innymi w magnesach NdFeB (neodymowych) ze stopu  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  szeroko stosowanych w sprzętach elektronicznych, które po wyeksploatowaniu są wycofywane z użytku [1]. Magnesy te w swoim składzie zawierają następujące REE: Nd – neodym, Dy – dysproz, Pr – prazeodym. Wygenerowane ZSEiE, mogą stać się wtórnym źródłem pierwiastków krytycznych, w tym REE poprzez skierowanie ich do recyklingu [2].

Jedną z alternatywnych metod pozyskiwania REE jest metoda recyklingu nazywana Magnet-to-Magnet [3]. Procesy technologiczne stosowane w tej metodzie polegają na ponownym wykorzystaniu magnesów NdFeB w celu wytworzenia z nich mieszaniny drobnych ziaren. Mieszanina ta po dalszej obróbce metalurgicznej ma posłużyć do wytworzenia nowych produktów, tj. nowych magnesów NdFeB.



Zakładając, że pozostałe składniki przetwarzanych urządzeń również będą selektywnie separowane i wykorzystane, ograniczy się znacząco ilość generowanych odpadów, co jest zgodne z polityką gospodarki obiegu zamkniętego.

## 2. Cel

Celem niniejszej publikacji jest identyfikacja ilości magnesów NdFeB, jaka jest wykorzystywana do produkcji urządzeń komercyjnych. Informacja ta pozwoli określić jaka ilość magnesów NdFeB będzie możliwa do odzyskania, po ich wyeksploatowaniu. Niniejszy rozdział został opracowany również w celu oszacowania zawartości REE w dyskach twardych oraz ich wartości finansowej. Kolejnym celem rozdziału jest przedstawienie koncepcji technologii recyklingu REE z ZSEiE, z wykorzystaniem metody Magnet-to-Magnet, również na przykładzie dysków twardych. Technologia ta obejmuje przetwarzanie dysków twardych począwszy od ich pozyskania, a skończywszy na uzyskaniu sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB. Technologia ta obejmuje procesy fizyczne, takie jak: segregacja, rozdrabnianie, separacja, demagnetyzacja, mielenie, które będą prowadziły do uzyskania sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB ze zużytych sprzętów, przy zachowaniu niskiej emisji zanieczyszczeń do środowiska.

## 3. Analiza literatury

W zamieszczonej poniżej tabeli 1 zawarto dane dotyczące globalnej ilości sprzedaży sprzętów, do których budowy zostały wykorzystane komponenty z magnesami NdFeB. Ilość sprzętów wprowadzanych na rynek odpowiadać będzie ilości sprzętów wyłączonych z użytkowania, po ich wyeksploatowaniu.

Znając masę magnesu NdFeB zużywaną do produkcji jednej sztuki danego produktu oraz wartość jego sprzedaży, wyznaczona zostanie całkowita masa wykorzystanego NdFeB. Materiał ten będzie mógł zostać przetworzony ponownie w przyszłości na drodze recyklingu. Największy udział magnesów NdFeB wynoszący – 70,9% jest wykorzystywany do budowy turbin wiatrowych, zaś do produkcji pojazdów zużywane jest 19,2% wszystkich magnesów. Najmniejszy udział w zużyciu magnesów NdFeB posiada elektronika konsumencka i sprzęt komputerowy wynoszący 9,7%.

Ponowne wykorzystanie NdFeB z turbin wiatrowych polega na ich demontażu z turbiny uszkodzonej i ponownym montażu w nowej turbinie. Większą trudność sprawiają pozostałe wymienione sprzęty z uwagi na niewielki rozmiar zastosowanych w nich magnesów. Przetwarzanie ręczne takich urządzeń jest kłopotliwe oraz bardzo kosztowne. Ze względu na to konieczne jest opracowanie technologii umożliwiającej odzysk cennych metali, w tym REE z urządzeń komercyjnych o mniejszych rozmiarach.



## Wykorzystanie magnezów NdFeB w sprzętach elektronicznych [4]

Tabela 1

Podzespoły urządzeń zawierające magnesy NdFeB	Masa magnezów w sztuce urządzenia	Globalna sprzedaż danego urządzenia	Całkowita masa magnezów przypadająca urządzeniom wyprodukowanym w danym roku [kg/%]
dyski twarde komputerowe	10-20 g	316,3 mln sztuk w 2019	4 744 500/ 9,0
głośniki tel. kom.	0,046-0,120 g	1378,7 mln sztuk w 2020	114 432/ 0,2
głośniki laptopów	1-2,4 g	167,0 mln sztuk w 2020	283 900/ 0,5
silniki klimatyzatorów	-	5,91 mln sztuk w 2020	-
generatory turbin wiatrowych	400 kg/MW	93,0 GW nowych instalacji w 2020	37 200 000/ 70,9
silniki pojazdów elektrycznych	2,1 kg	1,9 w 2021	3 990 000/ 7,6
silniki pojazdów hybrydowych	1,4 kg	3,5 w 2021	4 900 000/ 9,3
silniki hulajnóg elektrycznych	300-350 g	3,7 (tylko w UE) w 2020	1 202 500/ 2,3
		Sumarycznie	52 435 332

Oszacowano możliwe przychody ze sprzedaży metali zawartych w 1 Mg ZSEiE na przykładzie dysków twardych (tabela 2). Szacunku tego dokonano na podstawie średnich zawartości poszczególnych metali, które uzyskano z literatury oraz na podstawie cen metali na giełdzie. Sumaryczna wartość metali w 1 Mg ZSEiE wynosi 10 484,00 USD. Znacząca część tej kwoty należy do metali, takich jak: Ag – 1228,00 USD, Au – 4333,00 USD oraz Pd – 982,00 USD. Metale te są zawarte w płycie obwodów drukowanych, która jest jednym z elementów dysku twardego.

Pierwiastki: Al – 1435,00 USD, Si – 249,00 USD oraz Cu – 452,90 USD są zawarte w obudowie dysku. Magnesy NdFeB zawierają metale, takie jak: Fe – 3,70 USD, Nd – 1037,00 USD, Pr – 151,00 USD, Dy – 352,00 USD. Wynika z tego, że dyski twarde mogą stać się wtórnym źródłem pozyskiwania surowców krytycznych – pierwiastków ziem rzadkich oraz innych cennych metali.

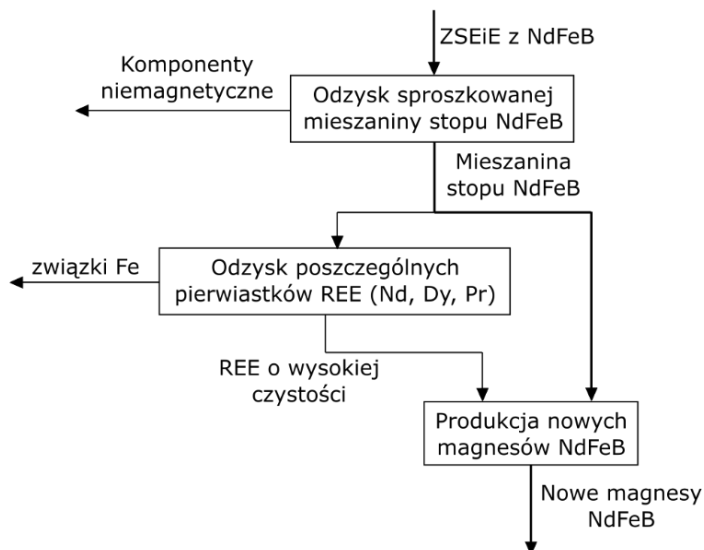
## Średnia zawartość danego metalu w dyskach twardej oraz wartość tych metali [5, 6]

Tabela 2

Metal	Średnia zawartość metalu w dyskach twardej [%]	Wartość danego metalu w 1 Mg dysków twardej [USD]	Wartość sumaryczna metali zawartych w 1 Mg dysków twardej [USD]
Al	64,0	1435	10484,0
Si	8,9	249,0	
Fe	3,2	3,7	
Cu	5,4	452,9	
Ni	0,18	49,0	
Sn	0,17	41,5	
Ti	0,04	3,8	
Zn	0,03	0,8	
Ce	0,04	132,0	
Nd	0,73	1037,0	
Pr	0,11	151,0	
Dy	0,08	352,0	
Co	0,07	34,1	
Sb	0,01	0,8	
Ta	0,06	0,3	
Ag	0,0234	1228,0	
Au	0,0071	4333,0	
Pd	0,0015	982,0	

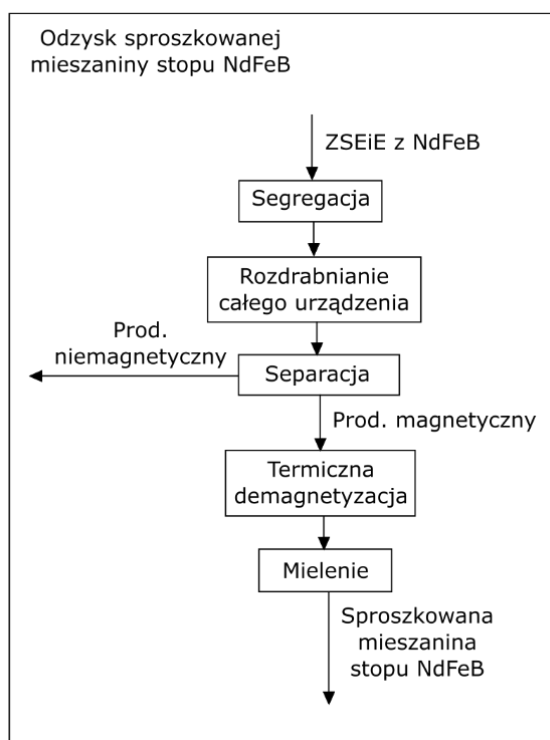
#### 4. Koncepcja technologii recyklingu zużytych sprzętów

Celem opracowania niniejszej technologii jest umożliwienie odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE, która pozwoli na zwiększenie możliwości produkcji niezbędnych dla nowoczesnych technologii – magnesów NdFeB. Jednocześnie ograniczy się oddziaływanie na środowisko, w porównaniu do górnictwa metali ze źródeł naturalnych. Technologia obejmuje wykorzystanie fizycznych metod przeróbki surowców. Propozycja technologii bezpośredniego recyklingu Magnet-to-Magnet została przedstawiona na rysunku 1 pogrubioną linią. Jednakże kontrolowana produkcja nowych magnesów NdFeB, będzie wymagać utrzymywania odpowiedniego stosunku składników stopu, co będzie się wiązało z koniecznością użycia, między innymi, pierwiastków ziem rzadkich o wysokiej czystości. Mogą one zostać pozyskane metodami hydrometalurgicznymi również wykorzystując uzyskaną, sproszkowaną mieszaninę stopu NdFeB.



Rys. 1. Etapy recyklingu prowadzące do wytworzenia nowych magnesów NdFeB z ZSEiE

Procesy proponowane do wykorzystania w technologii odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE przedstawiono na rysunku 2. Zastosowano tu tylko procesy fizycznej przeróbki materiałów, które zostały scharakteryzowane w dalszej części publikacji.



Rys. 2. Koncepcja technologii odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB, zgodnie z podejściem Magnet-to-Magnet

Pierwszym etapem recyklingu ZSEiE zawierających magnesy NdFeB jest ich segregacja. Ze względu na odmienną budowę ZSEiE, konieczny jest ich rozdział na grupy zawierające np. tylko telefony komórkowe czy dyski twarde. ZSEiE takie jak wcześniej wymienione w tabeli 1 posiadają odmienną charakterystykę, tj. masę magnesów, trudność rozdrabniania i inne. Z tego powodu do



recyklingu powinno kierować się strumienie materiału zawierające tylko jeden dany zużyty produkt, by w kolejnych procesach uzyskać możliwie jak najwyższą sprawność odzysku. Pozyskanie wstępnie rozdzielonych na grupy ZSEiE jest możliwe z przedsiębiorstw, zajmujących się zbiórką odpadów, które znajdują się przy większych polskich miastach. Kolejnym etapem jest proces rozdrabniania. Do tego procesu zastosowane zostanie urządzenie nazywane dezintegratorem. Zasada działania tego urządzenia jest następująca: materiał trafia między przeciwbieżnie obracające się i zazębione pary wałów tnących, które powoli odrywają niewielkie fragmenty materiału, aż do jego całkowitego przejścia pomiędzy wałami. W urządzeniu tym zastosowano podzespoły rozdrabniające wykonane z materiałów niemagnetycznych, które umożliwią rozdrabnianie ZSEiE z wbudowanymi, silnymi magnesami NdFeB.

Następnym procesem jest separacja. Zastosowanie tego procesu ma na celu wydzielenie, z rozdrobnionego wcześniej materiału – cząstek ferromagnetycznych tj. magnesów NdFeB, które są częścią mechanizmu pozycjonującego dysku twardego. Proces ten może przebiegać w separatorze magnetycznym, który umożliwi wydzielenie cząstek ferromagnetycznych. Produkt niemagnetyczny stanowi mieszanina cząstek rozdrobnionych, pozostałych podzespołów dysków twardych, takich jak: obudowy, płyty obwodów drukowanych, talerze, głowice oraz mniejsze części plastikowe. W dalszej kolejności produkt magnetyczny kierowany ma być do demagnetyzacji. Celem tego procesu jest rozmagnesowanie magnesów NdFeB w celu umożliwienia prowadzenia następnego procesu – mielenia. Proces ten jest realizowany poprzez ogrzewanie magnesów powyżej ich temperatury punktu Curie 312°C [7]. Powyżej tej temperatury drgania cieplne sieci krystalicznej niszczą ustawienia dipoli magnetycznych, w wyniku czego magnesy NdFeB stają się paramagnetykami, a po ochłodzeniu mogą one być ponownie namagnesowane [8, 9]. Temperatura punktu Curie może być jednak wyższa. Jest ona zależna od dodatków stopowych, które mogą wpływać na podwyższenie temperatury punktu. Dodatkami tymi są pierwiastki, takie jak dysproz (Dy), terb (Tb) i kobalt (Co). Mogą one podwyższyć temperaturę Curie do 350÷400°C [10, 11].

Ostatnim procesem omawianej koncepcji jest proces mielenia, który jest prowadzony w celu uzyskania sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB o jednorodnym uziarnieniu. Do procesów hydrometalurgicznego odzysku REE ze zużytych magnesów NdFeB wymagane jest uziarnienie około 500 µm [12]. Z kolei do ponownego przetworzenia sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB na nowe magnesy, wymagane jest głębsze mielenie – do około 5 µm, które może być przeprowadzone przy pomocy młynów strumieniowych. Po uzyskaniu proszku o odpowiednim uziarnieniu możliwe jest jego ponowne przetworzenie na nowe magnesy wykorzystując te same procesy produkcji magnesów NdFeB, co w przypadku wykorzystania materiału wcześniej nieprzetwarzanego [9].

## 5. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zebrane zostały informacje dotyczące ilości magnesów NdFeB aktualnie stosowanych do produkcji urządzeń elektronicznych. Masa magnesów NdFeB wykorzystana do produkcji nowych urządzeń będzie identyczna z masą magnesów w sprzętach wyłączonych z użytku, po ich wyeksploatowaniu. Spośród analizowanych grup urządzeń elektronicznych największą część magnesów NdFeB jest stosowana do budowy turbin wiatrowych - 70,9%, zaś do produkcji pojazdów elektrycznych i hybrydowych wykorzystywane jest 19,2% wszystkich magnesów. Elektronika konsumencka i sprzęt komputerowy posiadają najmniejszy udział w zużyciu magnesów NdFeB wynoszący 9,7%.

Ponadto, na przykładzie dysków twardych oszacowano potencjalne przychody ze sprzedaży metali zawartych w 1 Mg ZSEiE. Przeanalizowana została zawartość poszczególnych metali w dysku twardym oraz ich ceny na rynku. Całkowita wartość metali w 1 Mg ZSEiE wyniosła 10 484,00 USD. Większość tej kwoty należy do metali szlachetnych, takich jak: Ag, Au, Pd (6 543,00 USD). Metale te są związane





z płytą obwodów drukowanych, która jest jednym z elementów dysku twardego. Metale, takie jak: Al, Si oraz Cu (2 136,90 USD), związane są z obudową dysku twardego. Z kolei metale ziem rzadkich, takie jak: Nd, Pr, Dy (1 543,70 USD), zawarte są w magnesach NdFeB, które są częścią układu pozycjonowania głowicy dysku twardego.

Ze względu na duże znaczenie pierwiastków ziem rzadkich w przemyśle oraz globalne ryzyko niedoborów dostaw, pierwiastki te zostały określone przez Komisję Europejską „surowcami krytycznymi”. Z tego względu zaproponowana została technologia odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE. Aktualnie stosowane sposoby odzyskiwania REE z magnesów NdFeB obejmują wykorzystanie procesów hydrometalurgicznych, które powodują powstanie szkodliwych emisji do środowiska. W zaprezentowanej koncepcji technologii odzysku wykorzystano procesy fizycznej przeróbki surowców, które nie powodują znacznego obciążenia środowiska. Uzyskana w efekcie drobnoziarnista mieszanina stopu NdFeB umożliwi zamknięcie pętli recyklingu, zmniejszając tym samym zanieczyszczenie środowiska spowodowane koniecznością pozyskiwania REE ze źródeł naturalnych oraz deponowaniem odpadów – ZSEiE.

## Literatura

1. Binnemans K., McGuinness P., Jones P. T.: Rare-earth recycling needs market intervention. *Nature Reviews Materials*, 6(6), 2021, s. 459–461
2. Yang Y., Walton A., Sheridan R., Güth K., Gauß R., Gutfleisch O., Binnemans K.: Ree recovery from end-of-life NDFEB permanent magnet scrap: A critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 2016, s.122–149
3. Jin H., Afiuny P., McIntyre T., Yih Y., & Sutherland J. W.: Comparative life cycle assessment of ndfeb magnets: Virgin production versus magnet-to-magnet recycling. *Procedia CIRP*, 48, 2016, s. 45–50
4. Friebe P., Suponik T., Nuckowski P.: Research on hard drives in the context of the construction of shredding knives in the recovery of rare earth elements. Materiały na konferencję “EURECA-PRO Conference on Responsible Consumption and Production 2022”, Leon, 19-21 września 2022
5. <https://www.lme.com/en/> [dostęp 29 grudnia 2022]
6. <https://www.metal.com/> [dostęp 28 grudnia 2022]
7. Sagawa M., Fujimura S., Yamamoto H., Matsuura Y., Hiraga K.: Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. *IEEE Transactions on Magnetics*, 20(5), 1984, s. 1584–1589
8. Jiles D.: *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 2nd ed. New York: Chapman & Hall, 1998
9. Zakotnik M., Tudor C. O., Peiró L. T., Afiuny P., Skomski R., & Hatch G. P.: Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 2016, s. 117–126
10. Abrahami S. T., Xiao Y., & Yang Y.: Rare-earth elements recovery from post-consumer hard-disc drives. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 124(2), 2014, s. 106–115
11. <http://pl.bhmagnets.com/news/curie-temperature-and-working-temperature-of-s-25362646.html> [dostęp 16 grudnia 2022]
12. Erust C., Akcil A., Tuncuk A., Deveci H., & Yazici E. Y.: A multi-stage process for recovery of neodymium (ND) and dysprosium (dy) from spent hard disc drives (hdds). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42(2), 2019, s. 90–101