

TESTOWANIE ELEMENTÓW STALOWYCH ZA POMOCĄ METODY WRPM

W artykule omówiona została możliwość testowania stalowych części samochodowych i autobusowych za pomocą metody WRPM. Umożliwia ona wykrycie stref koncentracji naprężeń w badanych elementach jak również innych uszkodzeń. Może przyczynić się ona do zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacyjnego pojazdów drogowych.

WSTĘP

Ważnym zagadnieniem z technicznego punktu widzenia jest kontrola jakości nowych wyrobów jak również kontrola stanu technicznego elementów eksploatowanych. Nie jest sztuką stwierdzenie, że element uległ uszkodzeniu na skutek pęknięcia lecz z odpowiednim wyprzedzeniem wskazanie, że element może ulec uszkodzeniu. Metodą, która umożliwia postawienie diagnozy a priori jest Metoda Własnego Rozproszonego Pola Magnetycznego WRPM. Umożliwia ono wskazanie miejsc czy obszarów niebezpiecznych, pęknięć czy innych defektów. Jej obszar działania jest ograniczony do elementów ferromagnetycznych. Polega ona na analizie składowych normalnej i stycznej rozproszonego pola magnetycznego oraz ich gradientów wzdłuż drogi pomiarowej. Metoda może być przydatna do analizy jakości nowych części ferromagnetycznych jak również eksploatowanych.

1. METODA WRPM

Metoda WRPM jest to szybki sposób określenia rozkładu naprężeń i odkształceń materiału umożliwiający diagnozę stanu technicznego stalowych elementów pracujących konstrukcji i maszyn. Oparta jest na powszechnie znanym zjawisku rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o różnej przenikalności magnetycznej. Rozproszone pole magnetyczne wykorzystywane jest od dawna w defektoskopii magnetycznej do ujawnienia wad podpowierzchniowych i powierzchniowych takich jak korozyjne ubytki grubości, pęknięcia. Klasyczne metody nieniszczące wykorzystujące rozproszenie strumienia magnetycznego potrzebują aby obiekt badany był magnesowany. Zapisuje się zmienne natężenia pola magnetycznego przy powierzchni wzdłuż ścieżki przesuwu sond przyrządu jakim jest magnetometr. Zaburzenia pola są wykryciem wady. Nazwa metody defektoskopii magnetycznej MFL pochodzi od pierwszych liter angielskiej nazwy Magnetic Flux Leakage czyli – wyciek strumienia magnetycznego. W ostatnim czasie metoda Magnetic Flux Leakage jest mocno rozwijana oraz doskonalona w dziedzinie aparatury jak i sposobów opracowywania wyników. Znaczący postęp wiedzy o zjawiskach określających własności magnetycznego strumienia nastąpił w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Obok licznych wcześniejszych prac teoretycznych i doświadczalnych znaczącą rolę odegrały badania wykonane w Instytucie F. Forstera, a w szczególności precyzyjne badania zależności między natężeniem pola magnesującego, natężeniem pola powstałego wewnątrz nieciągłości (wąskie szczeliny, otwory) i rozkładem natężenia w polu rozproszonym nad powierzchnią badanego elementu. Po przeprowadzeniu tych badań stwierdzono liniowość zależności między natężeniem rozproszonego pola magne-

tycznego wokół uszkodzenia i natężeniem pola we wnętrzu samego uszkodzenia. Ustalono sposób wyznaczania natężenia pola magnetycznego w objętości wady w zależności od własności magnetycznych materiału, geometrii wady i natężenia pola magnesującego.

Pomijając czasowe i lokalne różnice natężenia pola magnetycznego Ziemi zakładamy, że stalowe elementy konstrukcji magnesują się w stałym polu magnetycznym. Wartość natężenia pola magnetycznego Ziemi wynosi w przybliżeniu około 40 A/m. Jest to wartość stosunkowo mała w porównaniu z natężeniem pól magnesujących stosowanych w defektoskopii magnetycznej MFL (magnesowanie magnesami stałymi lub elektromagnesami). Pomimo słabego pola magnesującego przy powierzchni elementu stalowego, w okolicach silnego odkształcenia plastycznego, prostopadła do powierzchni składowa natężenia rozproszonego pola magnetycznego przyjmuje wartość nawet kilkaset amperów na metr.

Istotą metody jest pomiar składowej pionowej i stycznej WRPM. Wartość składowej pionowej natężenia rozproszonego pola magnetycznego H_p jest wprost proporcjonalna do wartości pionowej składowej indukcji B_p :

$$H_p = \frac{1}{\mu_0} B_p, \quad (1)$$

gdzie: stała μ_0 oznacza przenikalność magnetyczną powietrza i wynosi:

$$\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

Przyrost składowej pionowej ΔH_p również jest wprost proporcjonalny do przyrostu indukcji magnetycznej ΔB_p :

$$\Delta H_p = \frac{1}{\mu_0} \Delta B_p \quad (2)$$

Wartość indukcji B_p jest proporcjonalna do gradientu indukcji B wzdłuż badanego elementu:

$$B_p \sim \frac{\Delta B}{\Delta z}, \quad (3)$$

tym samym wartość H_p również jest proporcjonalna do gradientu B wzdłuż badanego obiektu:

$$H_p \sim \frac{l}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta z} \quad (4)$$

Indukcja maleje gdy strumień indukcji wchodzi do obszaru o mniejszej przenikalności. W takiej sytuacji pionowa składowa indukcji oraz pionowa składowa pola rozproszonego mają znak dodatni. Indukcja rośnie natomiast gdy strumień indukcji wychodzi z obszaru o mniejszej przenikalności. Pionowa składowa indukcji oraz pionowa składowa pola rozproszonego mają znak ujemny. Nad środkiem tego obszaru wartość H_p osiąga wartość równą zero. W obszarach o jednakowych właściwościach magnetycznych linie indukcji będą równoległe do powierzchni i nie występuje rozproszone pole magnetyczne nad powierzchnią materiału.

Zmianę indukcji ΔB na odcinku Δz spowodowaną naprężeniem możemy wyznaczyć jako :

$$\Delta B = \lambda_{H,T} \cdot \Delta \sigma, \quad \lambda_{H,T} = \left(\frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{H,T}. \quad (5)$$

Wyrażenie $\lambda_{H,T}$ oznacza czułość zjawiska magnetosprężystego materiału przy stałym polu magnesującym H i w stałej temperaturze T . Uwzględniając te zależności otrzymamy:

$$H_p \sim \frac{l}{\mu_0} \lambda_{H,T} \cdot \Delta \sigma, \quad (6)$$

wartość składowej H_p jest wprost proporcjonalna do zmiany naprężenia zredukowanego według hipotezy Hubera-Misesa-Hency'ego na odcinku Δz i zależy od czułości zjawiska magnetosprężystego badanego obiektu [1-3].

Zależność pomiędzy składową pionową natężenia pola i naprężeniem zredukowanym jest zależna od wielu czynników, oprócz natężenia pola magnesującego i temperatury również od rodzaju odkształcenia (rozciąganie, ściskanie, stany złożone), obciążenie mechaniczne badanego elementu. Metoda wykorzystania własnego rozproszonego pola magnetycznego jest ciągle rozwijana i może być cennym uzupełnieniem innych metod diagnostycznych [4,5].

2. APARATURA POMIAROWA

W badaniach zastosowano:

- urządzenie rejestrujące koncentracje naprężeń TSC-3M-12 - głowicę pomiarową do badania lin stalowych kompatybilną z urządzeniem rejestrującym

Urządzenie rejestrujące składa się z trzech podstawowych elementów [26]:

- wielokanałowy rejestrator (12 kanałów) pozwalający na używanie różnego rodzaju głowic pomiarowych
 - karty pamięci (32 MB) która pozwala na rejestrację wyników pomiarów przez około 1-15 dni bez konieczności transferu danych do komputera
 - wyświetlacza o rozdzielczości 320x240 pikseli, który pozwala na wstępną ocenę wyników już w trakcie przeprowadzania badania
- Najważniejsze parametry techniczne urządzenia rejestrującego:

- Zakres pomiarowy wielkości H_p dla każdego kanału ± 2000 A/m
- Liczba kanałów pomiarowych wielkości H_p 12
- Główny błąd względny wielkości H_p dla każdego kanału $\pm 5\%$
- Dodatkowy błąd absolutny wielkości H_p dla każdego kanału ± 2 A/m
- Minimalny krok pomiarowy 1mm
- Maksymalny krok pomiarowy 128 mm
- Główny błąd absolutny pomiaru czujnika przemieszczenia ± 1 krok pomiarowy
- Dodatkowy błąd względny pomiaru czujnika przemieszczenia $\pm 5\%$

- Maksymalny odcinek pomiarowy przy kroku pomiarowym 1 mm 110 m
- Maksymalny odcinek pomiarowy przy kroku pomiarowym 128 mm 14080 m
- Wymiary 230x110x23 mm
- Waga 0,6 kg

Dopuszczalne warunki pracy:

- temperatura od -15°C do $+55^\circ\text{C}$
- wilgotność do 85%
- ciśnienie od 630 do 800 mmHg.

Na rysunku 1 przedstawiono widok urządzenia rejestrującego. Umożliwia ono jednoczesną rejestrację 8 składowych rozproszonego pola magnetycznego. Zaletą urządzenia są niewielkie wymiary oraz możliwość prowadzenia badań w trudnych warunkach środowiskowych.



Rys. 1. Urządzenie rejestrujące pomiary WRPM

Głowica pomiarowa składa się następujących elementów rys.2.:

- metalowej obudowy,



Rys. 2. Głowica pomiarowa WRPM

- czterech czujników rozmieszczonych równomiernie na obwodzie głowicy
- wymiennej tulei dobranej w zależności od średnicy badanego obiektu w zakresie od 12 do 60 mm,
- rolki kompensującej

Aparatura wyposażona jest w specjalistyczne czujniki, których typ zależy od metody i specyfiki zadania kontroli. Czujnik powinien być wyposażony w co najmniej dwa kanały pomiarowe. Jeden z

kanalów przeznaczony jest dla przyrządu, drugi służy do kompensacji wpływu ziemskiego zewnętrznego pola magnetycznego.

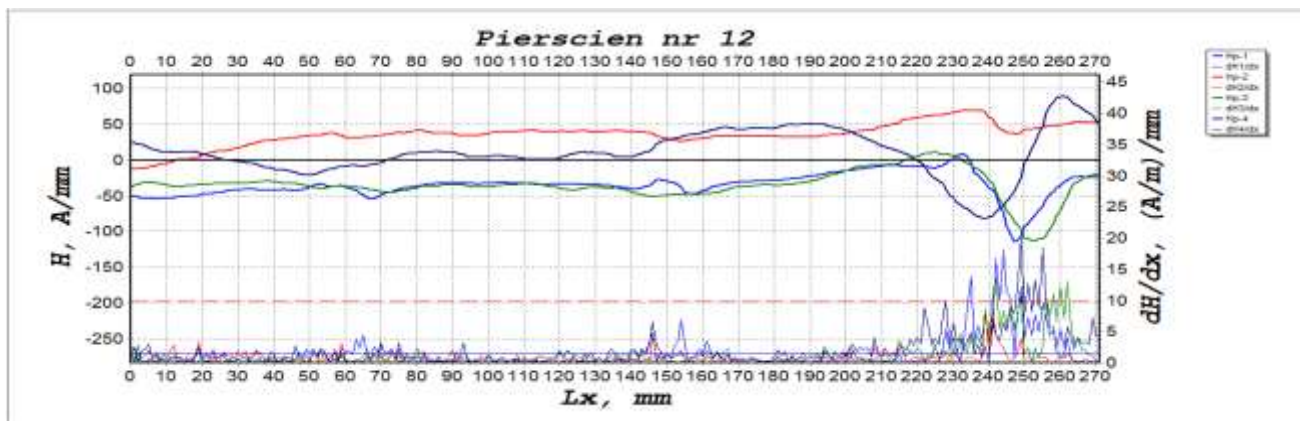
3. BADANIA PIERŚCIENI ZĘBATYCH

Obiektem badań były pierścienie zębate często stosowane w przemyśle motoryzacyjnym rys.3. Istotnym problemem była identyfikacja trudno wykrywalnych pęknięć hartowniczych. Pęknięcia te są zamknięte na skutek znacznych naprężeń własnych. Zastosowana metoda umożliwia również ocenę stanu wyężenia elementu i wskazanie obszaru koncentracji naprężeń. Przeprowadzono skanowanie powierzchni pierścienia w funkcji drogi pomiarowej rys.3. Na rysunku zaznaczono punkt startowy oraz kierunek prowadzonych pomiarów. Wyznaczono rozkłady składowych normalnych i stycznych rozproszonego pola magnetycznego jak również ich gradientów wzdłuż drogi pomiarowej.



Rys. 3. Badany pierścień zębata o numerze 12. Zaznaczono punkt startowy pomiaru WRPM

Wyniki przeprowadzonych pomiarów za pomocą głowicy pomiarowej wyposażonej w dwa czujniki hallotronowe przedstawiono na rys.4. Każdy z czujników dokonywał pomiaru dwóch składowych rozproszonego pola magnetycznego. Na wykresie rys.4. przedstawiono również wyznaczone wartości gradientów składowych rozproszonego pola magnetycznego. Gradienty przedstawiają zmianę wartości składowej rozproszonego pola magnetycznego na danym odcinku drogi, którym zazwyczaj jest 1mm. Największe wartości gradientu obu składowych występują między 230 mm do 260 mm drogi pomiarowej i przekraczają dopuszczalną wartość 10 A/m/mm. W tym obszarze zlokalizowano strefę koncentracji naprężeń, która również została potwierdzona metodą dyfrakcji rentgenowskiej.



Rys.4. Rozkład składowej normalnej i stycznej rozproszonego pola magnetycznego wzdłuż pierścienia zębatego

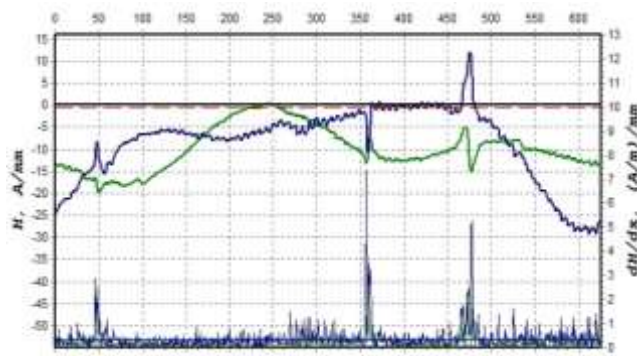
4. BADANIA KÓŁ ZĘBATYCH

Przeprowadzono badania kół zębatach walcowych. Schemat badań z zaznaczonymi dwoma drogami pomiarowymi L1 i L2 pomiarowymi kierunkiem przeprowadzonego skanowania oraz umiejscowienie czujników przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Schemat pomiaru koła zębatego wraz z zaznaczonymi drogami pomiarowymi L1 i L2

Wyniki otrzymanych pomiarów przedstawiono na rys.6. Analiza wykresów na podstawie kształtu składowej normalnej oraz stycznej własnego pola magnetycznego wykazała, że na badanej powierzchni koła występują obszary koncentracji naprężeń. Spowodowały one powstanie mikropęknięć. Potwierdza to również wartość gradientów składowej normalnej, która na długościach: 50 mm, 360 mm oraz 470 mm osiągała wartość ok. 8A/m/mm. W pozostałych analizowanych obszarach nie przekroczyła 2 A/m/mm.



Rys. 6. Składowa normalna i styczna rozproszonego pola magnetycznego wzdłuż koła zębatego

PODSUMOWANIE

Metoda Własnego Rozproszonego Pola Magnetycznego w odróżnieniu od szeregu innych metod badań nieniszczących umożliwia wyznaczenie w badanych elemencie ferromagnetycznym stref koncentracji naprężeń jeszcze przed powstaniem pierwszych mikropęknięć. Jest to istotne gdyż umożliwia odpowiednim wyprzedzeniem podjęcie stosownych działań zapobiegawczych. Może mieć ona zastosowanie w kontroli jakości stalowych wyrobów motoryzacyjnych jako cenne uzupełnienie innych stosowanych metod.

BIBLIOGRAFIA

1. Deputat J., *Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu*, *Dozór Techniczny* 2002 nr 5, 97-105
2. Juraszek J., *Identyfikacja obszarów koncentracji naprężenia w elementach ferromagnetycznych za pomocą metody magnetycznej pamięci*, *Logistyka* 2014, nr 6, 4966-4976
3. Juraszek J., *Innowacyjne połączenie MES i MMPM*, *Górnictwo Odkrywkowe* 2010 R. 51, nr 4, 268-271
4. Yang L.J., Liu B., Chen L.J., Gao S.W., *The quantitative interpretation by measurement using the magnetic memory method*

(MMM)-based on density functional theory, *NDT & E International* 2013 Volume 47, Issue 4, pp 15-20

5. Yao K., Deng B., Wang Z.D., *Numerical studies to signal characteristics with the metal magnetic memory-effect in plastically deformed samples*, *NDT & E International* 2012 Volume 47, Issue 4, pp 7-17

Steel elements examination using RMF method

The subject of the paper is the steel elements for automotive industry examination by Residual Magnetic Field Method also called Metal magnetic Memory Field MMM. The paper includes the presentation of the physical basics of method used. The aims to demonstrate that it is possible to determine the technical conditions of steel elements for automotive industry.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Janusz Juraszek** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej ul. Willowa 2.

jjuraszek@ath.bielsko.pl