

DIAGNOZOWANIE ZMĘCZENIA MATERIAŁU PRZY POMOCY EFEKTU MAGNETYCZNEJ PAMIĘCI METALU

Miroslaw WITOŚ*

*Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa

miroslaw_witos@o2.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono efekt magnetycznej pamięci metalu (MPM). Zagadnienia teoretyczne zobrazowano przykładami uzyskanymi podczas diagnozowania elementów techniki lotniczej. Omówiono główne zalety MPM i trudności, na które napotyka się podczas badania drobnych elementów, np. wałków napędowych czy łopatek sprężarki. Wskazano potrzebę udokumentowania skuteczności stosowania MPM w detekcji pęknięć zmęczeniowych typu HCF i VHCF.

1. WSTĘP

W technice lotniczej istnieje jeszcze wiele elementów wykonanych ze stali i stopów ferromagnetycznych. Część z nich, m.in. wałki napędowe, koła zębate, łopatki sprężarki, łożyska i cięgna podwozia są elementami krytycznymi konstrukcji – sporadycznie występują w nich problemy zmęczeniowe, grożące wypadkiem lotniczym. Powyższe elementy wymagają okresowej kontroli stanu technicznego, zarówno w eksploatacji jak również podczas remontu samolotu/silnika.

Obserwowane przypadki zmęczeniowego pęknięcia ww. elementów uświadamiają:

- niedoskonałość istniejących metod badań nieniszczących (szczególnie dla wirujących elementów, w których występuje zjawisko zamykania szczeliny pęknięcia podczas postoju);
- potrzebę doskonalenia metod i technik badawczych w zakresie rozpoznania wczesnej fazy zmęczenia materiału.

Dopiero umiejętność rozpoznania wczesnej fazy zmęczenia materiału - fazy cyklicznego umocnienia i osłabienia (Buch, 1964), np. z pomocą analizy modalnej (Witoś, 2008) lub metody tip timing (Witoś i Szczepanik, 2008), jest podstawą wiarygodnego prognozowania stanu technicznego oraz gwarancją bezpiecznej i ekonomicznej pracy maszyny.

W artykule skupiono uwagę na potencjalnym zastosowaniu efektu magnetycznej pamięci metalu w badaniach nieniszczących (NDT), monitorowaniu stanu technicznego (SHM) i monitorowaniu warunków pracy (CM) drobnych stalowych elementów techniki lotniczej. Artykuł jest próbą uzyskania odpowiedzi na pytanie „Czy magnetyczna pamięć metalu może być skuteczna w detekcji narastającego zmęczenia materiału?”

2. MOTYWACJA

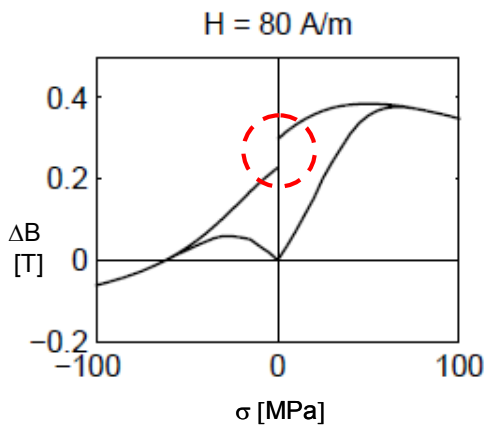
Przewidywanie właściwości magnetycznych materiałów ferromagnetycznych jest ciągle obszarem badań naukowych, m.in. Bozorth (1951); Craik i Wood (1970), Collins (1995), Hubert (1998), Lai Man Wang (1999), Własow i Dubow (2004), Żurek (2005), Miles (1991) i Mićunović (2006). W badaniach analizowane są m.in. zjawiska spontanicznego magnesowania i piezomagnetyzmu ferromagnetyków w słabym polu magnetycznym Ziemi. Zjawiska fizyczne skorelowane ze strukturą materiału i efektami magneto-mechanicznymi – Tab. 1. Wyniki prac opisują oddziaływania na poziomie spinowym i są przydatne do zastosowania w obszarze mechaniki pęknięcia i diagnostyki technicznej.

Tab. 1. Efekty magnetomechaniczne (Lupu, 2007; Miles i Atherton, 1984; Dapino i inni, 1999)

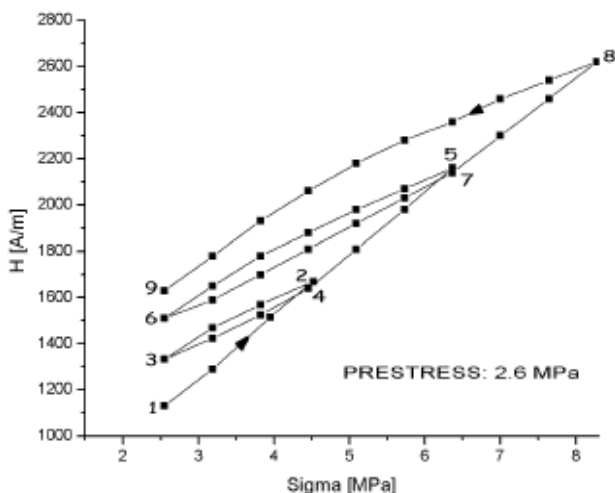
Efekty bezpośrednie	
Efekt Joule (1842) magnetostrykcja	Zmiana rozmiarów próbki w kierunku przyłożonego pola magnetycznego
Efekt ΔE	Wpływ magnetosprężystości na anizotropię magnetokrystaliczną
Efekt Wiedemanna	Skrećanie wywołane przez spiralną anizotropię
Efekt magnetoobjętościowy	Zmiana objętości pod wpływem magnesowania (najbardziej widoczna w pobliżu temperatury Curie)
Efekt Einsteina – de Haasa	Obracanie się ferromagnetyka pod wpływem namagnesowania
Efekty odwrotne	
Efekt Villariego (1865)	Zmiana namagnesowania pod wpływem obciążenia
Efekt ΔE	Magnetyzm indukuje zmiany w sprężystości
Efek Matteuci	Spiralna anizotropia i SEM wprowadzona przez skrećanie
Efekt Nagaoka-Hondy	Zmiany w stanie namagnesowania przez zmiany objętości
Efekt Barnetta (1914)	Magnesowanie ciała pod wpływem ruchu obrotowego

Pomiędzy zastanym namagnesowaniem badanego elementu, a historią obciążeń istnieje związek przyczynowy, który został zaproponowany przez Własowa i Dubowa (2004) do badań nieniszczących i diagnozowania poziomu zmęczenia materiału (metoda magnetycznej pamięci metalu, MPM). Według Dubowa, MPM jest jedną z nielicznych metod, która w warunkach polowych deklaruje umiejętność wykrywania nie tylko pęknięć, ale również lokalizacji wczesnej fazy zmęczenia materiału i naprężeniowych defektów struktury. Zmian odwzorowanych przez lokalne strefy koncentracji naprężeń własnych (SKN) i lokalną anizotropię materiału. Deklarowaną zaletą metody MPM jest również zapamiętywanie skutków cyklicznych obciążeń, szczególnie odkształceń plastycznych.

Naprężeniowe magnesowanie ferromagnetyka obserwowane jest m.in. podczas cyklicznego rozciągania i ściskania próbki. Pełny cykl symetrycznych obciążeń mechanicznych nie zamyka cyklu przemagnesowania próbki. Po odciążeniu próbka wykazuje namagnesowanie. Zjawisko opisane m.in. przez Craika i Wooda (1970) – Rys. 1, potwierdzono dla obciążeń niesymetrycznych w badaniach Bomby i Kalety (2005) – Rys. 2.



Rys.1. Magnesowanie ferromagnetyka w słabym polu magnetycznym pod wpływem symetrycznego obciążenia (Craik i Wood, 1970)



Rys. 2. Magnesowanie ferromagnetyka w słabym polu magnetycznym pod wpływem cyklicznego rozciągania (Bomba i Kaleta, 2005)

Metoda MPM wymaga pasywnego, bezdotykowego obserwatora. Powyższa cecha stwarza przesłanki stosowania MPM nie tylko w badaniach nieniszczących, ale również w systemach SHM i CM. Pod tym względem MPM przewyższa aktywne metody magnetyczne, np. pomiar szumu Barkhausena (Żurek, 2005) czy siły koercji (Muzhitskiy i inni).

W aplikacjach przemysłowych metoda MPM używana jest już do (Dubow i inni, 2004):

- bardzo szybkiej (do kilku km/godz.) lokalizacji miejsc zwiększonego ryzyka inicjacji pęknięć zmęczeniowych (pomiar nie wymaga wcześniejszego przygotowania powierzchni);
- zgrubnej oceny skutków rzeczywistych warunków pracy, w tym oszacowania pozostałości zdadności technicznej.

Ocenie MPM podlegają głównie duże, stacjonarne elementy (m.in. rurociągi, walczaki, mosty) wykonane ze stali nisko-stopowych, dla których spełniony jest warunek niezmienności położenia badanego elementu względem słabego pola magnetycznego Ziemi – pierwotnego źródła spontanicznego magnesowania materiału ferromagnetycznego. Dla tych warunków pracy zasady lokalizacji SKN dobrze opisuje teoria Własowa i Dubowa (Vlasov i Dubow, 2004; Dubow i inni, 2004). Podczas postoju maszyny metodą MPM badane są również elementy ruchome, np. łopatki turbin parowych. Metoda MPM uzyskała międzynarodową akceptację do oceny spoin (norma PN-ISO-24497-1,2,3).

Dotychczasowe spostrzeżenia i zalety MPM zostały już uwzględnione w zaleceniach norm EN 4179 i NAS 410 stosowanych w lotnictwie. Przed defektoskopią magnetyczną proszkową normy zalecają pomiar zastanego poziomu namagnesowania. Za obszary zwiększonego ryzyka pęknięcia zmęczeniowego, które wymagają szczególnej uwagi osoby wykonującej badania, normy uznają jednak obszary

o zwiększonym namagnesowaniu, a nie SKN. Istniejąca różnica w interpretacji wyników efektów magnetycznych były impulsem do podjęcia prac badawczych w ITWL. Ich celem jest określenie rzeczywistych możliwości MPM w diagnozowaniu drobnych elementów techniki lotniczej, wykonanych ze stali stopowych, oraz ustalenie jednoznacznych zasad interpretacji wyników.

Elementy techniki lotniczej są najsilniej wyęzione podczas złożonego ruchu statku powietrznego w polu magnetycznym Ziemi, tzn. nie jest spełnione podstawowe założenie MPM przyjęte przez Dubowa i Własowa. Kontrolowane elementy poddawane są najczęściej dodatkowej obróbce powierzchniowej wprowadzającej naprężenia własne. Ze względu na własności modalne i widmo obciążeń elementy narażone są na zmęczenie niskocyklowe (LCF), wysokocyklowe (HCF) i gigacyklowe (VHCF).

W artykule poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: „Czy MPM będzie skuteczna w diagnozowaniu zmęczenia materiału drobnych elementów?”

W rozważaniach pominięto elementy z gorącej części silnika (komory spalania, turbiny, układu wylotowego), które wykonane są ze stopów paramagnetycznych i narażone są dodatkowo na termomechaniczne zmęczenie (TMF).

3. PODSTAWY TEORETYCZNE MPM

Po wyłączeniu maszyny lub podczas obciążeń quasi-statycznych następuje namagnesowanie badanego elementu (rozkład i natężenie pola magnetycznego w pobliżu powierzchni) odwzorowuje wypadkowy wpływ:

- początkowego stanu namagnesowania (w lotnictwie $|H_{pr}| \leq 240$ A/m);
- czasu pracy i historii obciążenia;
- zmian rozkładu naprężeń wewnętrznych;
- lokalnych obszarów anizotropowości materiału, wywołanych przez efekty naprężeniowych lub termicznych przemian fazowych;
- wtórnych źródeł magnesowania, np. sąsiadujących elementów czy czujników pomiarowych;
- warunków brzegowych (kształtu i rozmiarów badanego elementu oraz położenia w przestrzeni).

W celu lokalizacji SKN lub obszarów naprężeniowej anizotropii materiału poszukuje się lokalnych anomalii magnetycznych. Są one możliwe do zaobserwowania przy pomocy kompasu, magnetometru (np. GM-04 firmy Magnaflux), lub przenośnych wielokanałowych rejestratorów pola magnetycznego (np. IKN-1M-4 lub TSC-3M-12 firmy Energiadiagnostyka). Zastosowanie wielokanałowego rejestratora pola magnetycznego:

- znacząco skraca czas badań (archiwizacja wyników w pamięci przyrządu);
- umożliwia graficzne zobrazowanie wyników pomiaru podczas badań;
- umożliwia ilościową i jakościową analizę wyników badań (post-processing).

Według Dubowa, do dokładnej lokalizacji oczekiwanego miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych wykorzystuje się spostrzeżenie, że w SKN składowa pola magnetycznego prostopadła do powierzchni badanego elementu H_z jest równa zero, a składowa styczna H_x prostopadła do SKN osiąga lokalne ekstremum.

$$SKN \text{ if } \left[(H_z = 0) \text{ and } \left(\frac{dH_x}{dx} = 0 \right) \right] \quad (1)$$

Kryterium „ $H_z = 0$ ” identyfikuje koncentrację poziomu ustawionych domen magnetycznych (ścianek Blocha) i lokalnych zmian przenikalności magnetycznej, natomiast „ekstremum H_x ” różnicuje rzeczywiste SKN od pozornych. Pozorne SKN wynikają m.in. z niewłaściwego zerowania przyrządu pomiarowego, równomiernych naprężeń ściskających wprowadzonych na etapie produkcji (np. przez warstwy dyfuzyjne czy kulowanie) lub wstępnego namagnesowania badanego elementu.

Dla elementów lotniczych, w których najczęściej występują naprężenia powierzchniowe H_{z0} (technologicznie wprowadzone) kryterium lokalizacji SKN przyjmuje postać

$$SKN \text{ if } \left[(H_z = H_{z0}) \text{ and } \left(\frac{dH_x}{dx} = 0 \right) \right] \quad (2)$$

Do oceny poziomu zmęczenia materiału i pozostałości trwałości eksploatacyjnej elementu metoda MPM wykorzystuje informacje o wartości współczynników umocnienia

magnetycznego materiału: składowych $m_{max}(i)$ w kierunku pomiaru i wypadkowego m , wyznaczanych w otoczeniu SKN

$$m_{max}(i) = \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial i} \right)_{max}}{\left(\frac{\partial H}{\partial i} \right)_{med}}; \quad i \in \{x, y, z\} \quad (3)$$

$$m = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2} \right)_{max}}{\left(\sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2} \right)_{med}} \quad (4)$$

Graniczne wartości współczynników m_{max} i m dopuszczalne w eksploatacji są zależne od typu materiału i zastosowanej obróbki cieplno-chemicznej (tekstury). Na podstawie jednoosiowego rozciągania i ściskania różnych gatunków stali, autorzy MPM wykazali związek granicznej wartości umocnienia m_{gr} z podstawowymi cechami mechanicznymi

$$m_{gr} \approx \sqrt{\frac{R_m}{R_{e0.2}}} \quad (5)$$

gdzie R_m – granica wytrzymałości doraźnej; $R_{e0.2}$ – granica sprężystości materiału.

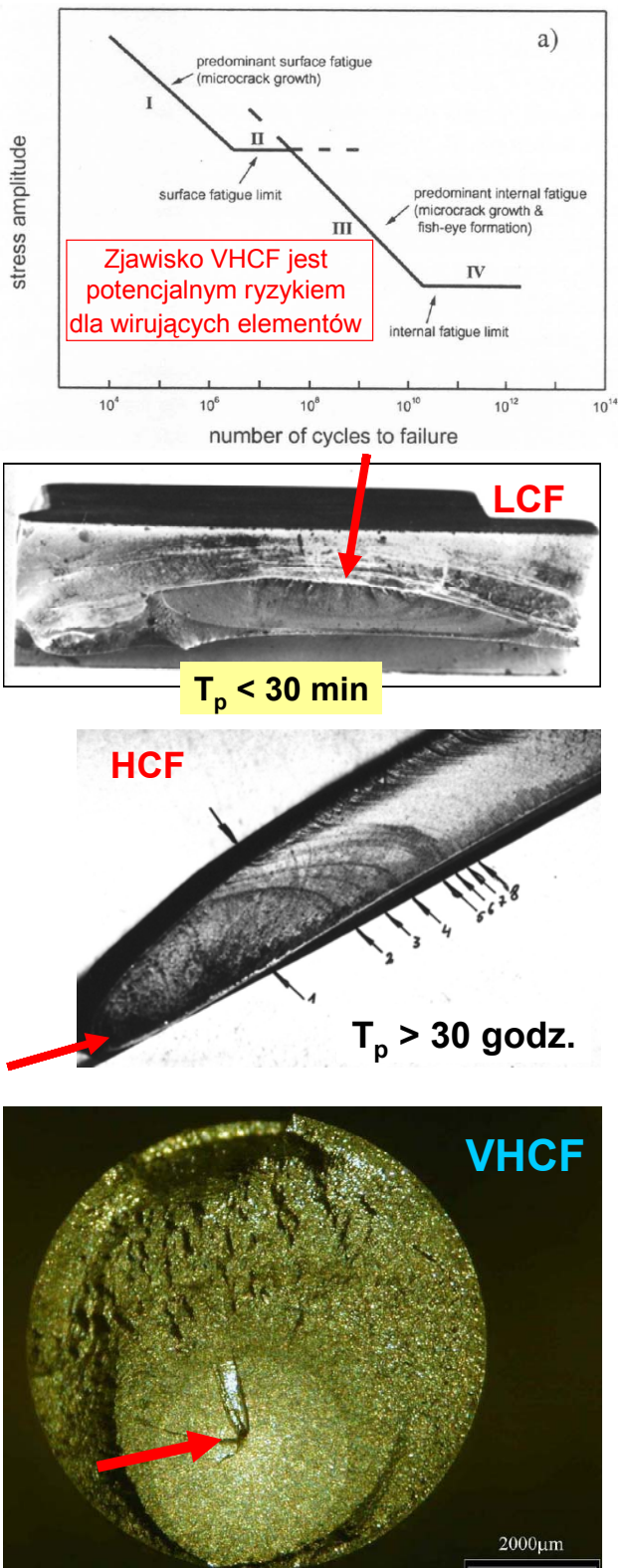
Niestety, pomimo ponad 30-letniego stosowania efektu MPM w diagnostyce obiektów przemysłowych, graniczna wartość m_{gr} nie została zweryfikowana dla złożonego stanu naprężeń. Istniejący stan wiedzy ogranicza możliwość stosowania metody MPM do oceny techniki lotniczej. Wdrożenie MPM do diagnostowania odpowiedzialnych konstrukcji, w tym techniki lotniczej, wymaga prowadzenia dalszych prac badawczych.

4. MPM W BADANIU TECHNIKI LOTNICZEJ?

Krytyczne elementy techniki lotniczej narażone są na złożony stan naprężeń, których źródłem są:

- quasi-statyczne obciążenia normalne i styczne (siły rozciągania/ściskania, momenty gnące i skręcające);
- krótkotrwałe przeciążenia występujące w stanach przejściowych agregatów (silnik, pompy, prądnice) i podczas lotów krzywoliniowych (obciążenie wirników, skrzydła i usterzenia);
- wąsko- i szerokokopasowe wymuszenia aerodynamiczne i masowe, będące źródłem drgań badanych elementów z modami giętymi, skrętnymi i powierzchniowymi. W okresie międzyremontowym wirujące elementy, np. łopatki ostatnich stopni sprężarki, poddawane są bardzo wysokiej liczbie cykli obciążenia – rzędu 8×10^{10} cykli. W okresie zdatowności technicznej (resursu technicznego) widmo obciążeń łopatek przekracza często 10^{12} cykli. Użytkownik sprzętu lotniczego musi liczyć się z pękaniem zmęczeniowymi inicjowanymi zarówno na po-

wierzchni (LCF, HCF) jak również na wtrąceniach wewnątrz materiału (VHCF) – Rys. 3.



Rys. 3. Oczekiwane problemy zmęczeniowe techniki lotniczej (T_p – czas propagacji pęknięcia do urwania)

Rzeczywiste obciążenia elementów lotniczych są z założenia asymetryczne (składowa aperiodyczna i oscylacyjna). Amplituda i widmo obciążeń są zmienne i zależą od

bieżących warunków eksploatacji, m.in. prędkości i wysokości lotu, przeciążeń, zakresu pracy silnika. Poziom i widmo obciążeń są najczęściej nieznanymi użytkownikowi, co utrudnia efektywne planowanie kontroli stanu technicznego krytycznych elementów i prognozowanie ich żywotności. Deklarowana zaleta MPM – zapamiętywanie historii (skutków) obciążenia przez materiał – wychodzi naprzeciw potrzebom użytkownika.

Zgodnie z teorią mechaniki pęknięcia (Schijve, 2009; Buch, 1964; Badeshia, 2006; Buehler, 2008; Newnham, 2005) inicjacja pęknięć zmęczeniowych oczekiwana jest w obszarach koncentracji dyslokacji (na wtrąceniach lub na granicach ziaren) będących inicjatorem lokalnego uplastycznienia materiału. Strefy uplastycznienia – Tab. 2, są źródłem lokalnych anomalii magnetycznych, których rozmiary uwarunkowane są od poziomu naprężeń i składu materiału. Wraz ze zmniejszaniem poziomu wyętnienia materiału i zwiększeniem liczby cykli do zniszczenia maleją rozmiary stref lokalnego uplastycznienia. Rozmiary domen magnetycznych maleją wraz ze wzrostem ilości dodatków stopowych. Zmniejszenie rozmiarów obszarów uplastycznienia i domen magnetycznych zwiększa wymagania dla stosowanej aparatury pomiarowej.

Tab. 2. Klasyfikacja pęknięć zmęczeniowych wg. Makhutova

Liczba cykli	Mechanizm niszczenia
$10^0 - 10^1$	Dekacyklowe plastyczne uszkodzenia występujące przy obciążeniach uwzględnionych przez współczynniki bezpieczeństwa
$10^0 - 10^3$	hektocyklowe uszkodzenia określane przez duże mikroplastyczne deformacje w strefie uszkodzenia na poziomie makrostrukturalnym
$10^3 - 10^5$	Kilocyklowe uszkodzenia widoczne w postaci relatywnie małych makroplastycznych deformacji w strefie uszkodzenia w skali makroskopowej
$10^5 - 10^8$	Megacyklowe uszkodzenia rozwijające się w postaci mikroplastycznych deformacji w strefie uszkodzenia w skali mikro i makroskopowej
$10^8 - 10^9$	Gigacyklowe uszkodzenia występujące wskutek znacznej ilości cykli obciążeń i mikroplastycznych deformacji w skali mikroskopowej w pobliżu strefy uszkodzenia zlokalizowanej wewnątrz materiału
$10^{10} - 10^{12}$	Teracyklowe uszkodzenia wewnątrz materiału występujące przy bardzo dużej ilości cykli obciążeń z deformacjami występującymi na poziomie makrostruktury

Wdrożenie metody MPM do oceny techniki lotniczej wymaga:

- spełnienia wymogów formalnych dotyczących:
 - jakości opisu teoretycznego metody badawczej i stosowanych kryteriów oceny;
 - jakości dokumentacji użytkowej, na podstawie której opracowana jest dokumentacja serwisowa;
 - zasad wzorcowania toru pomiarowego;
- udokumentowanie wiarygodności badań, w tym słabych stron metody badawczej i ryzyka postawienia błędnej diagnozy (nieuzasadnionych kosztów badań lub ryzyka wypadku lotniczego);

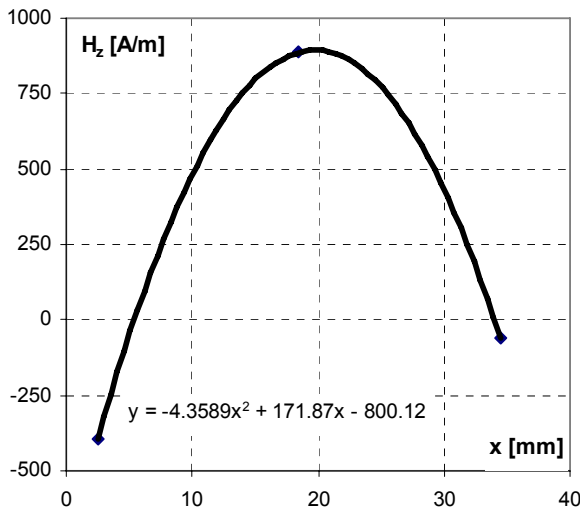
c) opracowania metodyk badawczych, uwzględniających specyfikę badanych elementów i warunki wykonywania badań (na obiekcie czy podczas demontażu).

4.1. Badania wstępne

Przystępując do oceny wybranych elementów techniki lotniczej z wykorzystaniem efektu MPM wykonano badania porównawcze pomiędzy przyrządami: IKN-1M-4 firmy Energodiagnostyka z sondą transduktorową i GM-04 firmy Magnaflux z punktową sondą Halla (wzorcowanym w laboratorium metrologicznym). Badania wstępne podyktowane były brakiem informacji o charakterystykach przestrzennych sond transduktorowych.

Równoległe badania wykonane na wzorcach i 310 łopatkach sprężarki o różnej wysokości pióra (wykonanych ze stali 18H2N4WA) wykazały, że w zakresie $H_z = -1400$ do $+2000$ A/m istnieje liniowa zależność wyników ($R^2 = 0.961$). Współczynnik kierunkowy prostej potwierdził 5% klasę dokładności deklarowaną dla IKN-1M-4 przy stosowaniu uproszczonej metody bieżącego wzorcowania toru pomiarowego (względem składowej pionowej pola magnetycznego Ziemi, $H_z = \pm 40$ A/m).

Dla łopatek wirnikowych stwierdzono paraboliczny rozkład składowej normalnej pola magnetycznego wzdłuż cięciwy pióra – rys. 4. Uzyskane wyniki badań potwierdzają sumaryczny wpływ odwrotnych efektów magnetosprężystych na zastane namagnesowanie łopatek.



Rys. 4. Rozkład pola magnetycznego wzdłuż cięciwy pióra (x=0 – krawędź natarcia pióra)

Na tym etapie badań stwierdzono przypadki występowania SKN, które były odwzorowane przez kryterium

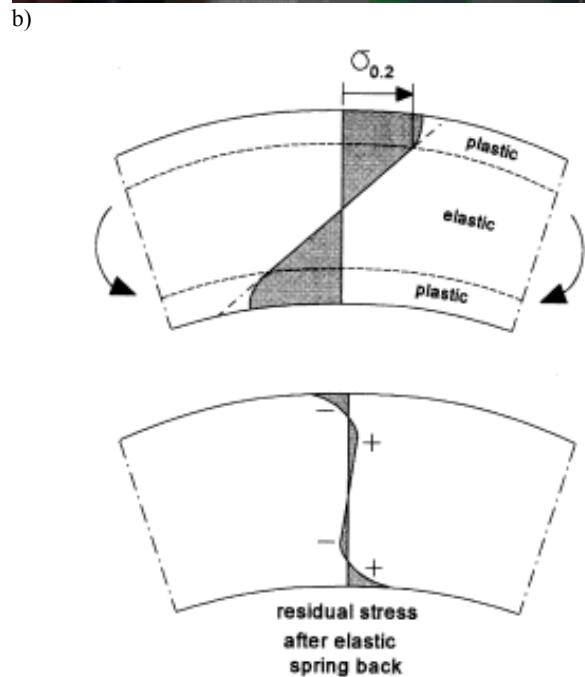
$$SKN_1 \text{ if } \left[(H_x = H_{x0}) \text{ and } \left(\frac{dH_z}{dx} = 0 \right) \right] \quad (6)$$

Powyższe kryterium identyfikuje prawdopodobnie pionowe ułożenie domen magnetycznych.

4.2. Badania odkształconych plastycznie elementów

Plastyczne odkształcenie elementu w polu magnetycznym Ziemi jest źródłem silnego jego namagnesowania.

W przypadku wygiętego wałka pompy paliwowej (wykonanego ze stali 30HGSA i pokrytego warstwą dyfuzyjną) – Rys. 5, stwierdzono, że na krzywiznie zewnętrznej wygięcia namagnesowanie wynosiło $H_z = -3860$ A/m. Zastany znak pola magnetycznego wskazuje na odwzorowanie naprężeń własnych ściskających.



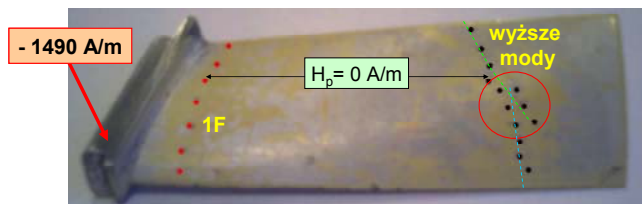
Rys. 5. Interpretacja znaku naprężeń własnych dla wygiętego wałka bez pęknięć (Schijve, 2009)

Stwierdzone namagnesowanie wałka – prawie 100 razy większe od składowej pionowej pola magnetycznego Ziemi – przekracza zakres pomiarowy sond transduktorowych przyrządów IKN-1M-4 i TSC-3M-12 (± 2000 A/m).

4.3. Próby LCF

Badania MPM wykonano na łopatkach po próbach zmęzeniowych LCF, zrealizowanych z wymuszeniami sinusoidalnymi w paśmie do 4 kHz na częstotliwościach wyszukanych modów.

Metodą MPM stwierdzono obecność dużych gradientów pola magnetycznego wzdłuż wysokości pióra łopatki (w zakresie -1400 do +1250 A/m). Położenie SKN było dobrze skorelowane z liniami węzłowymi drgań pióra łopatki – Rys. 6. Namagnesowanie powierzchni bocznej zamka przekraczało -1400 A/m i wskazywało na obecność naprężeń własnych ściskających.



Rys. 6. Strefy koncentracji naprężeń zlokalizowane MPM

W testach LCF metoda MPM uzupełnia symptomy wczesnego zmęczenia materiału, identyfikowane w analizie modalnej i metodzie tip timing (obserwowany wzrost nieliniowości układu i zmniejszenie częstotliwości rezonansowej). W przeciwieństwie do ww. metod, MPM umożliwia precyzyjną lokalizację miejsc, w których nastąpiły lokalne zmiany właściwości modalnych (wytężenia materiału).

Podczas tego etapu badań stwierdzono, że sondy transduktorowe przyrządu IKN-1M-4 uśredniają wskazania pola magnetycznego – wyniki pomiarów były zaniżone, przy właściwym odwzorowaniu kształtu rozkładu pola wzdłuż wysokości pióra. Uśrednianie natężenia pola magnetycznego zamaskowało obecność dwóch blisko położonych linii zerowych, odwzorowujących linie węzłowe różnych modów drgań pióra.

Wynik badań potwierdził potrzebę starannego doboru sond (z uwzględnieniem charakterystyk przestrzennych) do rozmiarów badanego elementu. Zagadnienie jest szczególnie istotne podczas wykonywania pomiarów na obiekcie (np. w palisadzie łopatek), gdy sąsiednie elementy są źródłem dodatkowego oddziaływania magnetycznego.

4.4. Detekcja pęknięć HCF

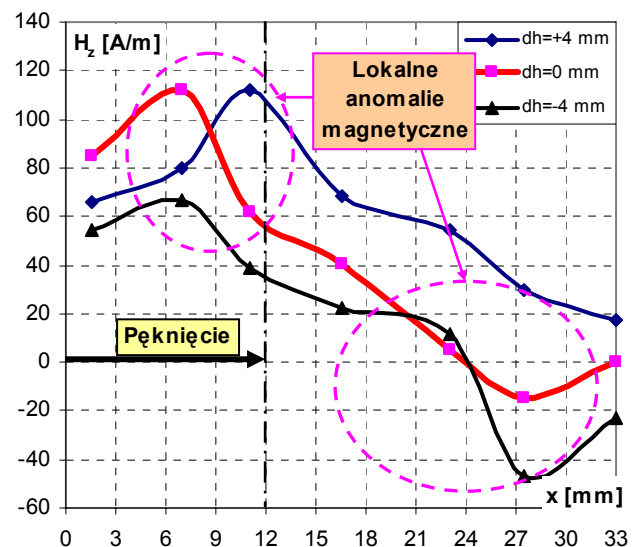
Badania możliwości detekcji kruchych pęknięć z wykorzystaniem efektu MPM wykonano na:

- łopatkę sprężarki (12 mm pęknięcie pióra od krawędzi splotu zainicjowane na wzbudniku przy $\sigma \approx 0.6 \sigma_{e0.2}$; wcześniej łopatkę przepracowała na silniku ok. 1200 godzin);
- wale śmigła (40 mm obwodowe pęknięcie stwierdzone w eksploatacji na powierzchni wewnętrznej).

W obu przypadkach stwierdzono (Witoś, Wiśnioch, 2009), że:

- zastosowanie dotychczasowego algorytmu metody MPM do detekcji SKN i pęknięć zmęczeniowych nie dało wiarygodnych wskazań;
- stan namagnesowania uszkodzonych elementów nie przekraczał dopuszczalnego poziomu namagnesowania reszkowego $|H_{pr}| < 240$ A/m (problem interpretacji źródła namagnesowania).

W przypadku pękniętej łopatki stwierdzono wyraźny wpływ jej położenia na czułość detekcji lokalnych anomalii magnetycznych. Przy zamkniętej szczelinie pęknięcia, lepsze wskazania uzyskano dla poziomego położeniu łopatki zamkiem na zachód – Rys. 7. Poziom namagnesowania zamka nie przekraczał 700 A/m i był ponad dwukrotnie niższy niż dla łopatki po testach LCF.



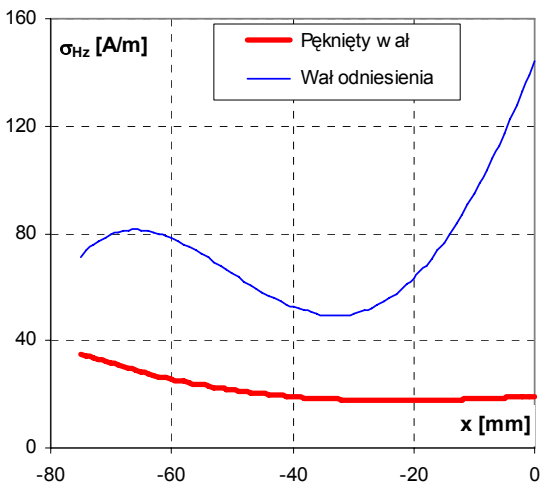
Rys. 7. Odwzorowanie anomalii magnetycznych w pobliżu pękniętego pióra łopatki ($h=0$ – pomiar wzdłuż szczeliny pęknięcia; $dh < 0$ – pomiar pomiędzy zamkiem i pęknięciem)

W przypadku pękniętego wału śmigła stwierdzono zmniejszenie poziomu namagnesowania powierzchni wewnętrznej i brak efektu brzegowego (względem referencyjnego, nieuszkodzonego wału z silnika o analogicznym nalocie i przeciwnym kierunku obrotów śmigła) – Rys. 8. Powyższe spostrzeżenie częściowo tylko można wytłumaczyć zmniejszeniem naprężeń własnych w wyniku propagacji pęknięcia (odciążenia) i różnego wpływu efektu Barnetta na proces magnesowania lewego i prawego wału. Poziom namagnesowania powierzchni wewnętrznej wału nie przekraczał ± 60 A/m i był porównywalny z poziomem pola magnetycznego Ziemi. Podczas badań stwierdzono również, że efekt MPM właściwie rozpoznał pęknięcie na powierzchni zewnętrznej wału (wzdłuż szwu spawalniczego), które pomimo znacznych rozmiarów (ok. 60% obwodu wału) nie zostało wcześniej dostrzeżone przez użytkownika samolotu, który wykonywał defektoskopię metodą penetrującą.

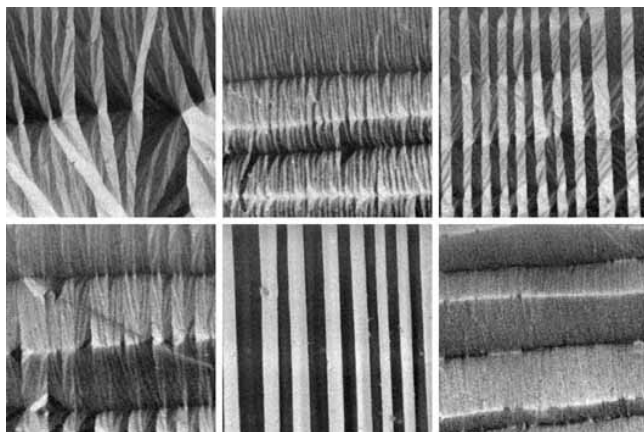
Przy stosowanych sondach nie uzyskano wiarygodnych symptomów lokalnego uplastycznienia na wierzchołku szczeliny. Symptomów oczekiwanych z teorii mechaniki pęknięcia. Na obecnym etapie badań uznano, że:

- algorytmy i urządzenia firmy Energodiagnostyka nie gwarantują wiarygodnego rozpoznania pęknięć zmęczeniowych HCF (domyślnie i VHCF) w drobnych elementach;
- istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki wykorzystania MPM w detekcji pęknięć HCF i VHCF.

Powyższe przykłady HCF wskazują potrzebę doskonalenia stosowanego oprzyrządowania i algorytmów. Do opracowania i weryfikacji nowych algorytmów detekcji SKN i pęknięć zmęczeniowych niezbędne jest skorelowanie wyników pomiarów MPM z symptomami diagnostycznymi innych metod badawczych, w tym z wizualizacją rozkładu domen magnetycznych – Rys. 9, z wykorzystaniem efektu Kerra (DiMarzio i Sun Nian, Oakberg).



Rys. 8. Wpływ pęknięcia zmęczeniowego na odchylenie standardowe namagnesowania wału śmigła, położenie pęknięcia $x = -(10 - 20)$ mm



Rys. 9. Zastosowanie efektu Kerra do zobrazowania magnetyzacji wywołanej przez naprężenia [28]

4.5. MPM w zagadnieniach odwrotnych

Niewątpliwą zaletą metody MPM jest możliwość jej zastosowania nie tylko w badaniach nieniszczących, ale również w zagadnieniach odwrotnych, np. podczas analizy przyczyn uszkodzenia zmęczeniowego. Tą możliwością

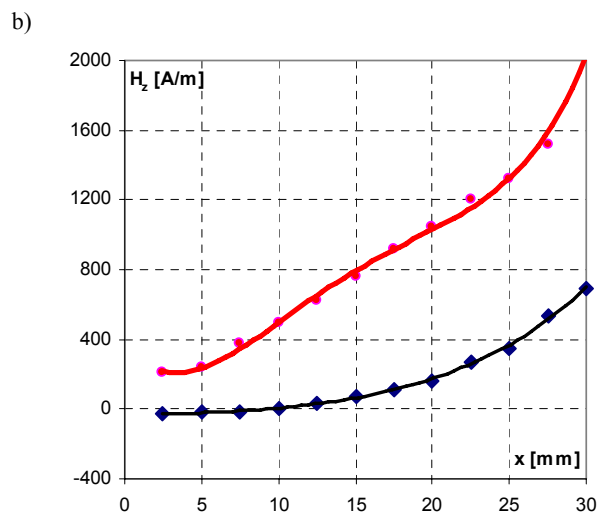
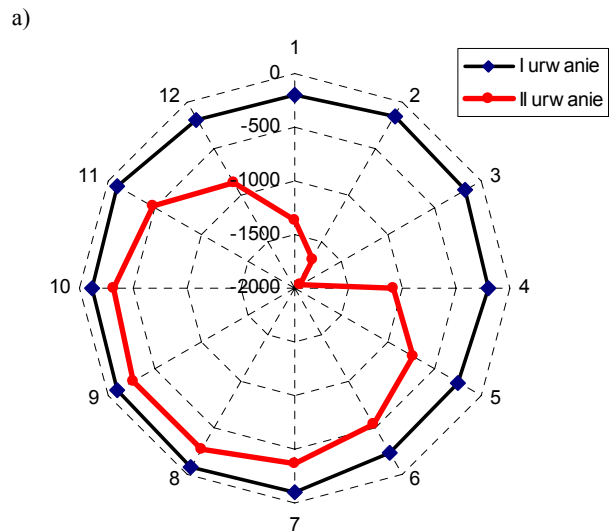
MPM zweryfikowano na bazie dwóch ukreconych wałków pomp hydraulicznych (ukreconie po 163 i 483 godz. pracy).

Pomimo podobnych skutków – ukreconia na przewężeniu technologicznym – MPM wykazała zasadnicze różnice panujące przed zniszczeniem wałków. Dla wałka który uległ zniszczeniu po 163 godz. stwierdzono, że namagnesowanie:

- powierzchni wierzchołkowej wielowypustu wykazuje wyraźną asymetrię wyteżenia materiału, która świadczy o zablokowaniu nurnika w pompie;
- części walcowej ma większy poziom.

Obserwowane różnice – Rys. 10, zostały potwierdzone podczas badań faktograficznych i demontażu pomp.

Zastosowanie MPM do diagnostyki wałków wymaga uwzględnienia naprężeń własnych wprowadzanych przez różne warstwy dyfuzyjne spotykane na tym samym typie wałka. Ich obecność jest źródłem różnego poziomu naprężeń ściskających (składowej normalnej), co należy uwzględnić używając wzorów (2) i (6).

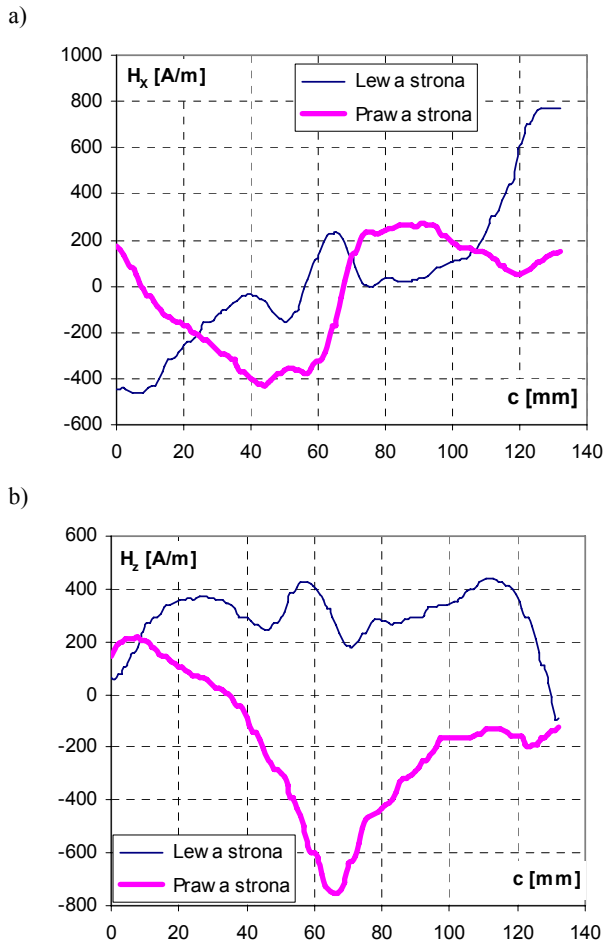


Rys. 10. Stan namagnesowania ukreconych wałków:
 a) powierzchnia wierzchołkowa wielowypustu;
 b) część walcowa.

4.6. Kumulacja odkształceń sprężystych

Możliwość zastosowania MPM do oceny zużycia zmęczeniowego materiału zweryfikowano na okuciu łopaty wirnika nośnego śmigłowca. Badane powierzchnie pracują w odmiennych, złożonych warunkach obciążenia.

Stwierdzono, że po około 1400 godzinach nalotu stan namagnesowania górnej i dolnej części okucia łopaty wykazuje wyraźną różnicę w namagnesowaniu – Rys. 11. Zastane namagnesowanie jest większe od dopuszczalnego namagnesowania resztkowego ($\pm 240 \text{ A/m}$). Obserwowane wyraźne pochylenie krzywych wzdłuż cięciwy (osi c) wywołane jest przez naprężenia własne wprowadzone przez moment skręcający. Wzrost namagnesowania w połowie cięciwy na prawej półce jest wywołane kumulacją naprężeń w pobliżu otworu. Rozdzielenie składowych naprężeń własnych i wyskalowanie obserwowanych symptomów diagnostycznych w jednostkach naprężenia wymaga przeprowadzenia badań uzupełniających (eksperymentu czynnego).



Rys. 11. Stan namagnesowania okucia łopaty wirnika nośnego śmigłowca: a) składowa pozioma; b) składowa pionowa

4.7. Metoda MPM w systemach SHM?

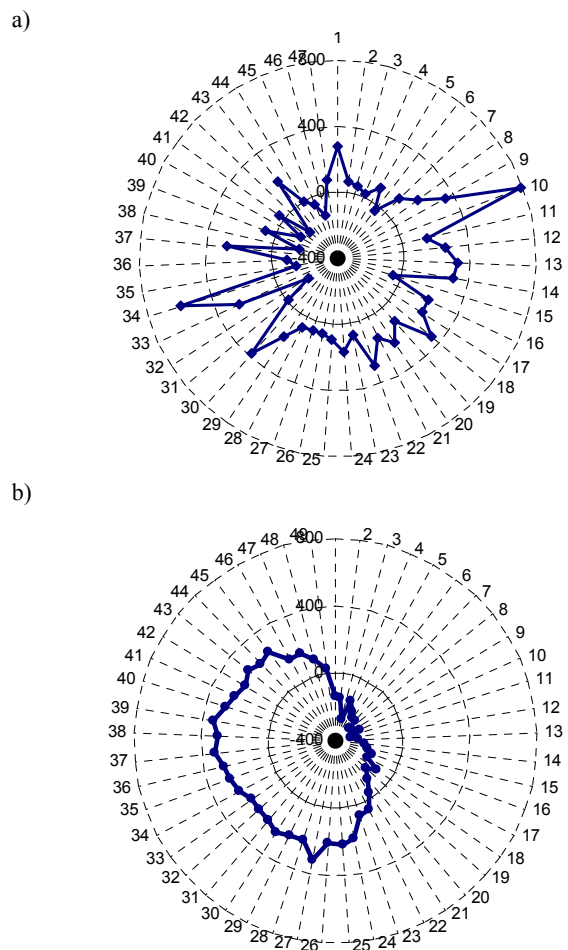
Metoda MPM jest bardzo interesująca dla systemów SHM. Za jej atrakcyjnością przemawiają:

- możliwość obserwacji kumulacji skutków rzeczywistych warunków pracy (przyczyny problemów zmęczeniowych krytycznych elementów);
- niski koszt montażu stacjonarnej, miniaturowej sondy pola magnetycznego;
- prosty tor pomiarowy (rejestracji i akwizycji danych);
- łatwiejsze, względem zagadnień NDT, algorytmy analizy i interpretacji wyników pomiaru (metody statystyczne i analiza trendów średniego namagnesowania i lokalnych anomalii magnetycznych).

Algorytm analizy danych musi jednak uwzględniać większość zjawisk magnetomechanicznych występujących podczas pracy maszyny – Tab. 1, oraz rzeczywiste warunki magnesowania/rozmagnesowania badanego elementu w zewnętrznym polu magnetycznym (ziemskim, sąsiednich elementów) podczas pracy i postoju maszyny.

Przykład. 1. Wirnik sprężarki

Quasi-statyczne badania MPM (stała pozycja sondy, ręczny obrót wirnika) wykonano dla krótkich łopatek wykonanych ze stali 18H2N4WA, zamontowanych w wirniku sprężarki silnika SO-3. Tarcze sprężarki wykonane są ze stali EI-736Sz (wg TU14-1-1089-74) - łopatki z tarczą nie tworzą magnetowodu.



Rys. 12. Namagnesowanie łopatek IV (a) i VII (b) stopnia

Przy częściowo zdemontowanym kadłubie sprężarki ocenie podlegało zastane namagnesowanie 310 łopatek I – VII stopnia sprężarki:

- w pobliżu krawędzi natarcia i splywu (wzdłuż wysokości pióra);
 - na powierzchni wierzchołkowej pióra
- Pomiary wykonano również w połowie odległości między kolejnymi stopniami sprężarki, w celu oceny wzajemnego oddziaływania wirujących palisad.

Stwierdzono, że warunki magnesowania wirujących łopatek są bardziej złożone, niż w prostym modelu Dubowa. Obserwuje się wyraźny wpływ efektu Barnetta i drgań wirnika (VII stopień) – Rys. 12.

Podczas pracy pióra łopatek sprężarki podlegają wielokierunkowemu magnesowaniu przez zmiennie pole magnetyczne:

- Ziemi (wpływ obrotu wirnika);
- sąsiednich łopatek danego stopnia sprężarki
- łopatek palisady kierownic poprzedniego i bieżącego stopnia.
- dodatkowego punktowego źródła (czujnik indukcyjny systemu SNDŁ-1b/SPL-2b, zamontowany nad łopatkami I stopnia sprężarki; $H_{pz} = -120$ kA/m na powierzchni czołowej czujnika i $H_{pz} = -75$ kA/m przy minimalnym odstępnie od powierzchni wierzchołkowej pióra łopatki).

Przykład 2. Koło zębate z_1

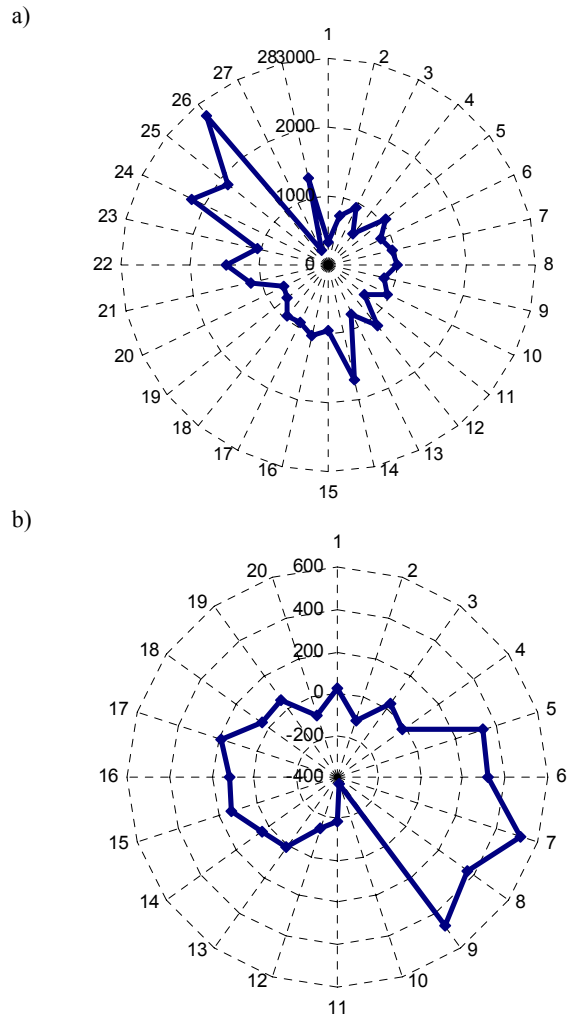
Znana z wyważania statycznego zasada lokalizacji „ciężkiego punktu” dotyczy również wirnika sprężarki. Niewyważenie jest przyczyną zatrzymywania wirnika w jednakowym położeniu kątowym („ciężki punkt” na godz. 6), co potwierdza obserwowany stan namagnesowania łopatek I stopnia sprężarki – Rys. 13a). Trzy łopatki (nr 24 – 26) wykazują zwiększone namagnesowanie (>2000A/m) wywołane przez czujnik systemu diagnostycznego SNDŁ-1b/SPL-2b. Niewyważenie i niewspółosowość wirnika sprężarki jest źródłem nierównomiernego obciążenia zębów pierwszego koła zębatego w układzie kinematycznym silnika – Rys.13b). Przeciążenie zębów występujących głównie w fazie rozruchu. Pomiar namagnesowania powierzchni bocznej koła zębatego potwierdził oczekiwania, w tym wyniki wcześniejszych badań Roskosa (2004) (Roskosz, 2004).

5. ROZSZERZONY MODEL MATEMATYCZNY

Zastosowanie MPM do diagnostowania narastającego zmęczenia materiału wymaga udokumentowania skuteczności efektu przy pomocy innych uznanych metod badań nieniszczących, np. defektoskopii ultradźwiękowej, wiropądowej, czy analizy modalnej. Metod wykorzystujących cechy materiałowe (m.in. moduł Younga, współczynnik Poissona, stałą dielektryczną), które są sprzęgnięte z odkształceniami i naprężeniami oraz bieżącym namagnesowaniem badanego elementu ferromagnetycznego. W zakresie odkształceń sprężystym sprzężenie pomiędzy ww. parametrami opisuje rozszerzony model matematyczny, stosowany m.in. przez Shashidhar Srinivasa i zespół (2006):

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \epsilon_{kl} + e_{ijl} (-E_l) + q_{ijl} (-H_l) \\ D_i &= e_{ikl} \epsilon_{kl} - \kappa_{il} (-E_l) - a_{il} (-H_l) \\ B_i &= q_{ikl} \epsilon_{kl} - a_{il} (-E_l) - \mu_{il} (-H_l) \end{aligned} \tag{7}$$

gdzie, σ_{ij} i ϵ_{ij} są naprężeniem i odkształceniem sprężystym; D_i i E_i są odkształceniem i polem elektrycznym; B_i , H_i są natężeniem i polem magnetycznym; C_{ijkl} , κ_{il} , μ_{il} są tensorami sztywności sprężystej, przenikalności dielektrycznej i przenikalności magnetycznej.



Rys. 13. Wpływ niewyważenia wirnika sprężarki na nierównomierność wyężenia zębów koła zębatego z_1 : a) magnetogram łopatek I stopnia sprężarki; b) magnetogram powierzchni bocznej zębów koła z_1 (H [A/m])

6. PODSUMOWANIE

Dotychczasowe badania wykazały możliwość stosowania efektu i metody magnetycznej pamięci metalu do diagnostowania techniki lotniczej.

Przy obecnym oprzyrządowaniu i algorytmach uzyskano wiarygodne wyniki identyfikacji stanu technicznego drobnych elementów tylko dla zmęczenia typu LCF i LCF+HCF. Algorytmy detekcji SKN, zaproponowane przez Dubowa, i charakterystyki przestrzenne stosowanych sond transduktorowych nie gwarantują właściwego rozpo-

znania pęknięć kruchych (HCF, VHCF) drobnych elementów wykonanych ze stali stopowych.

Proces detekcji SKN jest bardziej złożony dla drobnych elementów pracujących w ruchomych obiektach, np. statkach powietrznych. Skończona objętość elementu ujawnia wyraźny wpływ warunków brzegowych (kształtu rozmiaru i położenia) na mierzone gradienty pola magnetycznego, natomiast ruch obiektu jest modulatorem efektów magneto-mechanicznych (sprężenie fazy wyężenia materiału z chwilowym kierunkiem magnesowania).

Podczas kontroli MPM należy pamiętać, że mierzony rozkład pola magnetycznego ulega zmianie w zależności od położenia badanego elementu względem zewnętrznego pola magnetycznego (Ziemi, innych elementów). Powyższe spostrzeżenie można wykorzystać do zwiększenia czułości detekcji pęknięć kruchych i lokalnych anizotropii naprężeniowych (analiza różnicowa z dwóch pomiarów wykonanych dla różnego położenia badanego elementu).

LITERATURA

1. **Badeshia H. K. D. H., Honeycomb R. W. K.** (2006), *Steels microstructure and properties*, Elsevier, Ltd.
2. **Bomba J., Kaleta J.** (2005), Investigation of magnetostrictive sensor in quasi-static conditions, *22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Monticelli Terme / Parma – Italy.
3. **Bozorth R. M.** (1951), *Ferromagnetism*, Van Nostrand, New York.
4. **Buch A.** (1964), *Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej*, PWN, Warszawa.
5. **Buehler M. J.** (2008), *Atomistic modeling of material failure*, Springer Science+Business Media, LLC.
6. **Collins E. W.** (1995), Influence of process parameters on the magnetic properties of LTV-processed steel, *Report to the Fermi National Accelerator Laboratory*.
7. **Craik D. J., Wood M. J.** (1970), Magnetization changes induced by stress in a constant applied field, *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, 3, 1009-1016.
8. **Dapino M. J., Calkins F. T., Smith R. C., Flatau A. B.** (1999), A magnetoelastic model for magnetostrictive sensors, *Proceedings of ACTIVE 99, International Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, Ed. Scott Douglas, pp. 1193-1204, Fort Lauderdale, Florida, December 1999.
9. **DiMarzio Ch., Sun Nian**, Magneto-Optical Kerr Effect Microscope”, Northeastern University, Electrical and Computer Engineering Department, Capstone, http://www.ece.neu.edu/faulty/dimarzio/capstone/samples/Final_Capstone_Report.pdf
10. **Dubow A. A., Dubow Al. A., Kolokolnikow S. M.** (2004), *Metoda magnetycznej pamięci metalu (MPM) i przyrządy kontroli*. RESURS, Warszawa.
11. **Hubert O.** (1998), Influence des contraintes internes et de la structure des dislocation sur les couplages magnéto-mécaniques dans les alliages Fe-3%Si á grain non orientés, *Thèse de doctorat*, Université Technologique de Compiègne, France .
12. **Jiles D. C., Atherton D. L.** (1984), Theory of the magnetisation process in ferromagnetics and its application to the magnetomechanical effects, *J. Phys. D.*, Vol. 17, 1265-1281.
13. **Jiles D. C.** (1991), *Introduction to magnetism and magnetic material*, Chapman and Hall.
14. **Lai Man Wang** (1999), *The effect of ageing on the magnetic properties of 316L stainless steel*, City University of Hong Kong.
15. **Lupu N.** (2007), *Magnetostriction vs. Magnetoelastic Effects*, European School on Magnetism, Cluj-Napoca, Romania.
16. **Mićunović M.** (2006), Thermodynamical and self-consistent approach to inelastic ferromagnetic polycrystals, *Arch. Mech.*, 58, 4-5, 393-430.
17. **Muzhitskiy V. F., Krutikova L. A., Popov B. E., Bezlyudko G. Y.**, Magnetic inspection (by coercive force) of stressed state condition and residual resource of steel work, http://www.snr-ndt.com.ua/statya_eng.php
18. **Newnham R.** (2005), *Properties of materials. Anisotropy, symmetry, structure*, Oxford University Press.
19. **Oakberg Th. C.**, Magneto-optic Kerr effect, Application note, PEMlabs, <http://www.hindsinstruments.com/>
20. **Roskosz M.** (2004), Badania diagnostyczne kół zębatych z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu, *Materiały konferencji PIRE 2004*.
21. **Schijve J.** (2009), *Fatigue of structures and materials*, Springer Science+Business Media, LLC.
22. **Shashidhar S. i inni** (2006), *The effective magnetoelastic moduli of matrix-based multiferroic composites*, Materials and Nanoscience, Nebraska Center for, University of Nebraska – Lincoln
23. **Vlasov V. T., Dubov A. A.** (2004), *Physical bases of the metal magnetic memory method*, ZAO “Tisso” Publication House, Moscow .
24. **Witos M.** (2008), Modal analysis as a high sensitive NDT method of compressor cracking blade, *Proc. of 4th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Cracow, DEStech Publication, Inc., 963-970.
25. **Witos M., Szczepanik R.** (2009), Turbine Engine Health/Maintenance Status Monitoring with Use of Phase-Discrete Method of Blade Vibration Monitoring, *Solid State Phenomena*, Vol. 147-149, 530-541.
26. **Witoś M., Wiśnioch M.** (2009), „Применение метода магнитной памяти металла в системах СХМ вращающихся элементов”, Пятая международная научно-техническая конференция "Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла", Москва.
27. **Żurek Z. H.** (2005), Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym, *Zeszyty naukowe*, nr 1678, Politechnika Śląska, Gliwice.
28. <http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/sections/24/for-picture-gallery/stress-induced-magnetization-reversal>

FATIGUE MATERIAL ASSESMENT ON THE BASE OF MAGNETIC SHAPE MEMORY PHENOMENA

Abstract: In the abstract there has been presented magnetic memory phenomena (MPM). Theoretical background is delivered with the examples of aerospace elements diagnosis. In the article advantages of technique (MPM) has been presented as well as difficulties met during the inspection for example small elements and such as: driving shafts or compressor's blades. Moreover indication of necessity of the reliability prove for the fatigue HCF and VHCF cracks has been highlighted.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr O N504 000534 finansowanego w latach 2008-2010 przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Badania wykonano przy współpracy z firmą Energodiagnostyka Sp. z o.o.