

Laboratoryjna metoda wytwarzania proszków ferromagnetycznych i elastycznych materiałów magnetycznych oraz eksperymentalne badania ich zachowania w elektromagnetycznej komorze 3D.

Streszczenie. W artykule przedstawiono własną elektrochemiczną metodę wytwarzania proszków ferromagnetycznych oraz elastycznych materiałów magnetycznych. Zachowania otrzymanych materiałów w polu magnetycznym poddano badaniom za pomocą magnesów trwałych. Zaprojektowano i wykonano elektromagnetyczną komorę sześcienną 3D z 6-ciomą wzbudnikami umieszczonymi w osiach układu kartezjańskiego x, y i z. Przeprowadzono próby sterowania ruchem chmury proszku ferromagnetycznego oraz skrawkiem elastycznego materiału magnetycznego.

Abstract. The article presents the author's own electrochemical method of producing ferromagnetic powders and flexible magnetic materials. The behavior of the obtained materials in a magnetic field was tested with permanent magnets. A 3D electromagnetic cubic chamber with 6 coils located in the x, y and z axes of the Cartesian system was designed and manufactured. Experiments were carried out to control the motion of a ferromagnetic powder cloud and a scrap of flexible magnetic material. (**Laboratory method of producing ferromagnetic powders and flexible magnetic materials and experimental studies of their behavior in a 3D electromagnetic chamber**).

Słowa kluczowe: proszki ferromagnetyczne, elastyczne materiały magnetyczne, technologie wytwarzania materiałów magnetycznych, elektromagnetyczna komora sześcienna 3D

Keywords: ferromagnetic powders, flexible magnetic materials, technologies for the production of magnetic materials, electromagnetic 3D cubic chamber

Wstęp

Od kilku dekad systematycznie wzrasta zainteresowanie proszkami ferromagnetycznymi. W literaturze opisywane są w coraz nowsze zastosowania proszków ferromagnetycznych (sprzęgło proszkowe, atrament magnetyczny, druk proszkiem żelaza elektrolitycznego). Nowym bardzo obiecującym obszarem badawczym jest wykorzystanie proszków ferromagnetycznych do uzyskiwania cieczy magnetycznych oraz elastycznych materiałów magnetycznych. Ciągłe też są rozwijane różne technologie proszkowe, ukierunkowane na uzyskiwanie jednorodnych prasowanych lub spiekanych rdzeni magnetycznych o dowolnych kształtach.

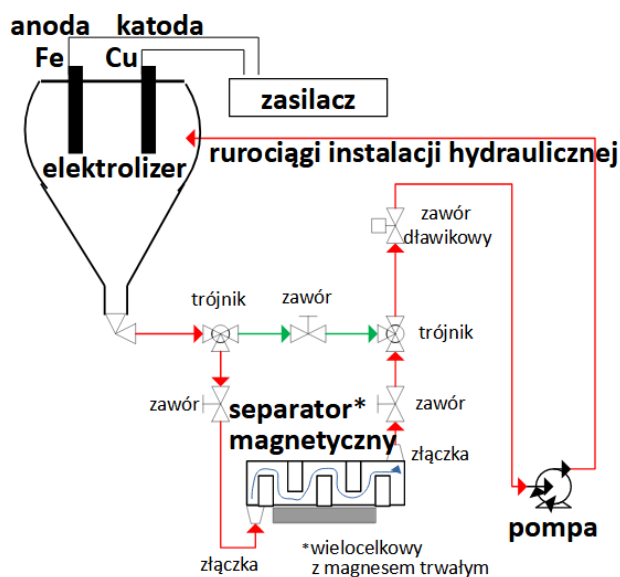
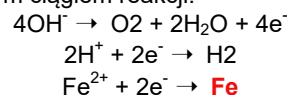
Niniejszy artykuł poświęcony jest metodzie uzyskiwania proszków ferromagnetycznych i materiałów elastycznych magnetycznych na małą skalę, która może być zrealizowana w laboratoriach badawczo-dydaktycznych uczelni [1,2,3,4].

Metoda otrzymywania proszku ferromagnetycznego opracowana w Politechnice Krakowskiej

Proszki ferromagnetyczne są otrzymywane metodami mechanicznymi poprzez ścieranie lub frezowanie, bądź też metodami fizykochemicznymi, bazującymi na redukcji związków metali, kondensacji par metali lub elektrolizie. Metoda opracowana w Politechnice Krakowskiej wykorzystuje ostatnią z wymienionych możliwości - proces elektrolizy. Proszek ferromagnetyczny otrzymywany jest z roztworu soli kuchennej z dodatkiem siarczku żelaza (stanowiącego elektrolit) w instalacji hydraulicznej, której schemat ideowy przedstawia rysunek 1. Zdjęcia kluczowych elementów, wchodzących w skład instalacji, zebrano na rysunku 2.

Te elementy to: **elektrolizer** - zbiornik, w którym zachodzi elektroliza, wyposażony w dwie elektrody: katodę wykonaną z miedzi (Cu) oraz anodę wykonaną z żelaza (Fe), wypełniony elektrolitem, którym jest roztwór soli kuchennej z dodatkiem siarczku; **separator magnetyczny** - urządzenie magnetyczne (zawierające magnes trwały

neodymowy), w którym zachodzi proces wychwytywania proszku ferromagnetycznego z elektrolitu; **pompa**, która wymusza obieg elektrolitu w instalacji hydraulicznej oraz **rurociągi**, zawierające prócz zaworów standardowych i złączek, zawór dławikowy i trójnik. Energia elektryczna jest dostarczana do elektrolizera za pośrednictwem zasilacza. Zachodzący w elektrolizerze proces elektrochemiczny, prowadzący do wytrącenia proszku ferromagnetycznego z anody i utworzenia jego zawiesiny w elektrolicie, opisany jest następującym ciągiem reakcji:



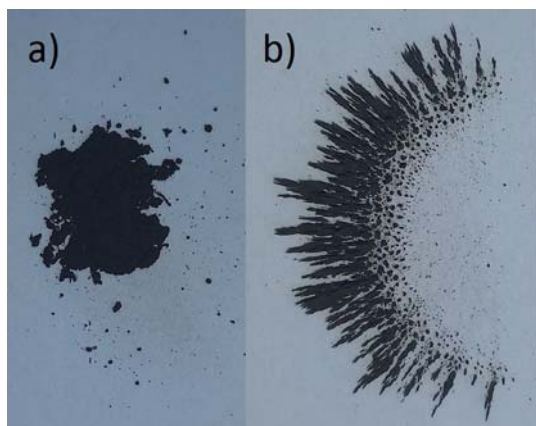
Rys.1. Schemat ideowy instalacji do wytwarzania proszku ferromagnetycznego.



Rys.2. Najważniejsze elementy składowe instalacji do wytwarzania proszku ferromagnetycznego.

Wytrącone żelazo Fe zaznaczono kolorem czerwonym. Elektrolit z zawiesziną proszku ferromagnetycznego jest kierowany poprzez instalację hydrauliczną do wielocelkowego separatora magnetycznego, w którym zachodzi proces wychwytywania proszku ferromagnetycznego przez układ magnesów trwałych neodymowych

Wyjęty z separatora magnetycznego i osuszony proszek ferromagnetyczny, rozsypany na arkuszu papieru, prezentuje zdjęcie na rysunku 3a. Po przyłożeniu od spodu kartki magnesu trwałego proszek ferromagnetyczny układa się wzdłuż linii sił pola magnetycznego, wytworzonego przez magnes trwały, co wyraźnie widać na rysunku 3b [5,6,7].



Rys.3. Zdjęcia proszku ferromagnetycznego a) bez zewnętrznego pola magnetycznego b) po przyłożeniu do spodu kartki magnesu trwałego pastylkowego.

Metoda otrzymywania elastomeru magnetycznego stosowana w Politechnice Krakowskiej

Elastomery to polimery, które charakteryzują się dużą rozciągliwością oraz dużą wytrzymałością. Materiał taki pod wpływem siły rozciągającej ulega wydłużeniu w kierunku jej działania, a po usunięciu tejże siły powraca do swoich poprzednich wymiarów.

Autorzy postanowili skupić uwagę na dwóch rodzajach elastomerów: poliuretanach oraz silikonach, ze względu na łatwość i szybkość ich wytwarzania.

W produkcji poliuretanów najczęściej wykorzystuje się następujące metody: jednoetapową, prepolimerową lub quasi-prepolimerową. Wymieniona na początku metoda jednoetapowa to metoda najprostsza, która zostanie wykorzystana przez autorów. Polega ona na dokładnym zmieszaniu w jednym etapie (stąd też i nazwa metody) składnika, opisanego jako składnik A ze składnikiem oznaczonym literą B. Składnik A to przedmieszka polioliowa, którą tworzą substancje charakteryzujące się tym, że nie

zachodzi pomiędzy nimi reakcja chemiczna, pomimo fizycznego ich zmieszania. Na przedmieszkę polioliową składają się następujące podstawowe surowce: poliole, katalizatory, środki powierzchniowo czynne, substancje pomocnicze i woda. W przypadku, gdy chcemy uzyskać materiał magnetyczny, do składnika A dodajemy dodatkowo proszek ferromagnetyczny. Składnikiem B jest izocyjanian. Po zmieszaniu składnika A ze składnikiem B zachodzi reakcja chemiczna, w wyniku której powstaje poliuretan w postaci płynnej. Czas mieszania przedmieszki polioliowej (składnik A) i izocyjanianu (składnik B) jest ograniczony, albowiem przy zbyt długim czasie mieszania poliuretan nadmiernie gęstnieje, co uniemożliwia jego wylanie do płaskiej formy. Rekomendowany czas mieszania składników A i B nazywany jest czasem życia materiału poliuretanowego (zależnym od reaktywności chemicznej całej mieszaniny).

Wzmiankowane na początku dwie kolejne metody: prepolimerowa i quasi-prepolimerowa są metodami bardziej czasochłonnymi i wieloetapowymi, które w mniejszym stopniu nadają się do realizacji w warunkach laboratoryjnych, stąd też nie były przez autorów dalej rozwijane [10,11,12].



Rys.4. Stanowisko do wytwarzania elastomeru magnetycznego.

Jednoetapowa metoda produkcji silikonów jest taka sama, jak metoda produkcji poliuretanów, a jedyną różnicą jest skład chemiczny substancji A i B. W składniku A w miejsce polioliu wchodzi żywica silikonowa, a izocyjanian w składniku B zastępuje tzw. inicjator, który powoduje polimeryzację mieszaniny.

Stanowisko do wytwarzania elastomerów magnetycznych (poliuretanów lub silikonów) jest przedstawione na fotografii na rys. 4. Na zdjęciu są uwidocznione najważniejsze elementy stanowiska: płaska forma do odlewania arkuszy elastomerów (autorzy używali formy o wymiarach 200x200x5mm), mieszadło mechaniczne, pojemniki dla składników A i B oraz waga, pozwalająca dobrać odpowiednie proporcje substancji składowych.

Kolejno podejmowane kroki, prowadzące do wytworzenia elastomeru magnetycznego, to: napełnienie pojemników składnikiem A (z domieszką proszku ferromagnetycznego) i składnikiem B, wsypanie proszku ferromagnetycznego do pojemnika ze składnikiem A i mechaniczne wymieszanie zawartości, połączenie składnika A ze składnikiem B i mechaniczne wymieszanie otrzymanej mieszaniny z zachowaniem zadanego reżimu czasowego (czas mieszania nie może być dłuższy od czasu życia materiału elastomerowego), wylanie mieszaniny do płaskiej formy, odczekanie do czasu zastygnięcia arkusza (jest to tzw. czas formowania elastomeru) oraz wyjęcie arkusza z formy. Grubość arkusza jest uzależniona od ilości mieszaniny składników A i B. Autorzy prowadzili różne eksperymenty, otrzymując warstwy poliuretanu i silikonu

o grubościach od, 4mm do 5mm oraz o procentowej zawartości proszku ferromagnetycznego od 30% do 50% (masa proszku ferromagnetycznego odniesiona do masy elastomerowego arkusza) [8,9].

Badanie właściwości uzyskanych elastycznych materiałów magnetycznych poprzez ich interakcję z magnesami trwałymi o różnych kształtach

Elastomery magnetyczne powstają poprzez dodanie proszku ferromagnetycznego, co powoduje, że ulegają odkształceniu pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Dla wstępnej wzrokowej oceny możliwości ich odkształcania przygotowano 3 próbki o różnych kształtach geometrycznych: próbkę prostokątną o wymiarach 120x200mm, próbkę kołową o średnicy 180mm oraz próbkę w postaci paska o wymiarach 4mm x 100mm. Próbki zostały wycięte z otrzymanego arkusza elastomeru o grubości 4mm.

Próbki poddano działaniu pól magnetycznych, wytwarzanych przez 3 magnesy trwałe neodymowe o danych ujętych w tabeli 1:

Tab. 1. Magnesy neodymowe użyte w doświadczeniach.

Nazwa	Rodzaj	Wymiary [mm]	Indukcja [T]
magnes 1	pastylkowy	2x22	0,11
magnes 2	pierścieniowy	40x24x10	0,12
magnes 3	pierścieniowy	50x30x40	0,06

Możliwości deformowania przygotowanych próbek prostokątnych, kołowych i paskowych za pomocą wymienionych magnesów trwałych ilustrują przykładowe rysunki 5-8



Rys.5. Próbka paskowa zwinęta za pomocą magnesu 1



Rys.6. Próbka kołowa zdeformowana za pomocą magnesu 3



Rys.7. Próbka prostokątna zdeformowana za pomocą magnesu 3



Rys.8. Próbka paskowa kształtowana na różne sposoby za pomocą magnesu 2

Rysunki 5,6,7,8 potwierdzają szerokie możliwości kształtowania (fałdowania, zwijania, rozwijania, skręcania, rozciągania itd.) próbek wykonanych z elastycznych materiałów magnetycznych. Elastyczne materiały magnetyczne charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną: pomimo wykonania setek prób nie zauważono uszkodzeń mechanicznych próbek. Następnie określono za pomocą wagi laboratoryjnej siłę przylegania próbek do magnesów trwałych przy działaniu siły normalnej i siły stycznej do powierzchni próbek. Ideę pomiaru siły przylegania normalnej i stycznej dla przykładowej próbki prostokątnej pokazuje rysunek 9.



Rys.9. Pomiar siły działającej w kierunku normalnym lub stycznym do powierzchni próbki prostokątnej za pomocą wagi laboratoryjnej

W przypadku normalnego kierunku działania siły oderwanie magnesu trwałego następowało przy wartości równej 3,97 N (0,4044 Kg) zaś w przypadku kierunku stycznego działania siły – przy wartości równej 11,39 N (1,1616 Kg). Naprężenia w chwili oderwania wynosiły odpowiednio 0,493 Mpa oraz 1,416 Mpa.

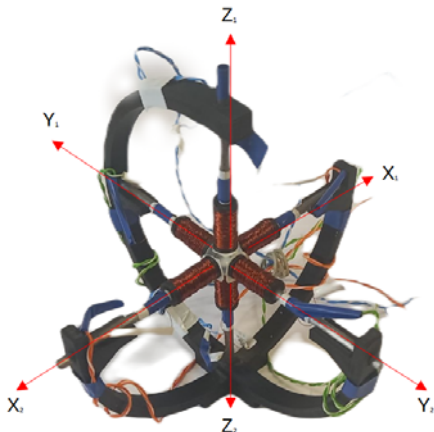
Wyniki badań wstępnych uznano za obiecujące, stąd też kolejnym krokiem będzie wykonanie pełnych badań mechanicznych na maszynie wytrzymałościowej oraz pełnych badań właściwości magnetycznych na aparacie Epsteina.

Projekt i wykonanie (z użyciem technologii druku 3D) elektromagnetycznej komory 3D z 6-ciomą wzbudnikami umieszczonymi w osiach układu kartezjańskiego x, y i z

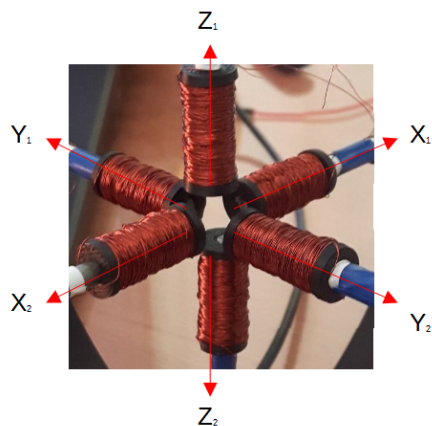
Dla zbadania możliwości sterowania przemieszczaniem się chmury proszku ferromagnetycznego za pomocą pola magnetycznego zbudowano komorę elektromagnetyczną 3D z zamkniętą (ograniczoną ścianami plastikowymi)

przestrzenią roboczą w kształcie sześcienniej kostki o wymiarach 10x10x10mm, wyposażoną w 6 wzbudników (elektromagnesów) umiejscowionych wzdłuż osi x, y, z .

Widok ogólny komory elektromagnetycznej 3D oraz fragment komory z uwidocznionym układem wzbudników: $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$ oraz uwidocznioną przestrzenią roboczą w postaci kostki sześcienniej, ograniczonej przezroczystymi plastikowymi powierzchniami, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 10 i 11.



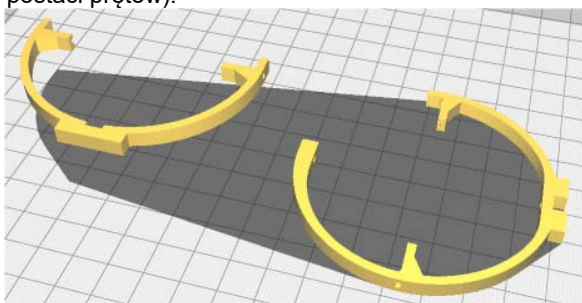
Rys.10. Komora elektromagnetyczna 3D – widok ogólny.



Rys.11. Fragment komory elektromagnetycznej 3D z uwidocznionym układem wzbudników: $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$ i uwidocznioną przestrzenią roboczą w postaci przezroczystej plastikowej kostki sześcienniej.

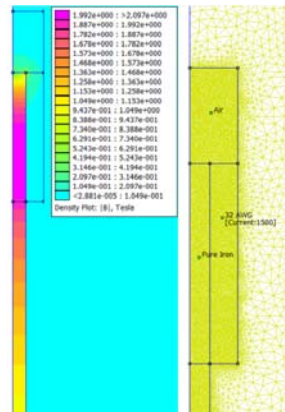
Konstrukcję nośną dla komory i zespołu wzbudników zaprojektowano w programie Fusion 360 i wykonano w technologii druku 3D na drukarce Ender 3 (rys.12) [13].

Jak widać na rysunku 5, konstrukcja nośna składa się z dwóch oddzielnych elementów: półokręgu ($\frac{1}{2}$ okręgu) i $\frac{3}{4}$ okręgu, które zespolono na wcisk, tworząc układ sferyczny. 6 wzbudników nawinięto na karkasach, nasuniętych na 6 niezależnych otwartych rdzeni ferromagnetycznych (w postaci prętów).

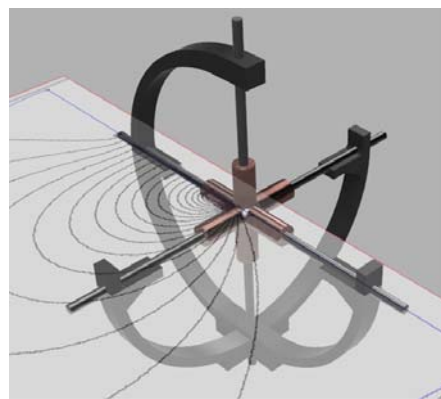


Rys.12. Konstrukcja nośna komory elektromagnetycznej 3D - przed złożeniem.

Cewki nawinięto przewodem nawojowym miedzianym o średnicy 0,2mm, a liczbę zwojów (z) tak dobrano, aby przy prądzie wzbudzenia $I=1A$ indukcja pola magnetycznego przy ścianie plastikowej sześcienniej kostki wynosiła 0,314T. Dobrana liczba zwojów to $z=1500$. Rozkład przestrzenny pola magnetycznego w przestrzeni roboczej i wokół cewki, wyznaczony w programie FEMM, przedstawia rysunek: 13. Rozkład linii sił pola magnetycznego przedstawia rysunek: 14.

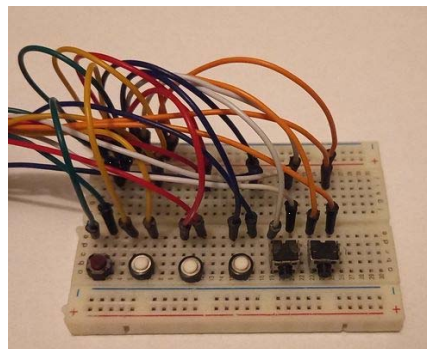


Rys.13. Rozkład przestrzenny pola magnetycznego wokół cewki, wyznaczony w programie FEMM wraz z wygenerowaną siatką obliczeniową [15].



Rys.14. Rozkład linii sił pola magnetycznego w komorze wokół cewki Y_1 , wyznaczony w programie FEMM [14].

Układ zasilania, zrealizowany na płytce stykowej, umożliwił autonomiczne sterowanie prądami wszystkich 6 cewek: $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$ - podawane sygnały napięciowe są przebiegami prostokątnymi (rysunek 15).



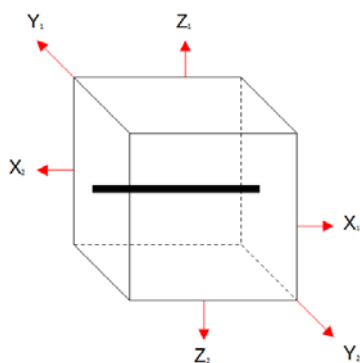
Rys.15. Płytkę stykową do sterowania układem 6 wzbudników komory elektromagnetycznej 3D.

W ramach prowadzonych doświadczeń wypełniono komorę proszkiem ferromagnetycznym i potwierdzono eksperymentalnie możliwość skokowego przemieszczania

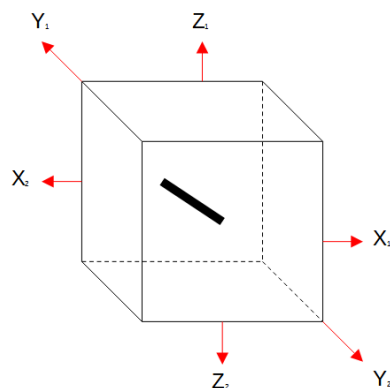
się chmury proszku ferromagnetycznego pomiędzy 6 ścianami komory poprzez odpowiednie przełączanie napięć pomiędzy wzbudnikami.

Z punktu widzenia teorii przetworników elektromechanicznych komora elektromagnetyczna 3D stanowi silnik reluktancyjny z wirnikiem proszkowym o ruchu dyskretnym, charakteryzujący się 6 stopniami swobody w rozumieniu teorii robotyki (6 stopni swobody oznacza, że potrzebne jest podanie 6 współrzędnych dla jednoznacznego określenia położenia proszku w przestrzeni roboczej). Dla wskazania cewki, która jest aktualnie zasilana (aktywowana), wprowadźmy wektor sterowań, zawierający 6 współrzędnych odpowiadających wzbudnikom $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$. Przykładowo wektor o postaci $[1,0,0,0,0,0]$ oznacza, że wzbudzona jest cewka X_1 , zaś wektor o postaci $[0,0,0,0,1,0]$ – że wzbudzona jest cewka Z_1 . Zasilając wzbudniki różnymi sekwencjami napięć, można uzyskać różne trajektorie ruchu chmury ferromagnetycznej. Rysunki 16-24 przedstawiają uzyskane charakterystyczne trajektorie przemieszczania się chmury ferromagnetycznej pomiędzy ścianami komory roboczej. Poniżej zestawiono te trajektorie i podano związane z nimi sekwencje wektorów sterowań:

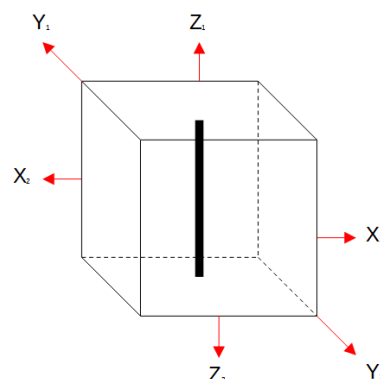
- trajektoria odcinkowa wzdłuż osi x (rys.16).
[1,0,0,0,0,0]; [0,1,0,0,0,0]; [1,0,0,0,0,0]
- trajektoria odcinkowa wzdłuż osi y (rys.17).
[0,0,1,0,0,0]; [0,0,0,1,0,0]; [0,0,1,0,0,0]
- trajektoria odcinkowa wzdłuż osi z (rys.18).
[0,0,0,0,1,0]; [0,0,0,0,0,1]; [0,0,0,0,1,0]
- Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie xz (rys.19).
[0,0,1,0,0,0]; [0,0,0,0,1,0]; [0,0,0,1,0,0];
[0,0,0,0,0,1]; [0,0,1,0,0,0]
- Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie xy (rys.20).
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,1,0,0,0]; [1,0,0,0,0,0];
[0,0,0,1,0,0]; [0,1,0,0,0,0]
- Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie yz (rys.21).
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,0,0,1,0]; [1,0,0,0,0,0];
[0,0,0,0,0,1]; [0,1,0,0,0,0]
- Trajektoria kwadratowa z przekątną (rys.22).
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,0,0,1,0]; [1,0,0,0,0,0];
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,0,0,0,1]; [1,0,0,0,0,0];
[0,1,0,0,0,0]
- Trajektoria w postaci „płaskiej ósemki” (rys.23).
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,0,0,1,0]; [0,0,0,0,0,1];
[1,0,0,0,0,0]; [0,1,0,0,0,0]
- Trajektoria w postaci „przestrzennej ósemki” (rys.24).
[0,1,0,0,0,0]; [0,0,0,0,1,0]; [0,0,1,0,0,0];
[0,0,0,1,0,0]; [0,0,0,0,0,1]; [1,0,0,0,0,0];
[0,1,0,0,0,0]



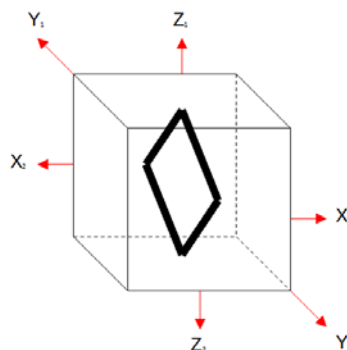
Rys.16. Trajektoria odcinkowa wzdłuż osi x (naprzemiennie wzbudzone cewki: X_1, X_2)



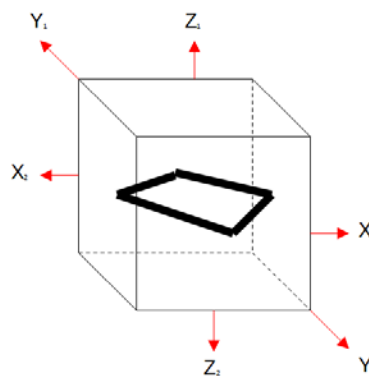
Rys.17. Trajektoria odcinkowa wzdłuż osi y (naprzemiennie wzbudzone cewki: Y_1, Y_2)



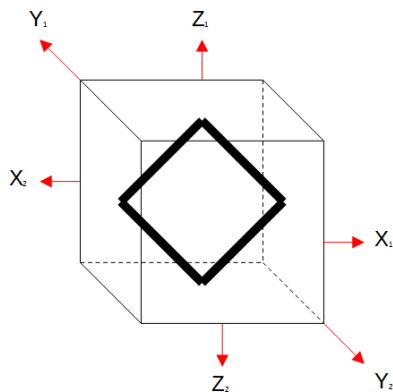
Rys.18. Trajektoria odcinkowa wzdłuż osi z (naprzemiennie wzbudzone cewki: Z_1, Z_2)



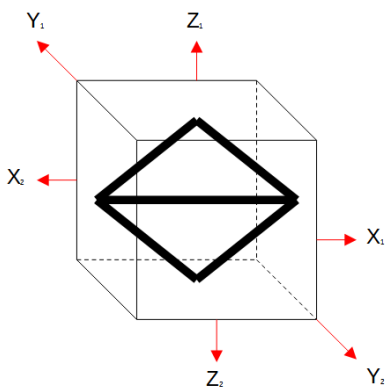
Rys.19 Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie osi xz (kolejno wzbudzone cewki: Y_1, Z_1, Y_2, Z_2, Y_1)



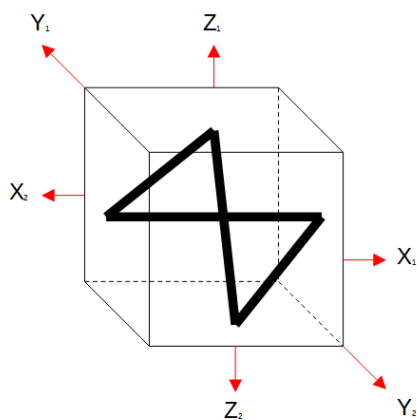
Rys.20. Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie osi xy (kolejno wzbudzone cewki: X_2, Y_1, X_1, Y_2, X_2)



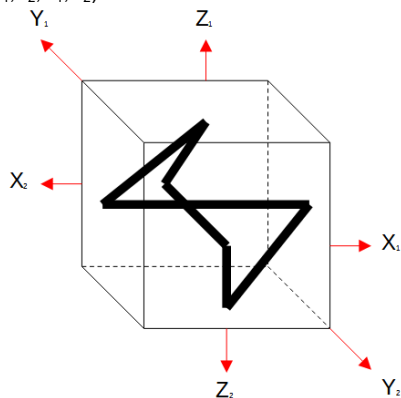
Rys.21. Trajektoria kwadratowa w płaszczyźnie osi yz (kolejno wzbudzone cewki: X_2, Z_1, X_1, Z_2, X_2)



Rys.22. Trajektoria kwadratowa z przekątną (kolejno wzbudzone cewki: $X_2, Z_1, X_1, X_2, Z_2, X_1$)

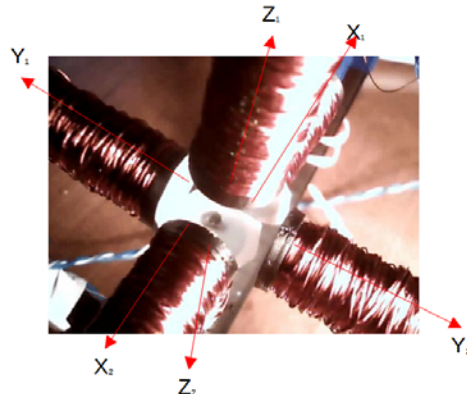


Rys.23. Trajektoria w postaci „płaskiej ósemki” (kolejno wzbudzone cewki: X_2, Z_1, Z_2, X_1, X_2)



Rys.24. Trajektoria w postaci „przestrzennej ósemki” (kolejno wzbudzone cewki: $X_2, Z_1, Y_1, Y_2, Z_2, X_1, X_2$)

Eksperymenty te powtórzono, umieszczając wewnątrz komory roboczej niewielki skrawek elastomeru magnetycznego o średnicy około 2mm (rys. 25).



Rys.25. Sterowanie przemieszczaniem się skrawka elastomeru magnetycznego w komorze elektromagnetycznej 3D

Również i w tym przypadku możliwe było uzyskanie wszystkich trajektorii skokowego przemieszczania się skrawka elastomeru pomiędzy 6 ścianami komory elektromagnetycznej, zgodnie z trajektoriami przedstawionymi na rysunkach 16 - 24.

Pozytywne wyniki eksperymentów otwierają drogę do poszukiwania możliwych zastosowań. Autorzy widzą możliwości opracowania silnika z wirnikiem prozkowym do realizacji zadań specjalnych np szlifowania lub polerowania powierzchni niemagnetycznych brył przestrzennych o bardzo nieregularnych kształtach. Inna możliwość to opracowanie komory do wizualizacji i symulacji rozchodzenia się chmur pyłowych np. piasku podczas burzy piaskowej, czy też zawiesiny smogu w atmosferze.

Wnioski

Jest możliwe uzyskiwanie proszków ferromagnetycznych oraz elastycznych materiałów magnetycznych w warunkach laboratoryjnych na małą skalę. Możliwość ta pozwala – poprzez zmianę warunków fizykochemicznych i poprzez zmianę parametrów w instalacjach do ich wytwarzania – uzyskiwać materiały o różnych składach chemicznych oraz o różnych właściwościach mechanicznych i magnetycznych, co w konsekwencji pozwala na prowadzenie ciekawych eksperymentów badawczych, jak też stwarza szerokie możliwości uatrakcyjnienia procesu dydaktycznego w zakresie nauczania nowoczesnego materiałoznawstwa.

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdzają szerokie możliwości zmiany kształtów powierzchni elastycznych materiałów magnetycznych za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego.

Przedstawiono koncepcję komory elektromagnetycznej 3D, która może być rozważana jako skokowy silnik reluktancyjny z wirnikiem prozkowym. Zrealizowany program badawczy obrazuje możliwości przemieszczania chmury proszku ferromagnetycznego wewnątrz przestrzeni roboczej i sterowania jej ruchem w takt różnych sekwencji wektorów sterujących.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Soltys, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, Ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.soltys@pk.edu.pl; mgr inż. Sebastian Bartel, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, Ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: sebastian.bartel@doktorant.pk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, Ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl

LITERATURA

- [1] Rasoul K., Nekouei F., Rashchi Arsalan R., *Copper nanopowder synthesis by electrolysis method in nitrate and sulfate solutions*, *Jurnal Article*, 2013, 91-96
- [2] Francis H. (Sam) Froes, *A historical perspective of titanium powder metallurgy*, *Titanium Powder Metallurgy*, 2015, 1-19
- [3] G.Z.Chen, *Forming metal powders by electrolysis*, *Advances in Powder Metallurgy*, 2013, 19-49
- [4] Barbara K., *Elektrowydziałanie metali – procesy hydroelektrometalurgiczne, Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 1996, 233-247
- [5] <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/elektroliza;3897365.html>, stan z dn. 15.06.2021
- [6] Shripad T.Revankar, *Chapter Four - Nuclear Hydrogen Production, Storage and Hybridization of Nuclear Energy*, *Academic Press*, 2019 49-117
- [7] Ali SHRIFIAN-ESFAHNI, Mohammad Taghi SALEHI, Mojtaba NASR-ESFAHNI, Ehsan EKRAMIAN – Katedra Chemii, Oddział w Nadżafabadzie, Wolny Uniwersytet Islamski (Islamic Azad University), CHEMIK, Wydawnictwo naukowe PWN, 2015, 69, 1, 19–32”
- [8] Ali SHRIFIAN-ESFAHNI, Mohammad Taghi SALEHI*, Mojtaba NASR-ESFAHNI, Ehsan EKRAMIAN, *Superparamagnetyczne nanocząstki tlenku żelaza modyfikowane chitozanem: projektowanie, wytwarzanie, opis i działanie przeciwbakteryjne* Katedra Chemii, Oddział w Nadżafabadzie, Wolny Uniwersytet Islamski (Islamic Azad University), Iran, 2015, 69, 1, 19–32
- [9] Dylewski R., Gonet M., *Elektrochemia przemysłowa: inżynieria elektrochemiczna, Elektrochemia przemysłowa: inżynieria elektrochemiczna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice; 2002
- [10] Ionescu M., *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*, *Rapra Publishing*, 2005, 23 – 25
- [11] Kaleta J., *Materiały magnetyczne SMART*, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2013
- [12] Sołtys K., Bartel S. Kluszczyński K., *Instalacja do wytwarzania proszku ferromagnetycznego*, *Artykuły konferencyjne SME 2022*
- [13] <https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>, stan z dn. 15.06.2021
- [14] <https://www.autodesk.pl/products/fusion-360>, stan z dn. 15.06.2021
- [15] <https://www.femm.info/wiki/HomePage>, stan z dn. 20.05.2022