

## EKSPERYMENTALNE BADANIA CZYNNIKÓW ZMIENIAJĄCYCH WARUNKI WSPOMAGANIA POLEM MANETYCZNYM

Jan BURCAN\*, Anna SŁAWIŃSKA\*, Radosław BEDNAREK\*

\*Katedra Konstrukcji Precyzyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

janbur@p.lodz.pl, annas@p.lodz.pl, radekbed@mail.p.lodz.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów indukcji magnetycznej w otoczeniu czoł wysokoenergetycznych magnesów oraz wyniki pomiarów sił oddziaływania między dwoma magnesami. Wykazano, że rozkład wektora indukcji zależy od błędów kształtu magnesów i dokładności ich montażu. Znajomość rozkładu wektora indukcji w funkcji parametrów geometrycznych i materiałowych umożliwia dokładne określenie wartości siły odpychania się współpracujących magnesów. Jest ona niezbędna do poprawnego projektowania łożysk i prowadnic wspomaganych polem magnetycznym.

### 1. WPROWADZENIE

Symetryczny rozkład indukcji, umożliwiający uzyskanie maksymalnej nośności może wystąpić dla idealnie jednorodnych, wykonanych bez błędów kształtu i położenia i precyzyjnie zmontowanych magnesów. Taki przypadek istnieje jedynie w uproszczeniach modelowych. W układach rzeczywistych, z asymetrycznym rozkładem indukcji magnetycznej, zawsze obok siły nośnej  $F_z$  występuje siła styczna  $F_r$ , która dla dwu odpychających się magnesów powoduje asymetrię obciążenia. W wyniku tej asymetrii uzyskanie stabilnej lewitacji, wyłącznie w polu magnetycznym nie jest możliwe.

Wyniki badań prowadzonych w Katedrze Konstrukcji Precyzyjnych Politechniki Łódzkiej wykazują, że podstawowymi czynnikami wpływającymi na charakterystyki statyczne układu dwu odpychających się magnesów, szczególnie przebiegi sił wzajemnego ich oddziaływania w funkcji szczeliny między magnesami, są wymiary geometryczne oraz własności materiałowe magnesów.

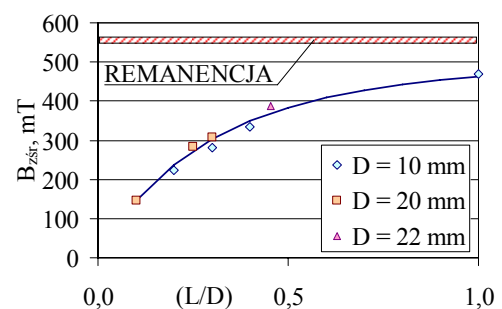
Do pierwszych zalicza się między innymi kształt współpracujących powierzchni roboczych czoł i długość magnesów. Istotne są błędy ich wymiarów, błędy kształtu i położenia, wzajemne usytuowanie magnesów względem siebie podczas współpracy, a szczególnie niewspółosiowość i nierównoległość ich osi (Burcan i Bednarek, 2007b, c). W drugiej grupie obok wartości remanencji i koercji, najważniejsza jest niejednorodność struktury materiału, z którego magnesy zostały wykonane (Burcan, 1996; Burcan i Bednarek 2007a).

Poznanie wpływu niejednorodności materiału i błędów geometrycznych magnesów na rozkład indukcji magnetycznej, tak często zaniedbywanego w licznych rozważaniach literaturowych, pozwala na racjonalny dobór magnesów podczas konstruowania układów magnetycznych tak, aby mogły one dokładnie realizować zamierzenia konstruktora.

### 2. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Eksperymentalne badania, przeprowadzone w Katedrze Konstrukcji Precyzyjnych Politechniki Łódzkiej, dowiodły, że osiowa siła oddziaływania dwu odpychających się magnesów jest wprost proporcjonalna do pola powierzchni czoł współpracujących A i sumy kwadratów średniej wartości indukcji magnetycznej  $B_{zsr}$  każdego z magnesów występującej w połowie szczeliny ( $s/D$ ) między magnesami (Burcan, 1996; Bednarek, 2008).

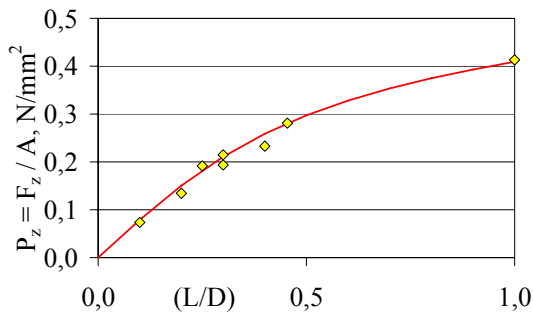
Wartość średniej indukcji magnetycznej zależy od długości względnej magnesów ( $L/D$ ). Stwierdzono, że magnesy o większych długościach względnych ( $L/D$ ) wykazują większą wartość średniej indukcji magnetycznej na czole magnesu  $B_{zsr}$  (rysunek 1) a także – proporcjonalnie większą wartość obciążenia względnego  $P_z$ , stanowiącego wartość siły osiowej  $F_z$  odniesionej do pola powierzchni czoł współpracujących A (rysunek 2).



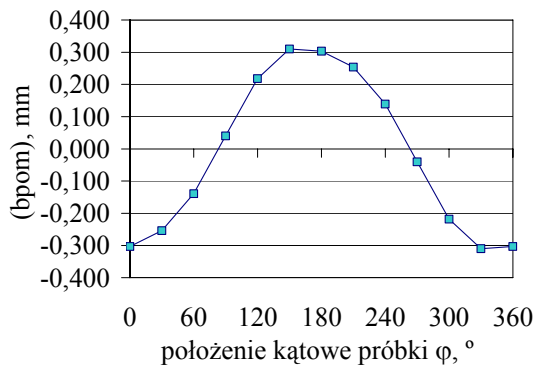
Rys. 1. Porównanie wpływu względnej długości magnesu ( $L/D$ ) na wartość średniej indukcji magnetycznej  $B_{zsr}$ , mierzonej w minimalnej odległości od czoła magnesu ( $H_{min}/D$ )

Podczas badań zaobserwowano mniejszą asymetrię rozkładu indukcji magnetycznej nad czołem magnesów o większej długości względnej ( $L/D$ ). Mierzalnym efektem asymetrii, wynikającej głównie z niejednorodności materia-

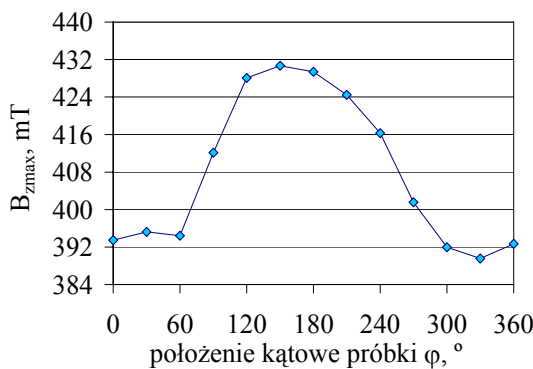
łu magnetycznego, jest przesunięcie osi magnetycznej względem osi magnesu (bpom) (rysunek 3) oraz zmienność wartości indukcji maksymalnej  $B_{zmax}$  wzdłuż jego obwodu (rysunek 4).



**Rys. 2.** Wpływ względnej długości magnesu (L/D) na wartość obciążenia względnego  $P_z$  przy minimalnej szczelinie ( $s_{min}/D$ )



**Rys. 3.** Bicie promieniowe osi magnetycznej (bpom) w funkcji położenia kąowego  $\varphi$  próbki (dla próbki 4A)

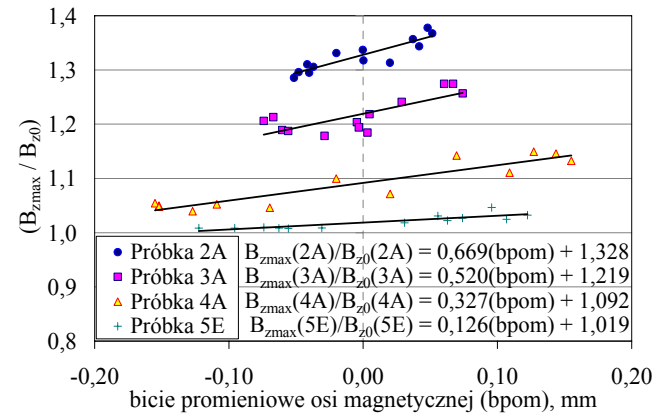


**Rys. 4.** Przykładowy przebieg wartości pionowej składowej wektora indukcji maksymalnej  $B_{zmax}$  w funkcji położenia kąowego  $\varphi$  próbki (dla próbki 4A)

Względna zmiana wartości indukcji maksymalnej  $B_{zmax}$  odniesiona do wartości indukcji w osi magnesu  $B_{z0}$  jest tym większa, im mniejsza jest wartość (L/D), przy stałej wartości (bpom) (rysunek 5).

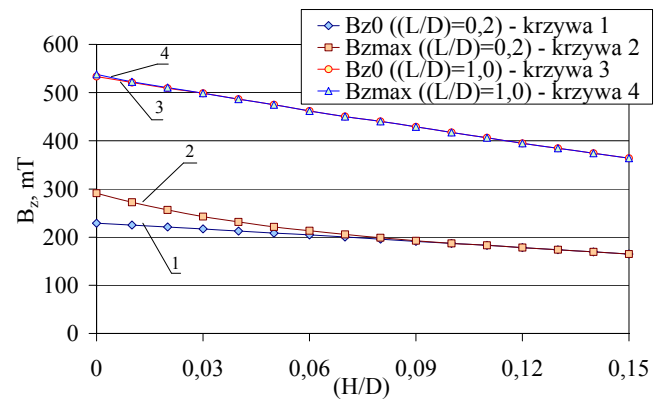
Asymetria rozkładu wektora indukcji magnetycznej nad czołem badanego magnesu może być wynikiem pochylenia czoła magnesu względem jego osi. Pochylenie to jest określane jako bicie osiowe czoła magnesu. Zmiany jego wartości dla różnych położenia kąowych próbki można z dobrym

przybliżeniem traktować jako zmiany odległości czoła magnesu od powierzchni pomiarowej. Przy znanym gradientie maksymalnej wartości indukcji  $B_{zmax}$  (spadek jej wartości w funkcji odległości od czoła magnesu) (rysunek 6) możliwe jest wyznaczenie wpływu pochylenia czoła na zmianę wartości indukcji maksymalnej w funkcji położenia kąowego próbki  $\varphi$ .



**Rys. 5.** Wpływ bicia promieniowego osi magnetycznej (bpom) na względną wartość pionowej składowej indukcji magnetycznej maksymalnej  $B_{zmax}$  odniesionej do wartości indukcji magnetycznej w osi magnesu  $B_{z0}$

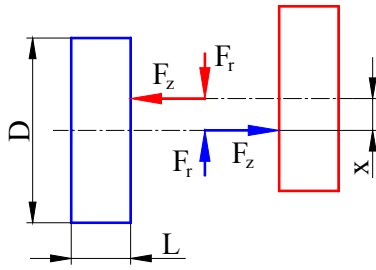
Gradient wartości  $B_{zmax}$  jest różny dla różnych długości względnych magnesu (L/D) (rysunek 6). Dla magnesów o mniejszym (L/D) gradient  $B_{zmax}$  jest większy, zatem dla magnesów o mniejszym (L/D) wpływ pochylenia czoła magnesu na wartości indukcji jest większy.



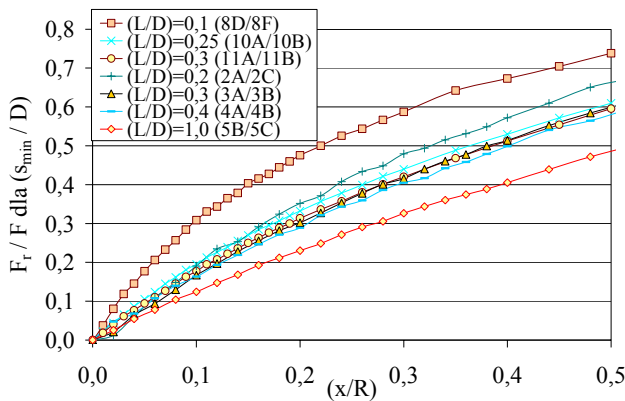
**Rys. 6.** Zmiana wartości pionowych składowych indukcji magnetycznej  $B_{z0}$  i  $B_{zmax}$  w funkcji względnej odległości od czoła magnesu (H/D), dla próbek: 2A i 5F, dla ich położenia kąowego  $\varphi=0^\circ$

Podczas współpracy magnesów, których osie magnetyczne są przesunięte promieniowo, oprócz siły osiowej występuje siła promieniowa (rysunek 7). Wartości tej siły, odniesione do wartości siły wypadkowej ( $F_r/F$ ) są tym większe, im większa jest niewspółosiowość ( $x/R$ ) i im mniejsza jest względna długość magnesów (L/D) (rysunek 8) (Burcan i Bednarek, 2008).

LITERATURA



Rys. 7. Składowe siły oddziaływania dwu odpychających się magnesów o promieniowo przesuniętych osiach



Rys. 8. Zmiana wartości promieniowej składowej siły  $F_r$  odniesionej do wartości siły wypadkowej  $F$ , w funkcji przesunięcia promieniowego magnesów ( $x/R$ ), dla magnesów o różnych względnych długościach ( $L/D$ )

Porównanie wyników uzyskanych z pomiaru indukcji magnetycznej oraz sił oddziaływania między magnesami pozwala na stwierdzenie, że na wartość siły stycznej ma wpływ różnica wartości maksymalnych indukcji występujących wzdłuż obwodu magnesów współpracujących. Potwierdza to występowanie największej wartości siły stycznej w położeniu kątowym, w którym występuje największa różnica maksymalnych indukcji magnetycznych.

3. WNIOSKI

Dla magnesów o większej względnej długości ( $L/D$ ) wpływ pochylenia czoła magnesu i niejednorodności materiału magnetycznego na wartość średniej indukcji magnetycznej  $B_{zsr}$  jest mniejszy.

Dla magnesów o większym ( $L/D$ ) siła wypadkowa  $F$  zależy w mniejszym stopniu od siły promieniowej  $F_r$ .

Precyzyjny montaż układu magnesów powinien uwzględniać przede wszystkim położenia osi magnetycznych magnesów, które w rzeczywistych układach są przesunięte i często obrócone względem osi geometrycznych tych magnesów.

1. **Bednarek R.** (2008), Badania charakterystyk wybranych układów magnesów w aspekcie dokładności ich wykonania i montażu, *Rozprawa Doktorska pod kierunkiem prof. J. Burcana*, Politechnika Łódzka, Łódź.
2. **Burcan J.** (1996), *Łożyska wspomagane polem magnetycznym*, WNT, Warszawa.
3. **Burcan J., Bednarek R.** (2007a), Determination of the magnetic field distribution for high-energy magnets, *ZEM*, z.1(149) Vol. 42 2007, ISSN 0137-5474, 7-19.
4. **Burcan J., Bednarek R.** (2007b), Wpływ dokładności wykonania i montażu magnesów wysokoenergetycznych na ich charakterystyki, *Tribologia 2/2007*, ISSN 0208-7774, 93-103.
5. **Burcan J., Bednarek R.** (2007c), Wpływ własności geometrycznych magnesów i błędów ich ustawienia na nośność łożysk magnetycznych, *XXIII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn*, Tom III, Rzeszów-Przemysł, 15-24.
6. **Burcan J., Bednarek R.** (2008), Badania sił oddziaływania między magnesami, *Tarcie w polu magnetycznym*, red. J. Burcan, Łódź, 41-50.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON FACTORS THAT CHANGE CONDITIONS OF AIDING BY THE MAGNETIC FIELD

**Abstract:** The study presents the results of magnetic induction measurements in the vicinity of front ends of high-energy magnets as well as the results of forces between two magnets measurements. It has been proved that the distribution of the induction vector is influenced by accuracy of magnets execution and mounting.

The knowledge of the course of the induction vector variations as the function of geometry and material parameters enables to determine precisely the variation of the repulsion force value of the co-operating magnets, thus will be helpful when designing pairs unloaded by means of the magnetic field, e.g. bearings or slides.

Referat opracowano w ramach Projektu Badawczego finansowanego przez Ministerstwo Szkolnictwa Wyższego pt. Badania statycznych i dynamicznych charakterystyk pasywnych przewodnic magnetycznych, Decyzja Nr 3209/T02/2006/31, z dnia 29 listopada 2006.