

Poniższy tekst jest tłumaczeniem artykułu pt. "Safe transport of magnets by air freight", który opublikowany został w czasopiśmie "Logistyka" nr 5/2017 i jako wersja pierwotna może być wykorzystany (w tym cytowany) w działalności naukowej.

## Bezpieczny transport magnesów drogą lotniczą

Adam Kozłowski – KBR Magneto Sp. J.  
adam.kozlowski@magneto.pl

### 1. Wstęp

Według powszechnego przekonania, uznaje się że magnesy (znane także pod nazwą materiałów magnetycznie twardych), nie powinny być transportowane drogą lotniczą. W przekonaniu tym uświadczały ograniczenia dla firm kurierskich kwalifikujących przesyłki z magnesami jako materiałami niebezpiecznymi, zgodnie z przepisami DGR (Dangerous Goods Regulations) międzynarodowej organizacji IATA (International Air Transport Association) z siedzibą w Genewie [1].

Pierwsze regulacje RAR (Restricted Articles Regulations) dotyczące materiałów magnetycznych transportowanych drogą lotniczą zostały podjęte już w roku 1962 przez IATA, w słowach (tłumaczenie własne): „Przesyłki lotnicze magnesów i urządzeń magnetycznych mogą niekorzystnie wpływać na dokładność kompasów magnetycznych, chyba że są właściwie zapakowane i zachowują bezpieczną odległość od kompasu lotniczego. Aby zapewnić ochronę nawigacji samolotu, niezbędnym jest aby nadawcy materiałów magnetycznych wyraźnie oznaczali każdą przesyłkę zawierającą materiały magnetyczne i instalowali zwory magnetyczne uniemożliwiające polu magnetycznemu pochodzącemu od magnesów wywieranie niekorzystnego wpływu na kompas magnetyczny” [2]. W kolejnych latach pojawiły się niezbędne aktualizacje i zdefiniowano dopuszczalne wartości pola magnetycznego emitowanego z przesyłek z materiałami magnetycznie twardymi. W 1969 r. IATA zdefiniowało bezpieczną odległość 2,1 m od przesyłek emitujących pole magnetyczne o natężeniu  $H = 0,159 \text{ A/m}$ , co odpowiada indukcji magnetycznej  $B = 0,0002 \text{ mT}$  – w układzie SI (lub  $B = 0,002 \text{ Gs}$  – w układzie CGS – stosowanym w krajach anglosaskich) patrz wzór (1).

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

gdzie:

$B$  – indukcja pola magnetycznego [T]

$\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni równa  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

$\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna, dla powietrza równa 1,0000004

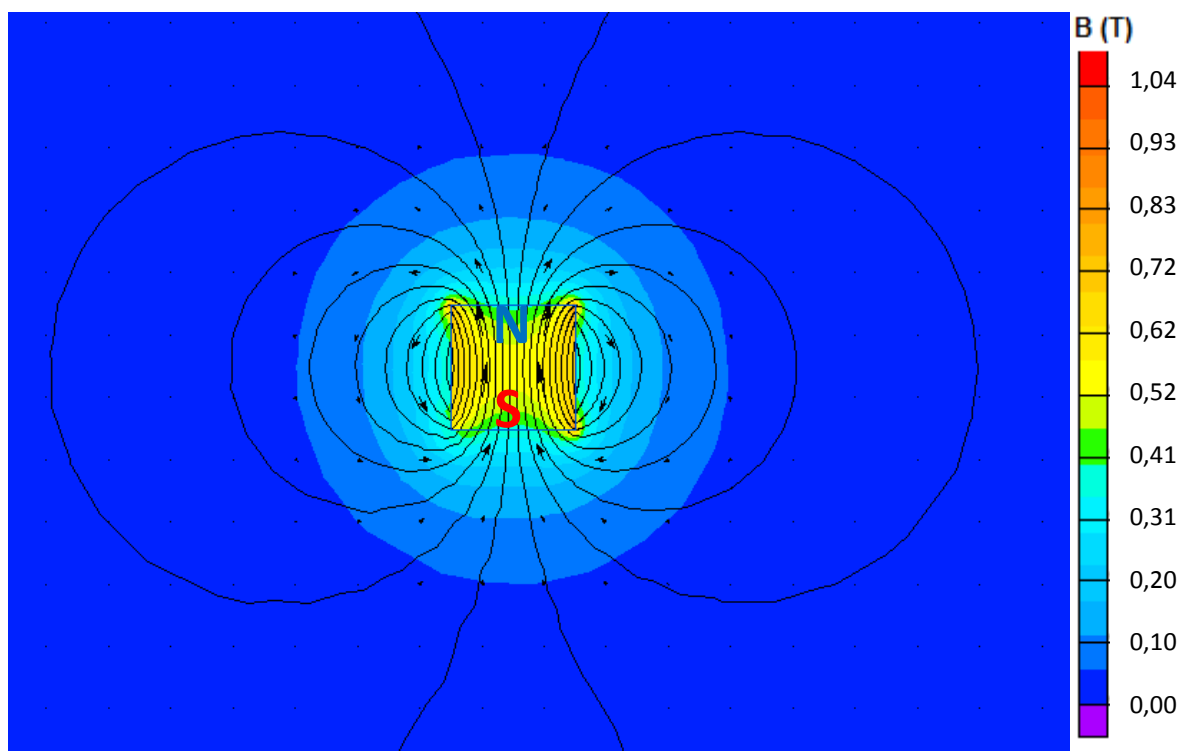
$H$  – natężenie pola magnetycznego [A/m]

przeliczniki:

$$1\text{Gs} = 10^{-1} \text{ mT}$$

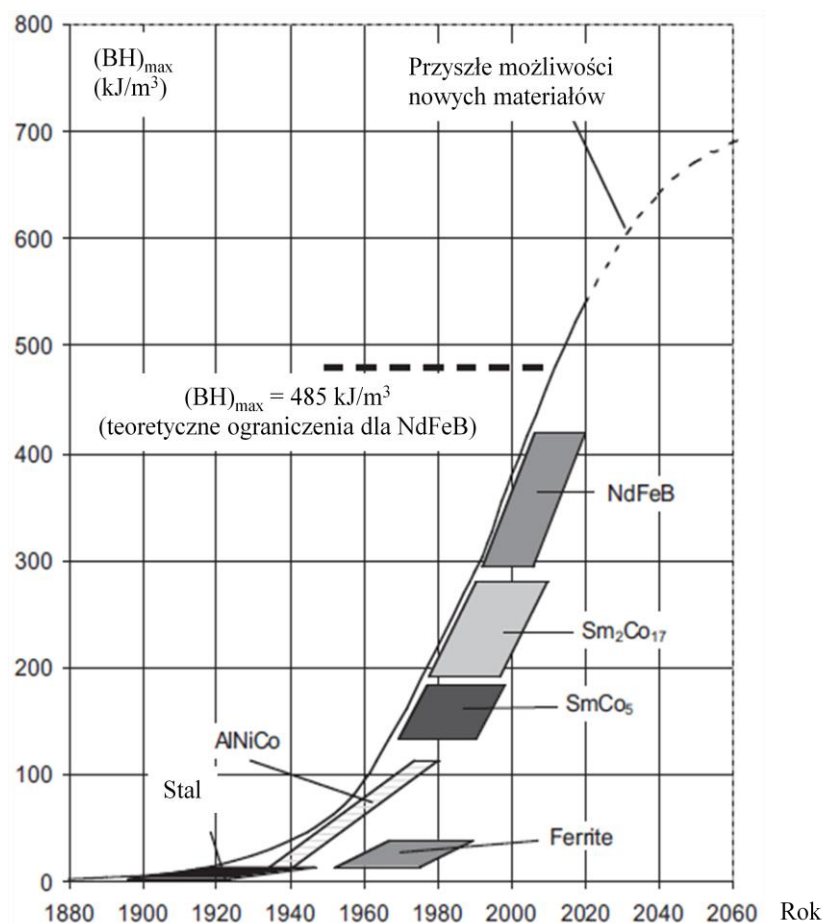
$$1 \text{ mT} \approx 800 \text{ A/m}$$

Regulacje o których mowa, pojawiły się jednak na długo przed jakościową zmianą technologiczną w produkcji magnesów skutkującą ich wytwarzaniem na bazie pierwiastków ziem rzadkich (NdFeB i SmCo), a co za tym idzie o dużych gęstościach energii. Na Rys. 1 przedstawiono rozkład pola magnetycznego w otoczeniu magnesu NdFeB (neodymowego) walcowego, magnesowanego osiowo, o średnicy 2 mm, wysokości 2 mm i gradacji N35 [3].



Rys. 1 Wizualizacja pola magnetycznego wokół magnesu NdFeB walcowego D2xH2 / N35 z zaznaczonymi liniami indukcji magnetycznej B (wzór 1); N, S – oznaczenia biegunów magnetycznych

Magnesy pierwiastków ziem rzadkich wdrożono do produkcji w połowie lat 80-tych, ale wzrost gęstości energii tych magnesów dokonuje się w sposób konsekwentny i szybki (Rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja gęstości energii  $(BH)_{max}$  różnych typów magnesów trwałych na przestrzeni lat (dane literaturowe na podstawie [3])

Z danych literaturowych przedstawiających rozwój produkcji magnesów na przestrzeni lat (Rys. 2) wynika, że wartość gęstości energii technicznie realizowalna w produkcji magnesów wynosi do  $485 \text{ kJ/m}^3$ , a przyszłe możliwości są na dużo większym poziomie, co poświadcza aktualność przedstawionego opracowania.

Wskutek upowszechnienia magnesów tzw. drugiej generacji w roku 1985 dokonano ponownej aktualizacji bezpiecznej odległości wskazując ją na 4,6 m dla przesyłek emitujących pole magnetyczne o natężeniu  $H = 0,418 \text{ A/m}$  (tj. indukcji magnetycznej  $B = 0,000525 \text{ mT} / 0,00525 \text{ Gs}$ ). Wartości te zostały zaakceptowane przez inne organizacje lotnicze np. ICAO (International Civil Aviation Organization), czego konsekwencją jest konieczność odpowiedniego rozplanowania przesyłek w luku bagażowym statku powietrznego.

Przesyłki lotnicze zawierające źródła pola magnetycznego są jednymi z wielu określanych jako „towary niebezpieczne” – a za takie uważa się materiały lub przedmioty o szkodliwych właściwościach, które jeśli niewłaściwie użytkowane, stanowią potencjalne niebezpieczeństwo dla zdrowia człowieka oraz infrastruktury i/lub jej środków transportu. Towary niebezpieczne w transporcie lotniczym podzielono na 9 klas, z których materiały magnetyczne – „magnetized material” – stanowią dziewiątą

klasę z 12 numerem oznaczenia towaru (spośród dwudziestu sześciu innych objętych wykazem w tej klasie).

Kolejną organizacją, w której Komitet Ekspertów ds. Towarów Niebezpiecznych dokonał klasyfikacji materiałów niebezpiecznych w transporcie jest Organizacja Narodów Zjednoczonych. Towarom niebezpiecznym ONZ nadała kody od UN 2801 do UN 2900, przy czym materiałom magnetycznym przypisano kod UN 2807, na który powołuje się również IATA w swych przepisach dotyczących pakowania materiałów magnetycznych, w oparciu o instrukcję pakowania o numerze 953 [4].

## **2. Klasyfikacja przesyłek magnetycznych**

Kwestie związane z emitowaniem pola magnetycznego z przesyłek nie dotyczą wyłącznie samych magnesów, ale mogą dotyczyć również innych urządzeń, w których konstrukcji użyto takich komponentów jak magnesy, czego dość często nadawcy przesyłek nie są świadomi. Nie chodzi tu o przesyłki zawierające magnetyzery, separatory magnetyczne, uchwyty magnetyczne, itp., których nazwa wskazuje na obecność magnesów, ale o przesyłki takie jak zabawki, ubrania, galanteria skórzana, itp. zawierające w swej konstrukcji elementy będące magnesami, w tym neodymowymi NdFeB (Rys. 2).

Kwestie bezpieczeństwa przesyłek z materiałami magnetycznymi dotyczą pośrednio odbiorców, a są bardzo istotne dla nadawców przesyłek w tym producentów i dostawców z wielu branż przemysłowych. Wynika to z konieczności zadeklarowania zawartości przesyłki, a w razie wątpliwości niezbędnym jest właściwa współpraca z przewoźnikiem, w celu ustalenia warunków i przygotowania przesyłki do transportu lotniczego.

Przeprowadzając z firmą kurierską proces nadania przesyłki z magnesami drogą lotniczą liczyć należy się z okolicznością, że uzyskanie precyzyjnej odpowiedzi, co do warunków jej przygotowania, może być bardzo trudne. Uzyskuje się zazwyczaj informację, że dopuszczalny poziom indukcji magnetycznej  $B$  (wzór 1) przesyłki z magnesami nie powinien przekroczyć w/w wartości 0,000525 mT. Dość często zapomina się przy tym o uzupełnieniu, że przedmiotowa wartość indukcji określana jest w odległości 4,6 metra od powierzchni przesyłki – patrz Tabela 1. Bez uwagi dotyczącej odległości pomiaru wartość 0,000525 mT wydaje się niezwykle małą w porównaniu z indukcją pola magnetycznego Ziemi zawierającą się w granicach 0,03 do 0,06 mT [5].

W Tabeli 1 dokonano przeglądu metod postępowania, mającego na celu określenie sposobu klasyfikacji przesyłek magnetycznych i ich właściwego oznaczenia. Zwrócić uwagę należy ponownie na fakt, że pomiarów pola magnetycznego dokonywać należy dla obu odległości 4,6 m oraz 2,1 m sprawdzając czy mierzona indukcja magnetyczna nie przekracza odpowiednio wartości 0,000525 mT

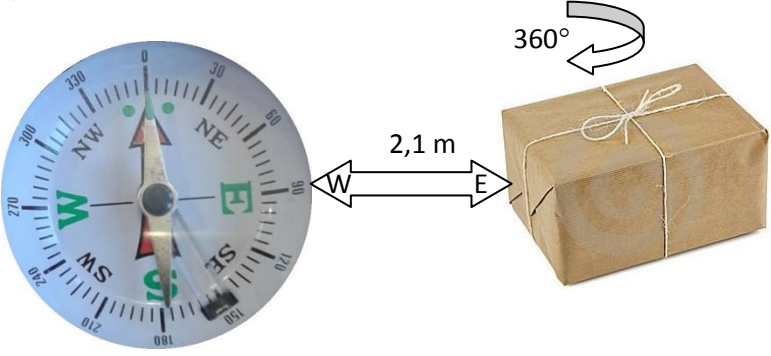
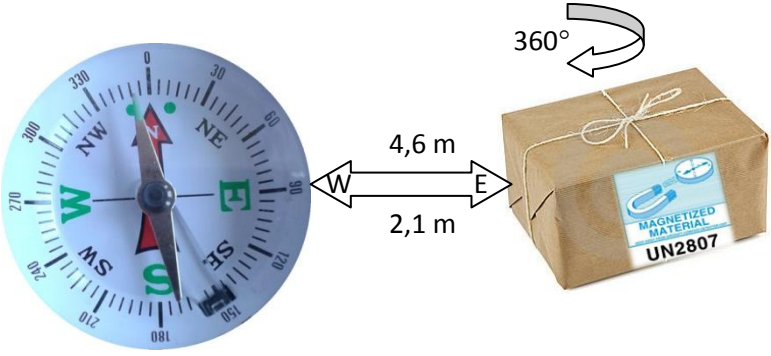
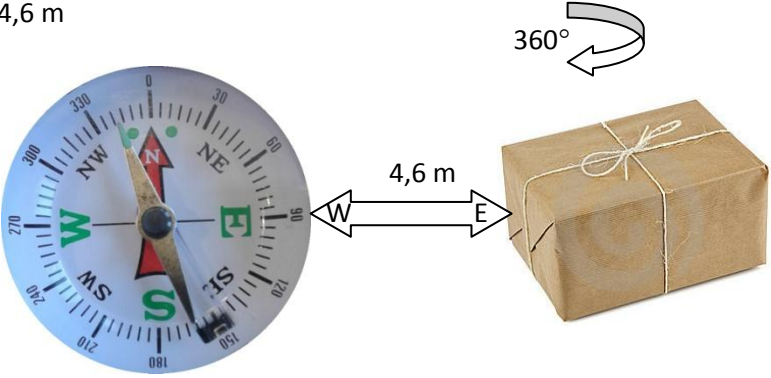
i 0,0002 mT. Zauważyć należy przy tym, że indukcja pola magnetycznego  $B$  maleje wraz z kwadratem odległości od jego źródła, co tłumaczy jej niewielkie wartości dla odległości 4,6 m.

Do pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego wykorzystuje się przyrządy elektroniczne zwane teslomierzami lub gausmierzami – w zależności od jednostki pomiaru. Ogólnodostępne w handlu teslomierze charakteryzujące się rozdzielczością pomiaru w mT do dwóch miejsc po przecinku są zazwyczaj drogie, a bardziej precyzyjne do pomiaru rozważanych w artykule niskich pól magnetycznych – bardzo drogie [6].

Ze względu na fakt że nie każdy nadawca przesyłki z magnesami może pozwolić sobie na zakup profesjonalnego przyrządu pomiarowego, poniżej przedstawiono procedurę kwalifikacji przesyłek magnetycznych do transportu lotniczego w oparciu o kompas magnetyczny. Jest to metoda w pełni równoważna do pomiaru pola magnetycznego przesyłki innymi metodami, niezmiennie od wielu lat zalecana także przez IATA [1].

W Tabeli 1 zamieszczono klasyfikację typów przesyłek wynikającą z obowiązujących przepisów wraz z uzupełnieniami autora dokonanymi w oparciu o Instrukcję Pakowania nr 953 [4].

Tabela 1 Klasyfikacja przesyłek zawierających materiały magnetyczne i wymagania w transporcie (opracowanie własne w oparciu o obowiązujące przepisy)

Typ	Klasyfikacja materiałów magnetycznych	Oznaczenia i wymagania
1	<p>Materiały magnetyczne o natężeniu pola magnetycznego powodującego odchyłkę igły kompasu * poniżej 0,5° z odległości 2,1 m**</p> 	<p>„NOTOC” – nie podlega dodatkowym rozważaniom</p> <p>Przesyłka nie jest traktowana jako zawierająca materiały magnetyczne</p>
2	<p>Materiały magnetyczne o natężeniu pola magnetycznego powodującego odchyłkę igły kompasu * więcej niż 2° z odległości 2,1 m, ale nie więcej niż 2° z odległości 4,6 m</p> 	<p>„NOTOC” – nie podlega dodatkowym rozważaniom</p> <p>Nie jest wymagana deklaracja o materiałach niebezpiecznych - DGD (Dangerous Goods Declaration)</p> <p>Wymagane oświadczenie w liście przewozowym AWB: “Materiały magnetyczne” i naklejka informacyjna na przesyłce</p>
3	<p>Materiały magnetyczne o natężeniu pola magnetycznego powodującego odchyłkę igły kompasu * więcej niż 2° z odległości 4,6 m</p> 	<p>Takie przesyłki muszą posiadać wymagane dopuszczenia Security Certificate od odpowiednich organów i spełniać dodatkowe wymagania.</p> <p>W przeciwnym przypadku transport drogą lotniczą jest zakazany.</p>

\*) Odchyłkę igły kompasu uwzględnia się od pozycji 0. Igła może wychylić się w prawo lub w lewo od 0 w zależności od biegunowości pola magnetycznego emitowanego z przesyłki

\*\*\*) Niekiedy firmy kurierskie podają dla Typu 1 odchyłkę poniżej 2° z odległości 2,1 m

Zapakowaną przesyłkę należy sklasyfikować stosownie do Typu 1, 2 lub 3 jak w Tabeli 1. W tym celu - zgodnie z instrukcją IATA [4] – przesyłkę należy umieścić najpierw w odległości 4,6 m od kompasu. Linia prosta łącząca przesyłkę z kompasem powinna być równoległa z kierunkiem Wschód – Zachód. Przesyłkę należy obracać powoli o kąt 360° w płaszczyźnie poziomej i obserwować odchylenie igły kompasu od pozycji pierwotnej. Podczas pomiaru należy zachować szczególną ostrożność, by w pobliżu nie było żadnych innych źródeł pola magnetycznego, jak również przedmiotów stalowych, mogących wpłynąć na zafałszowanie pomiaru.

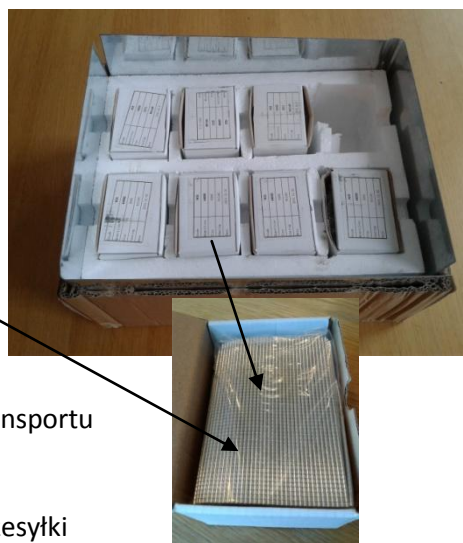
### 3. Przykład przygotowania przesyłki z magnesami do transportu lotniczego

Rozważono przesyłkę o wymiarach 35x27x15 cm zawierającą magnesy neodymowe walcowe namagnesowane osiowo (Rys. 1, 3a) o wymiarach D2xH2 mm. Osiowe namagnesowanie N-S jest takie, że magnesy przyciągają się biegunami magnetycznymi i układają w stosy jak na Rys. 3a. Ułożenie to ogranicza wydostawanie się pola magnetycznego na zewnątrz przesyłki. Po spakowaniu magnesów w pudełko (Rys. 3b), całą przesyłkę należy wyposażyć w ekrany magnetyczne, w postaci magnetycznie miękkich blach stalowych na ścianach bocznych oraz na jej podstawach. Ekran magnetyczny dodatkowo i to znacznie ogranicza pole magnetyczne emitowane z wnętrza przesyłki.

a)



b)



Rys. 3 Przygotowanie przesyłki z magnesami do transportu

a) sposób ułożenia magnesów walcowych w stosy

b) ekrany magnetyczne umieszczone wewnątrz przesyłki

Przesyłka jak na Rys. 3 zawiera łącznie 352 000 sztuk magnesów o wymiarach D2xH2 mm i po jej zaekranowaniu nie stwierdza się przekroczenia granicznych wartości odchyłki igły kompasu z odległości 4,6 m oraz 2,1 m. Przesyłka kwalifikuje się zatem do transportu lotniczego jako Typ 1 (Tabela 1).

W przypadku, gdy przesyłka z magnesami klasyfikuje się jako Typ 3 (Tabela 1), aby zmniejszyć oddziaływanie pola magnetycznego należy:

- a) ułożyć magnesy w taki sposób, by ograniczyć pole magnetyczne wydostające się na zewnątrz przesyłki w kierunku kompasu
- b) zastosować zwory magnetyczne łączące ze sobą bieguny magnesów
- c) zastosować ekranowanie przesyłki odpowiednio grubymi blachami stalowymi
- d) zwiększyć wymiary zewnętrzne opakowania

O ile metody b) – d) są skuteczne, o tyle z pewnością przekładają się na większy koszt transportu. Ekran i zwory magnetyczne w postaci blachy stalowej są tym bardziej skuteczne, im są grubsze, pociągają więc za sobą zwiększenie masy rzeczywistej przesyłki. W zależności od źródła pola magnetycznego, zwiększenie gabarytów przesyłki może w wielu przypadkach rozstrzygnąć sprawę zmiany jej kwalifikacji z Typu 3 do Typu 2 lub nawet Typu 1 (Tabela 1). Niemniej jednak należy liczyć się ze zwiększeniem masy i/lub gabarytów, a zatem wzrostu kosztów transportu. Decyzja o zastosowaniu ekranów magnetycznych lub zwiększenia gabarytów przesyłki powinna być poprzedzona pomiarami i kalkulacją ceny transportu. Kalkulacja taka może być uciążliwa, gdy wysyłane przesyłki nie są standardowymi i ich zawartość jest zmienna. W najgorszym przypadku należy liczyć się ze zwiększeniem zarówno masy rzeczywistej, jak i masy objętościowej, jeżeli trzeba zastosować i ekranowanie, i zwiększenie gabarytów przesyłki.

Jeżeli pomimo poczynienia zaleceń od a) do d) przesyłka nadal kwalifikuje się jako Typ 3 (Tabela 1), pozostaje transport drogą lądową lub morską, gdzie nie istnieją żadne ograniczenia w przewożeniu przesyłek emitujących pole magnetyczne.

#### **4. Wpływ pola magnetycznego na przyrządy nawigacyjne**

Magnesy, urządzenia i materiały magnetyczne będące źródłami pola magnetycznego mogą mieć niekorzystny wpływ na poprawną pracę przyrządów nawigacyjnych. Z badań przeprowadzonych przez DGAC (Dangerous Goods Advisory Council) na polecenie IFALPA (International Federation of Air Line Pilots' Associations) wynika, że kompasy magnetyczne (tzw. mokre) są jedynym znanym przyrządem nawigacyjnym, który może być zakłócany polem magnetycznym. W tradycyjne kompasy magnetyczne mokre wyposażane były jednostki latające wyprodukowane przed 1955 r., wszystkie nowsze statki powietrzne wyprodukowane po 1955 r. są wyposażone w jeden lub więcej elektronicznych kompasów żyroskopowych, odczytujących kierunek geograficzny z czujników umieszczonych poza kabiną samolotu, na końcu skrzydła lub na ogonie, daleko od przedziału bagażowego. Tego typu urządzenia nawigacyjne są dużo mniej podatne na zakłócenia polem magnetycznym w porównaniu do tradycyjnych kompasów magnetycznych. Z kolejnych badań DGAC wynika, że kompas tradycyjny nie jest postrzegany jako podstawowy i niezbędny przyrząd nawigacyjny w lotnictwie, ale jako przyrząd pomocniczy służący do celów kontrolnych.



W wymaganiach dotyczących zdolności do lotu dla samolotów komercyjnych, dopuszcza się błąd kompasu do  $10^\circ$ , a nawet kontynuowanie lotu z uszkodzonym kompasem [2].

Pomimo obostrzeń dotyczących wpływu przesyłek będących źródłem pola magnetycznego stałego, przyrządy nawigacyjne i tak są narażone na wpływ pola magnetycznego zmiennego, pochodzącego od instalacji elektrycznej i ruchu obrotowego turbin silników. Pole magnetyczne zmienne jest bardziej nieprzewidywalne co do miejsc, wartości i momentów występowania w porównaniu z polem magnetycznym stałym zlokalizowanym w luku bagażowym, dlatego też elektroniczne kompasy żyroskopowe ekranuje się przed wpływem pola (zmiennego) elektromagnetycznego. Innymi źródłami zakłóceń polem magnetycznym oprócz przesyłek z magnesami są ładunki elektrostatyczne odkładające się na wyposażeniu kokpitu sterowniczego samolotu oraz rozbłyski na słońcu generujące pole magnetyczne o indukcji  $B$  do  $0,1 \text{ mT}$  [7]. Na poprawną pracę kompasu ma także wpływ zmienność wartości indukcji magnetycznej pola ziemskiego w różnych rejonach geograficznych.

Biorąc pod uwagę konstrukcję współczesnych samolotów transportowych, większość z nich zapewnia większe, bądź równe odległości niż  $4,6 \text{ m}$  od najbliższej przesyłki w luku bagażowym do kompasu magnetycznego w kabinie pilotów. Przykładem może być Boeing 757-200 Freighter ( $5,5 \text{ m}$ ), Boeing 767-300 Freighter ( $4,6 \text{ m}$ ). Dla mniejszych samolotów np. Boeing 747-400 ( $3 \text{ m}$ ) lub Cesna Caravan 208 ( $2,4 \text{ m}$ ) odległości są co prawda mniejsze od  $4,6 \text{ m}$ , ale nadal powyżej  $2,1 \text{ m}$ , uwzględnianych przy klasyfikacji przesyłek magnetycznych (Tabela 1) [2]. Samolotami tymi można więc transportować magnesy trwałe.

## 5. Wnioski

Przesyłki lotnicze będące źródłem pola magnetycznego stanowią niewielki procent spośród listy ponad 220 przesyłek zawierających materiały niebezpieczne i mogące mieć wpływ na bezpieczeństwo w ruchu lotniczym. Istnieją ponadto inne aniżeli przesyłki z magnesami źródła zakłóceń magnetycznych, a kompas magnetyczny nie jest podstawowym i niezbędnym w chwili obecnej przyrządem nawigacyjnym.

Z przedstawionych względów regulacje dotyczące przesyłek z magnesami transportowanymi drogą lotniczą wydają się być niezwykle rygorystycznymi, a nawet przekroczenie dopuszczalnych wartości pola magnetycznego nie powinno wywierać skrajnie negatywnych skutków.

Odnotować również należy fakt, że przy bramkach wejścia na pokład samolotów pasażerskich zamieszczone są informacje o przedmiotach niebezpiecznych, których pasażerowie nie powinni mieć przy sobie, a wśród nich magnesy. Nie dokonuje się tu jednak żadnego pomiaru pola magnetycznego, natomiast gdyby przeprowadzić kontrolę, większość pasażerów nie kwalifikowałaby się do odlotu

mając przy sobie magnesy w: telefonach komórkowych, laptopach, tabletach, zatrzaskach galanterii i wielu innych przedmiotach powszechnego użytku.

Nie są znane, a co najmniej nie są nagłaśniane przypadki negatywnego wpływu przesyłek z magnesami na bezpieczeństwo lotu. Pomimo tego faktu, uregulowania sprzed wielu lat nadal są obowiązującymi i nie wydaje się, aby miały ulec zmianie.

## **Streszczenie**

Artykuł przedstawia problematykę właściwej interpretacji przez przewoźników przesyłek zawierających materiały magnetyczne, jako materiały niebezpieczne w transporcie lotniczym. Autor na podstawie własnego przypadku nadania przesyłki zawierającej magnesy opisuje sposób pomiaru pola magnetycznego emitowanego z przesyłki oraz procedurę formalną jej klasyfikacji do jednego z trzech typów określających poziom zagrożenia, zgodnie z wymaganiami IATA. W pracy przedstawiono sposoby ograniczania emisji pola magnetycznego na zewnątrz przesyłki poprzez zastosowanie ekranowania. Niezależnie od wielkości pola magnetycznego emitowanego z przesyłki, rozważono stopień rzeczywistego zagrożenia dla urządzeń nawigacyjnych współczesnych samolotów, dochodząc do ciekawych wniosków i spostrzeżeń.

## **Słowa kluczowe:**

magnes, materiały magnetyczne, materiały niebezpieczne, kompas, regulacje IATA DGR, ekranowanie magnetyczne, przyrządy nawigacyjne, przesyłki lotnicze.

## **Literatura**

1. International Air Transport Association (IATA) – [www.iata.org](http://www.iata.org)
2. Dangerous Goods Panel (DGP). Meeting of the Working Group of the Whole. Working paper of ICAO, Auckland, Nowa Zelandia, 4-8 Maj 2009
3. Rare-earth permanent magnets, VACODYM, VACOMAX, Katalog PD-002, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, 2003
4. Packing Instruction 953. IATA 17/10/2008, s. 141/154
5. Measurement and analysis of earth's magnetic field based on low-magnetic field standards. P.G. Park, W-S Kim, M-S Kim, V.Ya Shifrin, IEEE 02.10.2014
6. Instrukcja obsługi teslomierza Lakeshore model 460, Rev. 2.7, P/N 119-012, 9 marzec 2015
7. Solar storms can weaken Earth's magnetic field. K. Kornei, 31.10.2016, Science, AAAS