

Zbigniew Hilary Żurek
Politechnika Śląska, Gliwice

SPRĘŻYSTOŚĆ MECHANICZNA W OBWODACH MAGNETYCZNYCH – CZĘŚĆ WSTĘPNA

THE MECHANICAL ELASTICITY IN MAGNETIC CIRCUITS - THE PREMISES

Abstract: While designing electric devices it is usually assumed that material's magnetic parameters are constant or influenced by temperature only. In real life, ferromagnetic material properties depend largely on mechanical stresses. The paper discusses these problems and the example given is electromagnet operation.

Keywords: Villari's magnetoelastic effect, variability of magnetic parameters, electrical devices and machines.

Streszczenie

Na etapie projektowania urządzeń elektromagnetycznych przyjmuje się że parametry magnetyczne materiału są stałe, co najwyżej zależne od temperatury. Parametry materiału ferromagnetycznego są zależne w dużej mierze od stanu naprężeń mechanicznych. Czułość magnetosprężysta stali konstrukcyjnych jest niska. Czułość stali elektrotechnicznych - szczególnie na blachy transformatorowe jest znaczna i nie można jej pominąć w rozważaniach elektrotechnicznych. W artykule omówiono powyższe zagadnienie na przykładzie konstrukcji elektromagnesu..

1. Wprowadzenie

Stal konstrukcyjna ze względu na dobre właściwości mechaniczne jest podstawowym materiałem stosowanym w technice. Element konstrukcyjny wykonany ze stopu żelaza ma właściwości magnetyczne. Wielkościami fizycznymi - magnetycznymi czułymi na strukturę realną materiału są przede wszystkim:

- przenikalność magnetyczna początkowa i maksymalna,
- natężenie koercji, straty histerezy, straty wiroprądowe,
- straty relaksacyjne.

Zmienność przenikalności materiału w danej, ustalonej temperaturze [1] może być wywołana między innymi:

- procesem obróbki plastycznej, procesem obróbki cieplnej, czynnikiem chłodzącym, relaksacją naprężeń, czasem starzenia.

Temperatura jest na tyle istotna, że w fundamentalnym dziele: „Ferromagnetyzm”, [2] Bortz wskazał, że obok naprężeń jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na zmiany parametrów magnetycznych materiału. W arty-

kule opisano metodę, uwzględniającą współzależności parametrów magnetycznych materiału z procesem obciążeń sprężystych.

2. Efekt Villariego

Zjawiskiem odwrotnym do magnetostrykcji jest konwersja magnetosprężysta, polegająca na zmianie parametrów magnetycznych ferromagnetyków pod wpływem naprężeń zewnętrznych. Zależność ta, związana z ferromagnetykami, nazwana od odkrywcy efektem Villariego i umożliwia pomiar obciążeń mechanicznych w elementach maszyn. W określonym zakresie natężeń pola magnetycznego i naprężeń efekt Villariego jest odwrotnością efektu Joule'a. Wartość współczynnika magnetostrykcji opisuje podatność materiału do badań magnetycznych naprężeń. Zmiany przenikalności materiału od obciążeń sprężystych wyprowadzane są z zachodzących w materiale procesów energetycznych [2, 3].

Przenikalność magnetyczna materiału [2] jest w przybliżeniu opisana zależnością:

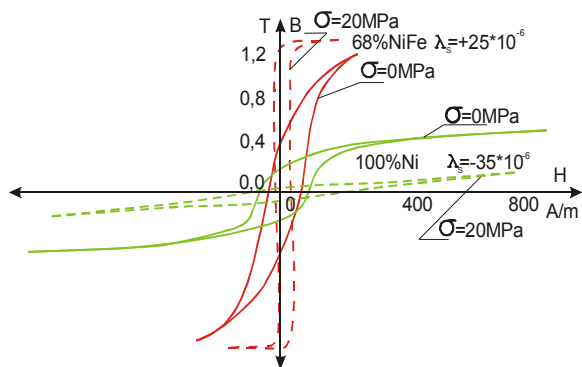
$$\mu_r \approx \frac{J_s^2}{3 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_s \cdot \sigma} = \frac{J_s^2}{3 \mu_0 \lambda_s E_Y} \frac{1}{\varepsilon}, \quad (1)$$

gdzie: μ_r - przenikalność magnetyczna względna,

- E_Y - moduł Younga,
- ε - odkształcenie wzdłużne,
- λ_s - współczynnik magnetostrykcji,
- σ - naprężenia mechaniczne,
- J_s - magnetyzacja nasycenia.

Odwracalne zmiany magnetostryżyste występują w ograniczonym zakresie we wszystkich materiałach spolaryzowanych [2].

Współczynnik magnetostryżyki λ jest równoważny współczynnikowi czułości magnetostryżystej d . Wpływ naprężeń na związki magnetostryżystego materiału (o magnetostryżyki dodatniej i ujemnej) dla czystego Ni oraz stopu 68% NiFe pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Pętla histerezy magnetycznej

Współczynniki magnetostryżyki stopów żelazo - nikiel uzyskiwały maksymalny współczynnik magnetostryżyki $24 \cdot 10^{-6}$ przy zawartości 20% lub 40 % niklu. Współczynniki magnetostryżyki współczesnych materiałów sięgają rzędu $2000 \cdot 10^{-6}$. Współczynniki magnetostryżyki żelaza technicznego są zależne od jego czystości i zmieniają się nieliniowo od $0,58 \cdot 10^{-6}$ do $4,40 \cdot 10^{-6}$ dla żelaza elektrolitycznego przy liniowym wzroście natężenia pola magnetycznego magnesującego. Wpływ zanieczyszczeń jest także istotny. Dla żelaza technicznego o zanieczyszczeniach w przedziale od 0,3% do 0,4% współczynnik magnetostryżyki może wzrosnąć do $5,31 \cdot 10^{-6}$. Pierwiastki stopowe krzemu i węgla zmieniają współczynnik magnetostryżyki. Dla zawartości krzemu od 2% do 8% dla osi krystalograficznych [13] współczynnik magnetostryżyki zmienia się od $27 \cdot 10^{-6}$ do $-9 \cdot 10^{-6}$. Obróbka cieplna, obróbka plastyczna, temperatura materiału także wpływają na wartość współczynnika magnetostryżyki.

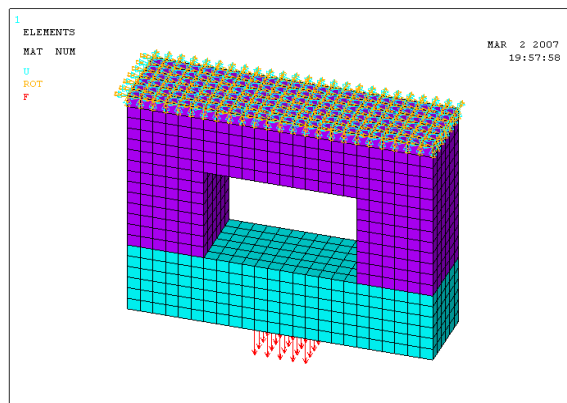
3. Analiza mechaniczna pracy elektromagnesu

Do zamodelowania przyjęto proste urządzenie elektromagnetyczne jakim jest elektromagnes. Przeprowadzono porównania rozkładu indukcji elektromagnesu uwzględniające wpływ naprężeń w jarzmie i zworze z rozwiązaniem, które ten wpływ pomija. Zaprojektowano elektroma-

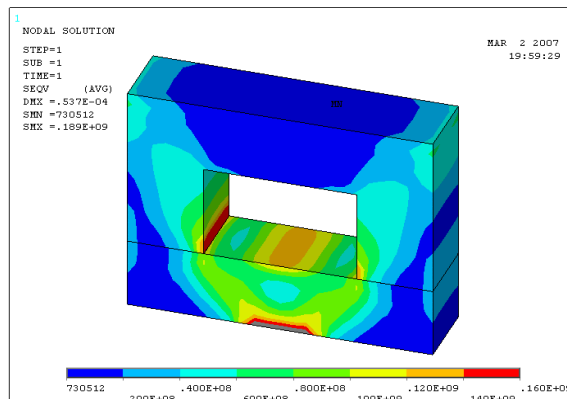
gnes o wymiarach zewnętrznych 120 mm szerokości na 100 mm wysokości oraz grubości i szerokości kolumn 30 mm.

4. Rozkład naprężeń w elemencie (MES)

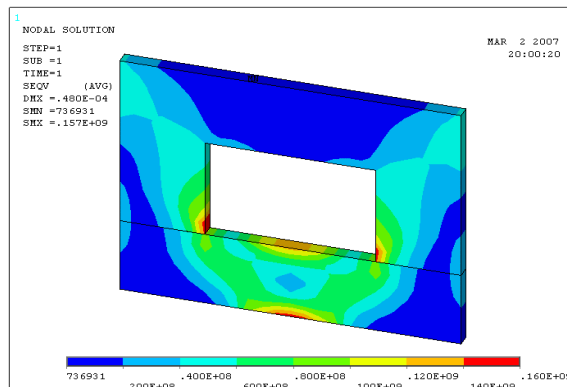
Element został utwierdzony od strony jarzma i obciążony od strony zwory. Następnie wyznaczono rozkłady naprężeń i przebiegi izolinii naprężeń jak pokazano na kolejnych rysunkach od rys. 2 do rys. 6.



Rys. 2. Sposób utwierdzenia i obciążenia elementu

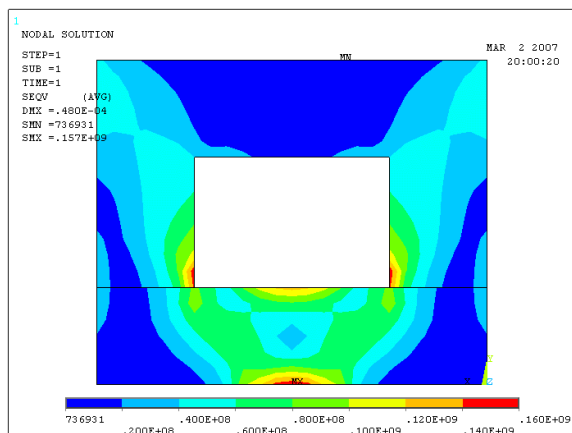


Rys. 3. Rozkład naprężeń w bryle elektromagnesu



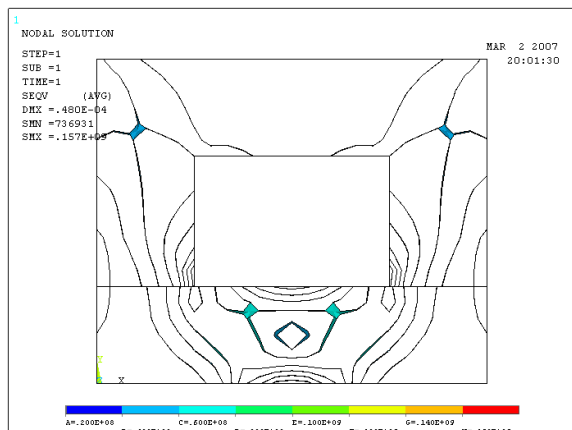
Rys. 4. Rozkład naprężeń wewnątrz elektromagnesu

Z części środkowej „wycięto” warstwę będącą podstawą do przypisania elementowi parametrów magnetycznych dla odpowiednich obszarów naprężeń.



Rys. 5. Rozkład naprężeń 2D

Płaski obraz rozkładu naprężeń ułatwia odwzorowanie izolinii naprężeń [4, 5] jak pokazano na rysunku 6.

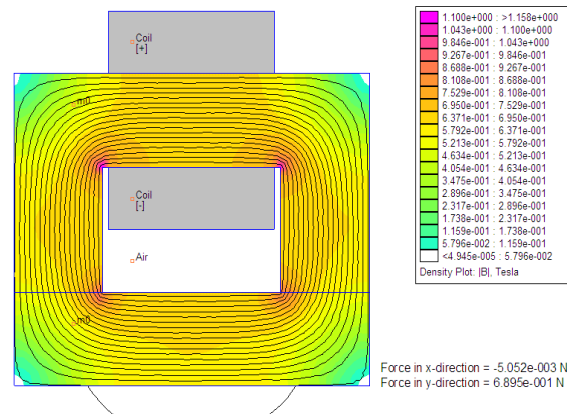


Rys. 6. Izolinie naprężeń

Pierwotnie założona ilość izolinii (co $1/8 \sigma_{\max}$) ograniczono z następstwem skoku $1/4 \sigma_{\max}$.

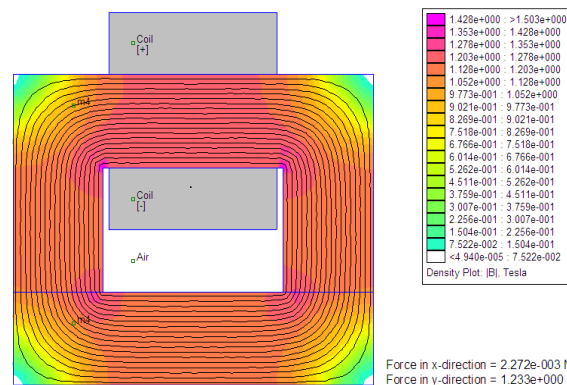
5. Analiza magnetyczna pracy elektromagnesu (MES)

Zastosowany materiał (nie jest opisany w programie symulacyjnym) nie zawiera odpowiednich krzywych pierwszego magnesowania w katalogu programu. Krzywe te zostały wprowadzone na podstawie badań doświadczalnych. Na rysunku 7 pokazano przypadek rozkładu indukcji magnetycznej jeżeli założono, że materiał nie przenosi obciążeń mechanicznych.



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej

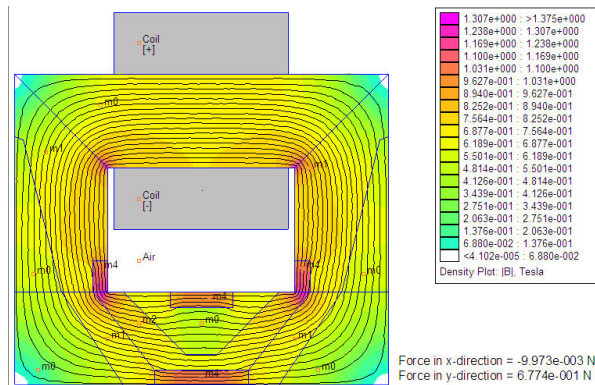
Na rysunku 8 podano teoretyczne rozwiązanie, w którym cały materiał jest obciążony jednorodnie w granicy jego sprężystości.



Rys. 8. Indukcja magnetyczna przy stanie jednorodnym naprężeń

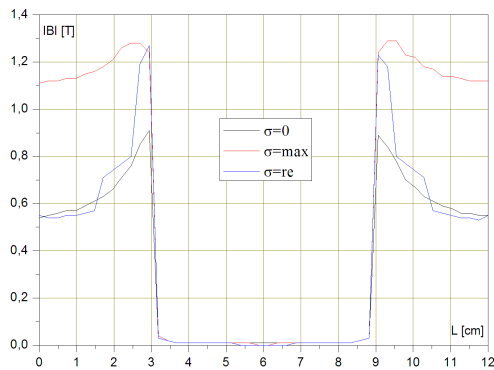
Przybliżone przeniesienie mapy izolinii naprężeń z modelu mechanicznego do modelu magnetycznego związane jest z przypisaniem niezależnych krzywych pierwszego magnesowania poszczególnym strefom materiału. Może to odbywać się jedynie w sposób uproszczony i to tylko w projektach 2D. Brak jest programów do automatycznego przenoszenia zarysów stref izolinii naprężeń zarówno w programach 2D jak i 3D.

Na rysunku 9 odzwierciedlającym stan zbliżony wykazano lokalne zmiany magnesowania materiału pochodzące od naprężeń mechanicznych.



Rys. 9. Indukcja magnetyczna zależna od naprężeń

Na rysunku 10 zamieszczono porównanie wartości indukcji magnetycznej w miejscu połączenia jarzma ze zworą dla trzech omawianych przypadków.



Rys. 10. Porównanie wartości indukcji magnetycznej w szczelinie

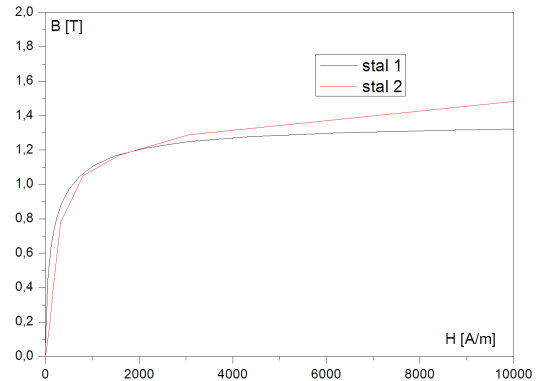
Rozpatrywana wartość indukcji w materiale modelu zbliżonego do rzeczywistego jest inna od stanu bez naprężeniowego i pokrywa się ze strefami wzrostu naprężeń.

6. Podsumowanie

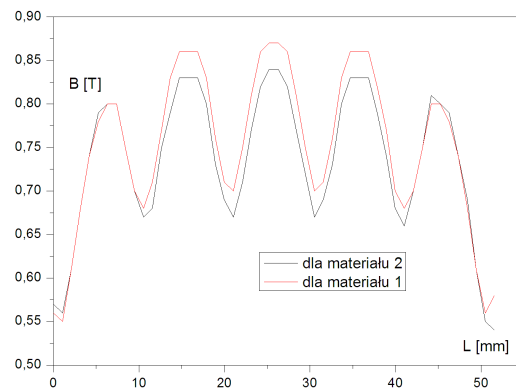
Pomijanie zmienności parametrów magnetycznych materiału od temperatury lub naprężeń może być przyczyną obliczeniowych błędów od wartości kilku do kilkunastu procent. Różnice pomiędzy obliczeniami teoretycznymi, a wynikami pomiarów mogą mieć często mechaniczne (naprężeniowe) przyczyny (sposób i siła dokręcenia blach transformatora zmienia jego parametry eksploatacyjne).

Podobnych zmian można doszukiwać się w elementach wykrojów silników elektrycznych. Blachy stali krzemowych są bardzo czułe na zmiany naprężeń (co pokazały wcześniejsze zastosowania magnetosprężystości w transduktora-

rach i toroduktorach). Niewielka zmiana parametrów magnetycznych stali stojana silnika jak pokazano na rysunku 11 spowodowała zauważalne zmiany indukcji magnetycznej w szczelinie w obszarze jednego bieguna wirnika i wykroju stojana (rys. 12).



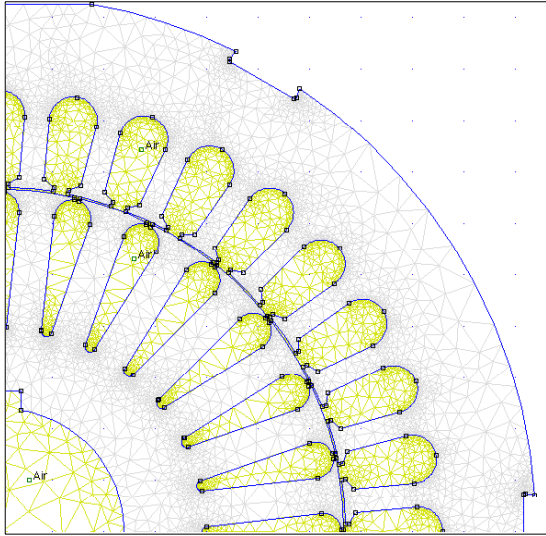
Rys. 11. Krzywe pierwszego magnesowania stali elektrotechnicznych



Rys. 12. Wynikowe zmiany indukcji magnetycznej

Dynamiczne zmiany naprężeń są przyczyną dodatkowych pulsacji pola magnetycznego a co za tym idzie i strat. W chwili kiedy sprawności silników osiągają parametry graniczne to uzyskanie poprawy o kilka dziesiątych procent poprawy jest także istotne. W części drugiej referatu analizie poddany zostanie silnik, którego wycinek przekroju został zamieszczony na rysunku 13.

Na etapie wstępnym, wymiary kształtek zostały przeniesione z programu CAD do programu symulacyjnego FEMM 4.2 2D. Dalsze przeliczenia będą prowadzone równoległe w programie FLUX i FEMM.



Rys. 13. Wycinek przekroju poprzecznego silnika

7. Literatura

[1]. Moroń J.W., Rasek J.: Permeability disaccommodation in α Fe-C-N in the temperature range from -40°C to 180°C , Acta Physica Polonica Vol. XXXV (1969), pp. 421-429.

[2]. Bozorth R.: *Ferromagnetism*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1993.

[3]. Z. H. Żurek: Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element, NDT&E international (independent nondestructive testing and evaluation), 38 (2005), pp. 589-595.

[4]. Żurek Z.H.: Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA, z. 196, str. 1-150, monografia habilitacyjna - Gliwice, 2005.

[5]. Żurek Z. H.: Sposób symulacji stanu materiału elementu stali konstrukcyjnej metodą magnetyczną, P 372 738 – zgłoszenie patentowe, Gliwice 2005.

Autorzy

Zbigniew Hilary ŻUREK,

prof. nzw. dr hab. inż.,

Politechnika Śląska, Wydział Transportu,
Katedra Transportu Szynowego, 40-019 Katowice,
ul. Krasińskiego 8. Phone/Fax: (+48,32) 255-43-71,
E-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl