

Piotr ŁUKASZEWICZ*

STANOWISKO UMOŻLIWIAJĄCE POMIAR ODKSZTAŁCEŃ LOKALNYCH MATERIAŁÓW FERROMAGNETYCZNYCH

W pracy analizowano jakie są możliwości pomiarowe umożliwiające weryfikację dokładności obliczania sił lokalnych pochodzenia magnetycznego. Odkształcenie obiektu pod wpływem zewnętrznego naprężenia jest całkowicie powiązane z rozkładem tego naprężenia. Z tego powodu w celu weryfikacji pomiarowej obliczanych rozkładów sił, autor wykonał stanowisko umożliwiające pomiar odkształceń lokalnych. W pracy opisano zbudowane stanowisko oraz przedstawiono procedurę pomiarową. Zaprezentowano wyniki pomiarów dla różnych materiałów ferromagnetycznych. Na podstawie uzyskanych wyników wykonano cyfrowe profile odkształceń badanych materiałów. Profile te będą wykorzystane do porównania wyników symulacji z wynikami pomiarów.

SŁOWA KLUCZOWE: siły lokalne, siły magnetyczne, pomiar odkształceń.

1. OBLICZANIE SIŁ LOKALNYCH POCHODZENIA MAGNETYCZNEGO

Podstawą do formułowania zależności które opisują siły magnetyczne jest zasada pracy wirtualnej. Metoda ta polega na wyznaczeniu energii lub koenergii względem wirtualnego przesunięcia [1]. Siła w tej metodzie opisana jest następująco:

$$\mathbf{F} = \frac{dW(s)}{ds} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_V \left(\int_0^H \mathbf{B} d\mathbf{H} \right) dV \right] \quad (1)$$

gdzie: W – energia magnetyczna, \mathbf{B} – wektor indukcji magnetycznej, \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, V – objętość, s – wirtualne przesunięcie.

Wirtualne przesunięcie w tej metodzie można realizować na dwa sposoby. Można rozpatrywać wirtualne przesunięcie źródeł pola w odniesieniu do nieruchomego obszaru z polem magnetycznym, lub wirtualne przesunięcie obszaru, na który działają siły np. obszaru wirnika w powiązaniu z nieruchomym obszarem zewnętrznym np. obszarem stojana. W efekcie otrzymuje się dwie kategorie

* Politechnika Poznańska

sformułowań: formuły wykorzystujące objętościową gęstość siły i formuły wykorzystujące tensor naprężeń.

Do pierwszej kategorii sformułowań zaliczyć można metodę prądów magnetyzacji. W metodzie tej zakłada się, że istniejący materiał magnetyczny można zastąpić rozkładem prądów magnetyzacji \mathbf{J}_m . Rzeczywiste pole magnetyczne jest zastąpione polem ekwiwalentnym, w którym nie ma materiałów ferromagnetycznych, a równoważne prądy magnetyzacji są umieszczone w powietrzu. Gęstość siły jest opisana podobnie do siły Lorenz'a, tzn. wektor \mathbf{J}_m jest mnożony przez wektor indukcji magnetycznej \mathbf{B} [2].

Drugim przykładem jest metoda równoważnych źródeł ładunków magnetycznych. W tym przypadku materiał magnetyczny jest reprezentowany przez równoważny mu rozkład ładunków magnetycznych, a gęstość siły to iloczyn tego rozkładu i wektora natężenia pola magnetycznego [3].

Drugą kategorię sformułowań reprezentuje np. metoda tensora naprężeń Maxwell'a, w której gęstość siły opisuje się za składowych stycznych i normalnych wektora indukcji magnetycznej.

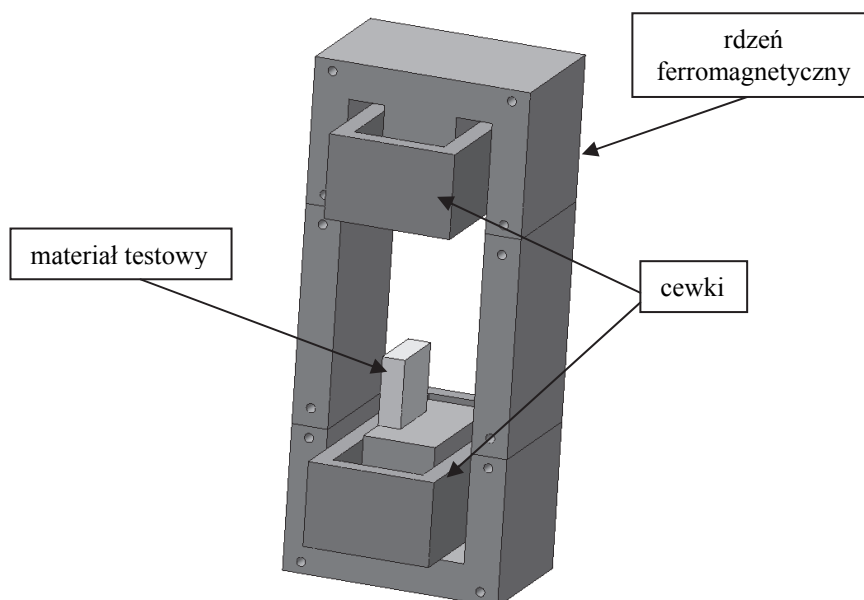
W przypadku dokładnego rozwiązania równań Maxwella każda z wymienionych metod daje takie same wyniki w odniesieniu do siły globalnej. Dlatego też metody te można uznać za równoważne. Niestety, metody równoważne dla wyznaczenia siły globalnej nie gwarantują jednakowych wyników w przypadku obliczania rozkładu sił lokalnych [2, 4, 5]. Dodatkowe komplikacje pojawiają się jeżeli stosowana jest metoda elementów skończonych. Nawet przy wyznaczeniu siły globalnej powszechnie używane oprogramowanie MES daje satysfakcjonującą dokładność tylko dla odpowiednio gęstej siatki dyskretyzującej [6].

2. POMIARY ODKSZTAŁCEŃ LOKALNYCH

Najlepszym sposobem na ocenę, która z metod daje najbardziej wiarygodne wyniki jest weryfikacja pomiarowa wykonanych obliczeń. Pomiar sił w różnych miejscach tego samego obiektu jest praktycznie niemożliwy. Natomiast pomiar siły globalnej nie jest w tym przypadku dobrym rozwiązaniem, ponieważ różne rozkłady sił mogą dawać taką samą całkowitą siłę. Dlatego też trzeba wybrać inny sposób na sprawdzanie sformułowań wykorzystywanych do obliczania sił lokalnych. Odkształcenie obiektu pod wpływem zewnętrznego naprężenia jest całkowicie powiązane z rozkładem tego naprężenia. Z tego powodu w celu weryfikacji pomiarowej obliczonych rozkładów sił, najlepiej jest wykonać pomiar odkształceń lokalnych.

W zadaniu *TEAM Workshop Problem 33.a* autorzy zaproponowali stanowisko, które pokazane jest na rys. 1 [7]. Składa się ono z jarzma ferromagnetycznego z dużą szczeliną powietrzną w środku. W szczelinie powietrznej jest umieszczony specjalny materiał testowy, natomiast do wytworzenia pola magne-

tycznego wykorzystano dwie cewki umieszczone w górnej i dolnej części jarzma. Kiedy materiał magnetyczny poddany jest działaniu zewnętrznego pola magnetycznego, na jego powierzchni działają siły magnetyczne. Taki rozkład naprężeń powoduje odkształcenia mechaniczne. Istotą eksperymentu jest spowodowanie widocznego odkształcenia materiału o dobrze znanych właściwościach fizycznych. W prezentowanym doświadczeniu materiał testowy jest umieszczony niesymetrycznie względem pola magnetycznego, co zapewnia uzyskanie możliwego do zaobserwowania odkształcenia. Do pomiaru odkształceń wykorzystywany jest aparat fotograficzny. Wykonywane są dwa zdjęcia próbki testowej, jedno gdy prąd jest wyłączony i drugie gdy cewka zasilana jest prądem stałym. Porównanie tych dwóch zdjęć pozwala określić o ile odkształcił się badany materiał.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru odkształceń lokalnych zaprezentowane w zadaniu *TEAM Workshop Problem 33.a*

Kluczowym elementem stanowiska jest próbka testowa o wymiarach 30x30x10 mm. Jest to specjalnie przygotowany przez autorów materiał magnetyczny. Jego podstawowe właściwości mechaniczne i magnetyczne są następujące [7]:

- moduł Younga $E = 11000 \text{ N/m}^2$ (+/-10%),
- współczynnik Poissona $\nu = 0,5$,
- względna przenikalność magnetyczna $\mu_r = 2,5$ (+/-10%).

Dzięki temu, że moduł Younga ma małą wartość naprężenie potrzebne do odkształcenia materiału nie musi być duże. Niestety materiał ten nie jest powszechnie dostępny.

3. WYKONANE STANOWISKO POMIAROWE

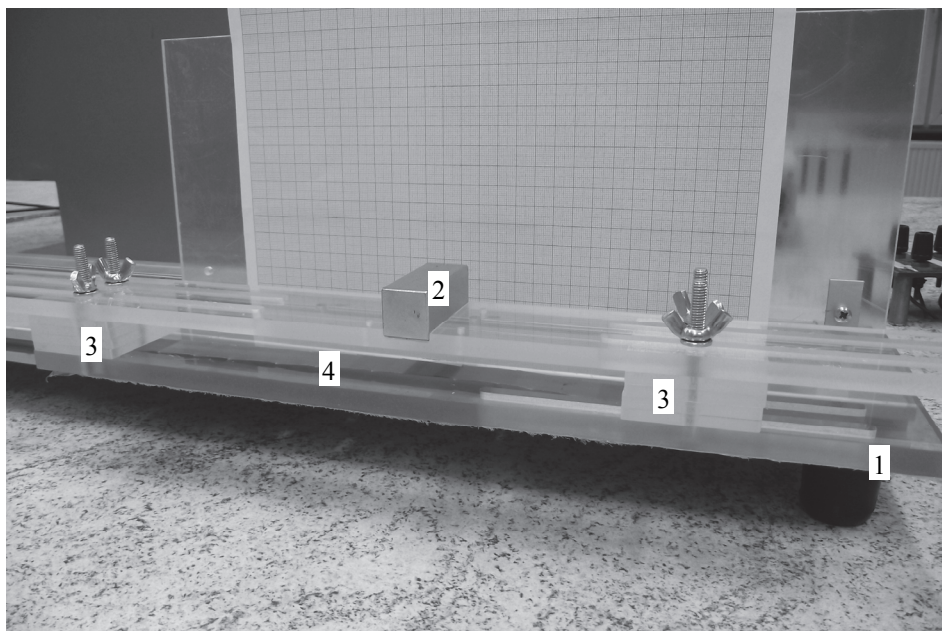
Przystępując do wykonania stanowiska badawczego, przyjęto następujące założenia projektowe:

- element odkształcany będzie w postaci cienkiego prostokątnego arkusza, długość prostokąta powinna być około 5 razy większa od jego szerokości,
- źródłem pola magnetycznego będzie magnes trwały,
- magnes będzie przesuwany w kierunku pionowym oraz poziomym,
- stanowisko będzie połączone z układem do wykonywania zdjęć w celu dokładnego opisu odkształceń,
- elementy konstrukcyjne będą wykonane z materiałów niemagnetycznych.

Tak przyjęte założenia mają pozwolić na wykonanie stanowiska, na którym da się uzyskać widoczne gołym okiem odkształcenie materiału, a cały układ łatwo będzie zasymulować w programie obliczeniowym.

Zbudowane stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 2. Podstawę stanowiska stanowi prostokątna płyta o wymiarach 400x150 mm, wykonano ją ze szkła akrylowego o grubości 10 mm. Magnes umieszczony jest na wąskiej pleksiglasowej płycie (600x50 mm) o grubości 8 mm. W płycie wycięto podłużne otwory, które umożliwiają przesuwanie płyty na boki w przedziale od 0 do 200 mm. Pomiędzy płytą, na której umieszczony jest magnes, a podstawą znajdują się przekładki dystansowe. Wszystkie elementy są połączone za pomocą śrub. Badany element położony jest bezpośrednio na podstawie i przyciśnięty do niej na bokach poprzez przekładki dystansowe. W celu uzyskania widocznego wyraźnego odkształcenia badanego materiału, długość próbki nie może być mniejsza od 200 mm. Odległość pomiędzy magnesem, a badanym materiałem można regulować zmieniając liczbę przekładek dystansowych.

Na stanowisku można uzyskać odkształcenia o wysokości do 100 mm. Pole magnetyczne jest wzniesane przez magnes trwały, w badaniach wykorzystano 3 magnesy, których parametry zestawiono w tabeli 1. Każdy magnes był namagnesowany jednorodnie w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki. Z tyłu stanowiska, ustawiono arkusz papieru milimetrowego. Służy on do określenia o jaką odległość, w danym punkcie długości, przesunął się badany materiał.



Rys. 2. Zbudowane stanowisko pomiarowe do badania odkształceń lokalnych: 1 – podstawa stanowiska, 2 – magnes trwały, 3 – przekładki dystansowe, 4 – badany materiał magnetyczny

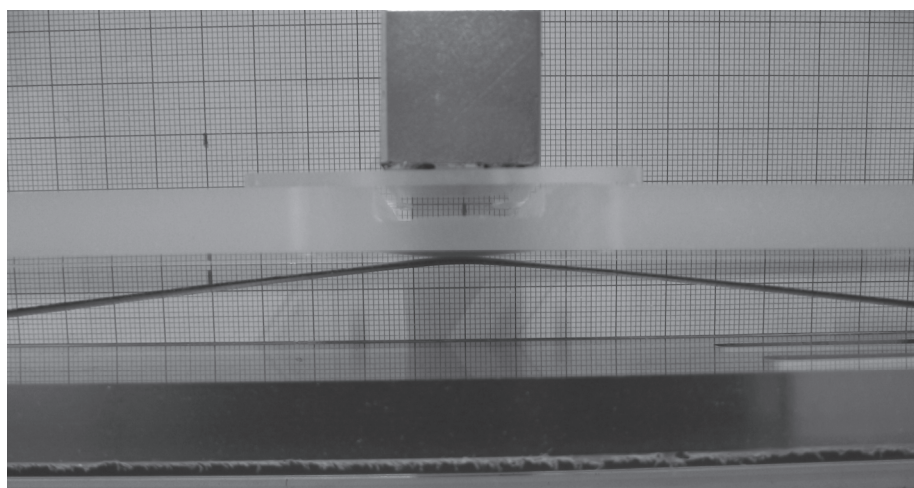
Tabela 1. Parametry magnesów wykorzystywanych do pomiarów.

Rodzaj magnesu	indukcja remanencji B_r [T]	natężenie pola koercji H_{cB} [kA/m]	natężenie pola koercji H_{cJ} [kA/m]	gęstość energii magnetycznej $(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	wymiary [mm]
neodymowy	1,17 – 1,21	min. 867	min. 867	263 – 286	20 x 20 x 50
neodymowy	1,17 – 1,21	min. 867	min. 867	263 – 286	05 x 20 x 50
ferrytowy	0,37 – 0,40	175 – 210	180 – 220	26 – 30	25 x 20 x 50

Na stanowisku badano dwa materiały testowe. Pierwszym materiałem, była blacha transformatorowa o grubości 0,2 mm. Badano dwa arkusze blach o szerokościach 25 i 50 mm oraz długości 260 mm. Drugim badanym materiałem była folia stalowa ferromagnetyczna. Jest to elastyczny materiał o właściwościach ferromagnetycznych, niestety jego dokładne parametry magnetyczne oraz mechaniczne nie są na tą chwilę znane autorowi. W tym przypadku także wykorzystywano dwa arkusze materiału o szerokościach 25 i 50 mm oraz grubości 0,4 mm i długości 260 mm.

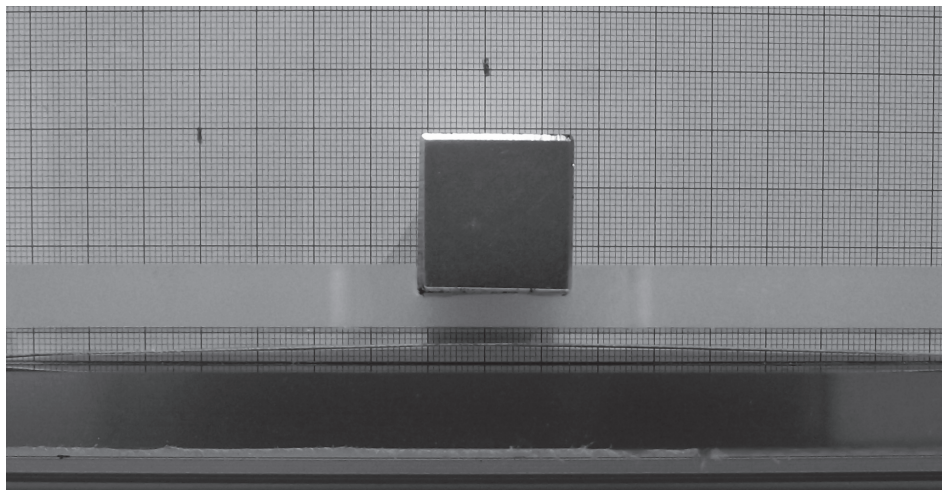
4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na zbudowanym stanowisku pomiarowym wykonano serię pomiarów. Wykorzystano 3 magnesy trwałe: magnesy neodymowe o wysokości 5 i 20 mm oraz magnes ferrytowy o wysokości 25 mm, oraz 4 próbki materiałów testowych. Przy prezentacji wyników pomiarów do oznaczenia magnesów i próbek testowych używane są następujące skróty: *Nd5* i *Nd20* – magnesy neodymowe o wysokościach odpowiednio 5 i 20 mm; *Fe25* – magnes ferrytowy o wysokości 25 mm; *folia25* i *folia50* – folia ferromagnetyczna o szerokości odpowiednio 25 i 50 mm; *stal25* i *stal50* – blacha transformatorowa o szerokości odpowiednio 25 i 50 mm. W trakcie pomiarów zmieniano odległość (w pionie) pomiędzy magnesem, a materiałem testowym oraz położenie magnesu (w poziomie) względem środka badanej próbki. Wykonywano pomiary gdy magnes był umieszczony nad środkiem próbki oraz gdy był przesunięty o 90 mm od krótszej krawędzi próbki.



Rys. 3. Odształcenie uzyskane dla materiału *folia25*, wymuszenie magnes *Nd20*, położenie magnesu środek, odległość magnesu od próbki 25 mm

Za rysunku 3 i 4 pokazano wynik pomiaru dla próbek *folia25* i *stal50*, do wzbudzenia pola magnetycznego użyto magnesu *Nd20*, który był ustawiony nad środkiem próbki w odległości odpowiednio 25 i 9 mm. W obu przypadkach udało się zrealizować podstawowe założenie stawiane przy budowie stanowiska, a mianowicie uzyskać wyraźne (łatwe do zmierzenia) wychylenie badanego materiału. Przy zmianie odległości pomiędzy magnesem, a badanym materiałem, a także przy wykorzystaniu innych magnesów, maksymalne wychylenie badanej próbki jest oczywiście zmienne. W tabeli 2 zestawiono maksymalne wychylenie materiału testowego dla różnych konfiguracji układu pomiarowego.

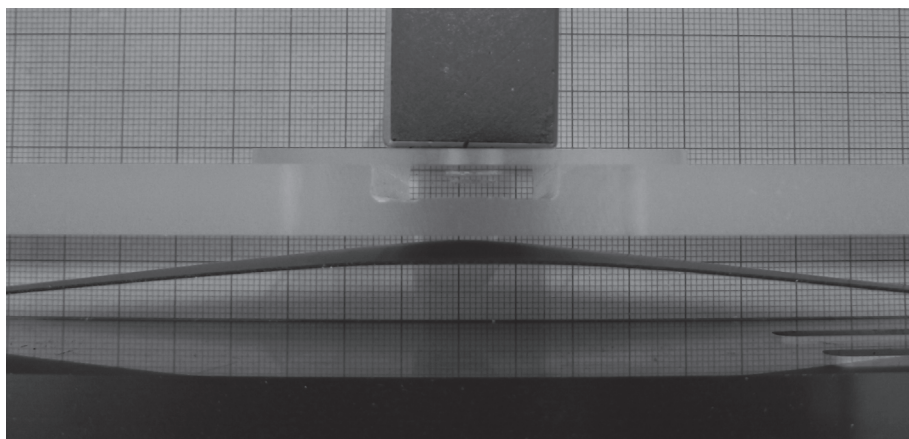


Rys. 4. Odkształcenie uzyskane dla materiału *stal50*, wymuszenie magnes *Nd20*, położenie magnesu środek, odległość magnesu od próbki 9 mm

Tabela 2. Maksymalne wychylenie badanego materiału.

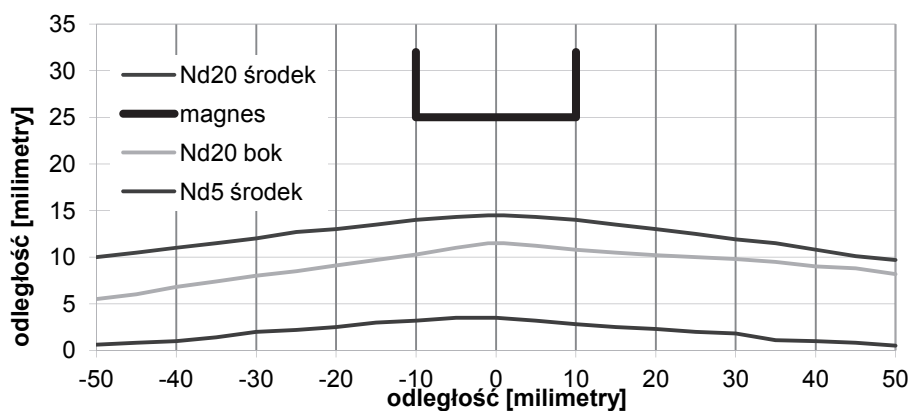
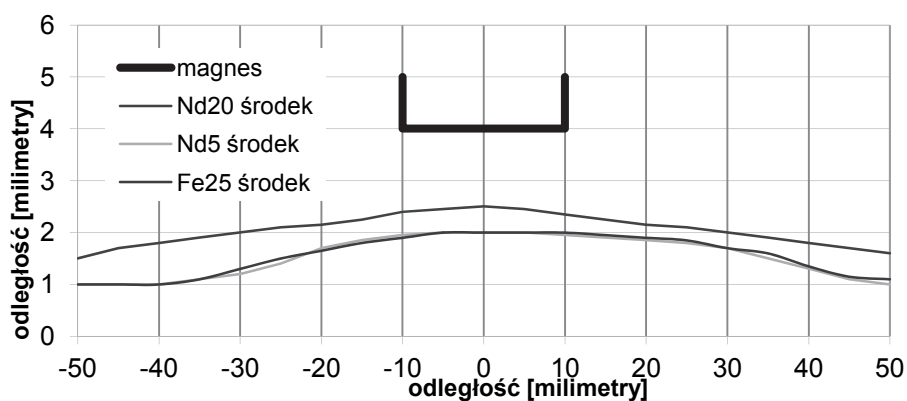
Materiał badany	Odległość od magnesu [mm]	Usytuowanie magnesu	magnes		
			Fe25	Nd5	Nd20
Folia 50	19	środek	3,0	5,5	-
		bok	5,5	5,0	-
	25	środek	-	5,5	13,5
		bok	-	2,5	9,0
	29	bok	-	-	6,0
		bok	-	-	-
Folia 25	14	bok	9,5	-	-
	17	środek	8,0	-	-
	19	środek	2,0	9,0	-
		bok	4,5	6,5	-
	25	środek	-	3,5	14,5
		bok	-	2,0	11,5
	29	środek	-	-	8,5
		bok	-	-	5,5
stal 50	9	środek	2,25	2,5	3,0
		bok	2,0	2,0	2,5
	11	środek	2,0	2,0	2,5
		środek	-	1,5	2,5
	14	bok	-	1,5	2,25
		środek	-	-	2,75

Maksymalne odkształcenia dla materiału *folia25* i *folia50* są do siebie zbliżone. Jednakże, w przypadku materiału o szerokości 50 mm odczyt wyników jest kłopotliwy, ponieważ krawędzie materiału są mniej odkształcone niż jego środek. Pokazano to na rys. 5. Dzieje się tak ponieważ pole magnetyczne na krawędziach magnesu jest słabsze niż w jego środku, a w związku z tym i siła działająca na krawędź materiału będzie mniejsza. Dlatego też autor zdecydował, że wyniki uzyskane dla materiału *folia50* nie będą wykorzystywane do tworzenia profilu odkształcenia, gdyż nie dałoby się wykonać go dokładnie. W przypadku blachy transformatorowej dla próbki szerszej uzyskano nieznacznie większe wychylenie. Dzieje się tak dlatego, że przez szerszą próbę przenika w większy strumień pola magnetycznego i w efekcie całkowita siła działająca na obiekt jest większa. Materiał ten jest zdecydowanie sztywniejszy niż folia ferromagnetyczna, dlatego też nie występuje tu efekt opadania krawędzi próbki.



Rys. 5. Odkształcenie uzyskane dla materiału *folia50*, wymuszenie magnes *Nd20*, położenie magnesu środek, odległość magnesu od próbki 25 mm

Na podstawie wykonanych pomiarów możliwe było wykonanie cyfrowych profili odkształceń badanych materiałów. Uzyskane profile dla materiałów *folia25* i *stal50* pokazano na rysunkach 6 i 7. Odległość równa 0 mm na osi odciętych odpowiada położeniu środka magnesu. Tak uzyskane profile odkształceń będzie można porównać z profilami obliczonymi w oprogramowaniu do obliczeń metodą elementów skończonych przemieszczeń mechanicznych. Wymuszenie (rozkład sił) w solverze mechanicznym, będzie obliczane różnymi metodami.

Rys. 6. Wykonany cyfrowy profil odkształcenia materiału *folia25*Rys. 7. Wykonany cyfrowy profil odkształcenia materiału *stal50*, odległość magnesu 11 mm (odległość magnesu na wykresie jest celowo zmniejszona, aby wyraźniej było pozostałe krzywe)

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule omówiono trudności jakie występują przy wyznaczaniu poprawnego rozkładu sił pochodzenia magnetycznego. Pokazano w jaki sposób można dokonać pomiarów odkształceń materiałów ferromagnetycznych, które mogą być wykorzystane w celu sprawdzenia dokładności metod wykorzystywanych do obliczania sił lokalnych. Opisano także wykonane przez autora stanowisko umożliwiające pomiar odkształceń lokalnych materiałów magnetycznych.

Na stanowisku testowym badano dwa materiały ferromagnetyczne. Uzyskane wyniki są zadowalające, w obu przypadkach uzyskano widoczne gołym okiem odkształcenie materiału wywołane obecnością pola magnetycznego. W związku

z tym uzyskane wyniki pomiarów będzie można wykorzystać do porównania z wynikami uzyskanymi w symulacji komputerowej. Zmierzone odkształcenia dla folii ferromagnetycznej są zdecydowanie większe niż dla blachy stalowej, dlatego wyniki te łatwiej byłoby porównać z wynikami obliczeń. Niestety parametry mechaniczne i magnetyczne folii nie są znane, a wyznaczenie ich z dużą dokładnością może okazać się problematyczne.

LITERATURA

- [1] Lee S.-H., He X., Kim D. K., Elborai S., Choi H. S., Park I.-H., Zahn M., Evaluation of the mechanical deformation in incompressible linear and nonlinear magnetic materials using various electromagnetic force density methods, *Journal of Applied Physics* 97, 2005.
- [2] Ren Z., Comparison of different force calculation methods in 3D finite element modeling, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No. 5, s. 3471-3474 1994.
- [3] Melcher J. R., *Continuum Electromechanics*, MIT press., 1988.
- [4] Demenko A., Łyskawiński W., Wojciechowski R.M., Equivalent Formulas for Global Magnetic Force Calculation From Finite Element Solution, *IEEE Trans. on Magn.* vol. 48, p. 195, 2012.
- [5] Li M., Lowther D. A., Local Electromagnetic Force Computation in the Presence of Numerical Field Errors, *IEEE Trans. on Magn.* vol. 45 no. 3, p. 195, 2009.
- [6] Łukaszewicz P., Algorytm obliczania sił lokalnych w konstrukcjach z magnesami trwałymi, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Issue 72, s. 311-318 2012.
- [7] Barré O., Brochet P., Hecquet M., Description of TEAM Workshop Problem 33.a: Experimental Validation of Magnetic Local.

THE TEST STAND FOR THE MEASUREMENT OF A LOCAL DEFORMATION IN FERROMAGNETIC MATERIALS

In the paper Author describes the measurement possibilities that enable a verification of the accuracy of the calculation of local magnetic forces. The deformation of a body caused by external stress is totally connected to this stress distribution. For this reason, in order to verify the calculated force distributions, the author made a test stand that enabling the measurement of local deformations. The built test stand and measuring process have been described. Measurements results for different ferromagnetic materials have been presented. The obtained results were used to make the digital profile of deformation for the examined materials.

(Received: 15.02.2018, revised: 10.03.2018)