

Analiza możliwości identyfikacji stanu wyężenia lin stalowych na podstawie pomiarów właściwości magnetycznych

Analysis of the possibility of identifying the strain condition of the steel wire ropes based on measurements of magnetic properties

Streszczenie

Badania nieniszczące lin stalowych to głównie badania defektoskopowe zorientowane na wykrycie pęknięć drutów, deformacji, starć oraz korozji. Jako metody badań stosowane są najczęściej różnego rodzaju metody magnetyczne oraz wizualne. W artykule podjęto analizę możliwości rozszerzenia diagnostyki stanu lin o identyfikację stanu ich wyężenia na podstawie pomiarów zmian właściwości magnetycznych. Wybrane druty liny poddano rozciąganiu i przeprowadzono pomiary własnego magnetycznego pola rozproszenia oraz parametrów impedancji niskoczęstotliwościowej.

Słowa kluczowe: stan wyężenia; właściwości magnetyczne; liny stalowe

Abstract

Non-destructive testing of steel wire ropes is mainly a flaw detection examination aimed at detection of wire failures, deformations, wear and corrosion. Various types of magnetic and visual methods are used as research methods usually. The article discusses the possibility of extending rope diagnostics to identify the condition of their strain on the basis of measurements of changes in magnetic properties. The selected wire ropes were stretched and measurements of their own magnetic stray field and low frequency impedance parameters were performed.

Keywords: strain condition; magnetic properties; steel wire ropes

Wprowadzenie

Rzeczony magnetycznych metod badań lin stalowych jest od wielu lat przedmiotem badań w Katedrze Transportu Linowego AGH [1,2]. Wśród tych metod można wyróżnić tradycyjną, aktywną opartą na formatowaniu pola magnetycznego w linie i mierzeniu jego wycieku [1,2], oraz nową, pasywną wykorzystującą własne, samoistne namagnesowanie lin powstające wskutek działania obciążeń roboczych i sprężenia magnetomechanicznego (efektów magnetomechanicznych) [3,4]. Wraz z uzupełniającą je metodą wizualną są to metody zorientowane na wykrycie pęknięć drutów, deformacji, starć oraz korozji, czyli rozwiniętych efektów procesów zużycia. Interesującym zagadnieniem, z punktu widzenia eksploatacji lin, jest określenie stanu wyężenia liny oraz stanu zachodzących w niej procesów zmęczenia, na wcześniejszym etapie, gdy nie występują jeszcze makroskopowe oznaki zużycia (defekty) [3,4]. W niniejszym artykule podjęto próbę analizy możliwości identyfikacji stanu wyężenia lin na podstawie pomiarów zmian właściwości

magnetycznych. Przeprowadzono pomiary własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR [3,4] oraz parametrów impedancji niskoczęstotliwościowej [5÷9] rozplecionych pojedynczych drutów liny poddanych rozciąganiu.

Podstawy fizyczne

W skali makroskopowej występują ściśle związki pomiędzy własnościami mechanicznymi i magnetycznymi ferromagnetyków [3,4,6]. Pod wpływem naprężeń mechanicznych w ferromagnetyku dochodzi do odkształceń, którym towarzyszy zmiana namagnesowania.

Naprężenia i odkształcenia powodują zmianę oddziaływania sił wymiany między sąsiednimi atomami i prowadzą do zmiany rozkładu namagnesowania w domenach, a przez to do zmiany właściwości magnetycznych. Ogólnie zjawiska te nazywa się efektami magnetomechanicznymi,

Prof. dr hab. inż. Jerzy Kwaśniewski; dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH; mgr inż. Paweł Mazurek – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; **dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. ATH** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, **dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz** – Politechnika Wroclawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: mroskosz@agh.edu.pl

wśród których można wyróżnić efekty np. Villariego (magnesianie przy rozciąganiu i ściskaniu) i Matteuciego (magnesianie przy skręcaniu). Ze zjawiskiem magnetosprężystym związana jest magnetostrykcja [1], czyli efekt sprężystego odkształcenia i zmian właściwości mechanicznych, towarzyszący magnesowaniu ciał magnetycznych.

Natężenie WMPR w pobliżu obiektu ferromagnetycznego można opisać zależnością (1):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_a(\mathbf{r}) + \mathbf{H}_d(\mathbf{r}) \quad (1)$$

gdzie:

H_a – natężenie zewnętrznego pola magnetycznego,
 H_d – natężenie pola magnetycznego wywołanego namagnesowaniem ferromagnetyka. H_d nazywamy polem rozmagne-sowania i opisuje je równanie (2):

$$\mathbf{H}_d(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{-\nabla \cdot \mathbf{M}(\mathbf{s})}{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|^3} (\mathbf{r}-\mathbf{s}) dV(\mathbf{s}) + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{M}(\mathbf{s})}{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|^3} (\mathbf{r}-\mathbf{s}) dS(\mathbf{s}) \quad (2)$$

gdzie:

M – magnetyzacja,

∇ – objętość,

S – pole powierzchni ferromagnetyka,

s – wektor położenia dowolnego punktu wewnątrz lub na powierzchni ferromagnetyka.

Zmiany magnetyzacji J lub indukcji magnetycznej B od naprężeń σ , są równoważne zmianom odkształceń magnetostrykcji $\lambda = \Delta l/l$ od zmian natężenia pola magnetycznego H . Związki te definiują „czułość magnetosprężystą” d materiału. Zależnie od znaku magnetostrykcji, kierunek działania sił może zmniejszać lub zwiększać magnetyzację. Odwracalne zmiany magnetosprężyste występują w ograniczonym zakresie we wszystkich materiałach spolaryzowanych magnetycznie, wykazujących magnetostrykcję. Czuość magnetosprężysta zależy głównie od składu chemicznego.

Metoda impedancji niskoczęstotliwościowej polega na pomiarze indukcyjności L i rezystancji R w układzie szeregowym uzwojenia pomiarowego nawiniętego wokół badanej próbki dla kilku częstotliwości testowych. W metodzie tej stan materiału jest opisywany za pomocą trzech parametrów [1]:

- znormalizowana składowa impedancji $\omega L/\omega L_0$,
- znormalizowana składowa impedancji $(R-R_0)/\omega L_0$,
- częstotliwość napięcia testowego f .

gdzie:

$\omega = 2\pi f$ – częstość kątowna,

L_0 – indukcyjność cewki bez rdzenia,

L – indukcyjność cewki z rdzeniem,

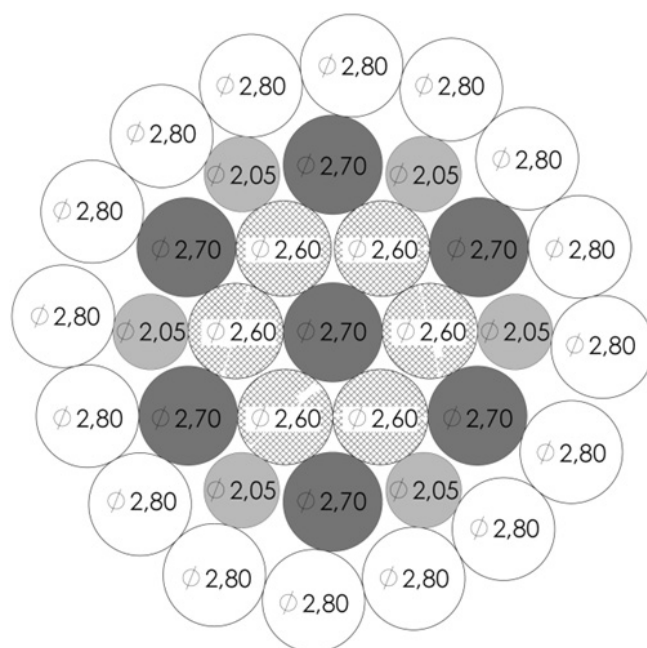
R_0 – rezystancja cewki bez rdzenia,

R – rezystancja cewki z rdzeniem.

Szczegółowy opis omawianych zagadnień można znaleźć w [4].

Szczegóły badań

Przedmiotem badań były druty pojedynczej splotki z liny 54,0 WK 6x35+Ap-S/z-n-l-g-1670-DIN 21254 cz.10 w stanie dostawy. Konstrukcję pojedynczej splotki badanej liny pokazano na rysunku 1, a własności mechaniczne i skład chemiczny drutów wchodzących w skład pojedynczej splotki liny zawarto w tabelicy I.



Rys. 1. Konstrukcja pojedynczej splotki badanej liny
 Fig. 1. Construction of a single strand of tested rope

Pomiary indukcyjności i rezystancji przeprowadzono za pomocą uniwersalnego mostka RLC CEM DT-9935. Przeprowadzono dwie serie pomiarów oznaczonych SI i SII, których szczegóły zawarto w tabelicy II. W każdej serii wykorzystano po 3 próbki drutu o średnicy 2,8 mm. Każdorazowo cewka pomiarowa była umocowana w centralnej części próbki, w równej odległości od szczęk maszyny wytrzymałościowej. Po osiągnięciu założonej wartości naprężenia w przekroju próbki rejestrowano wartości impedancji L i rezystancji R cewki pomiarowej dla 5 częstotliwości: 0,1; 0,12; 1; 10; 100 kHz.

Do pomiarów WMPR wykorzystywano magnetometr TSC-1M-4 z głowicą pomiarową TSC-2M dostarczony przez Energodiagnostika Co. Ltd Moscow. Badano pojedyncze druty o średnicy 2,8 mm. Ponieważ badane druty były pochodzący z rzeczywistej liny, były one odkształcone. Konieczne było

Tabela I. Własności mechaniczne i skład chemiczny drutów wchodzących w skład pojedynczej splotki liny 54,0 WK 6x35+Ap-S/z-n-l-g-1670-DIN 21254 cz. 10 [2]

Table I. Mechanical properties and chemical composition of wires in a single strand of rope 54,0 WK 6x35+Ap-S/z-n-l-g-1670-DIN 21254 part 10 [2]

Średnica drutu [mm]	Długość próbki [mm]	Zakres wytrzymałości [kN]	Gatunek walcówki	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
2,70	270	95,6÷110,5	C82D	0,84	0,55	0,21	0,01	0,01
2,60	260	88,6÷102,4	C82D	0,84	0,55	0,21	0,01	0,01
2,05	205	55,1÷63,7	C76D	0,74	0,54	0,23	0,01	0,009
2,80	280	102,8÷118,8	C82D	0,84	0,55	0,21	0,01	0,01

Tablica II. Szczegóły pomiarów impedancji
Table II. Details of impedance measurements

Parametr	Seria SI	Seria SII
Długość próbki [mm]	200	150
Koniec pomiarów	1000 MPa	Zerwania próbki
Średnica otworu cewki [mm]	4	2,8
Długość cewki [mm]	40	15
Liczba zwojów cewki	1500	750
Grubość drutu nawojowego cewki [mm]	0,28	0,15

zadanie obciążenia wstępnego, powodującego rozprostowanie próbki dające możliwość przeprowadzenia pomiaru składowych WMPR.

Prowadzono pomiar dwóch składowych WMPR na powierzchni próbki (rys. 1):

- H_T – składowa styczna mierzona w kierunku równoległym do kierunku zadawanego obciążenia,
- H_N – składowa normalna.

Ze względu na to, że w trakcie obciążania próbki następuje jej wydłużenie, zdefiniowano początek i koniec rejestrowania wartości poszczególnych składowych. W opracowanych wynikach pomiarów zastosowano na osi odciętych względną skalę odległości, w której 0 odpowiada miejscu rozpoczęcia pomiaru, a 1 miejscu zakończenia pomiaru. Próbkę obciążano analogicznie jak w przypadku pomiarów impedancji.

Wyniki badań i ich analiza

Pomiary impedancji niskoczęstotliwościowej

Krzywe znormalizowanych składowych impedancji, cewek sprzęgniętych indukcyjnie z próbkami, dla wybranych wartości naprężenia w przekroju próbki, reprezentatywne dla pomiarów w danej serii przedstawiono na rysunkach 2a i 2b.

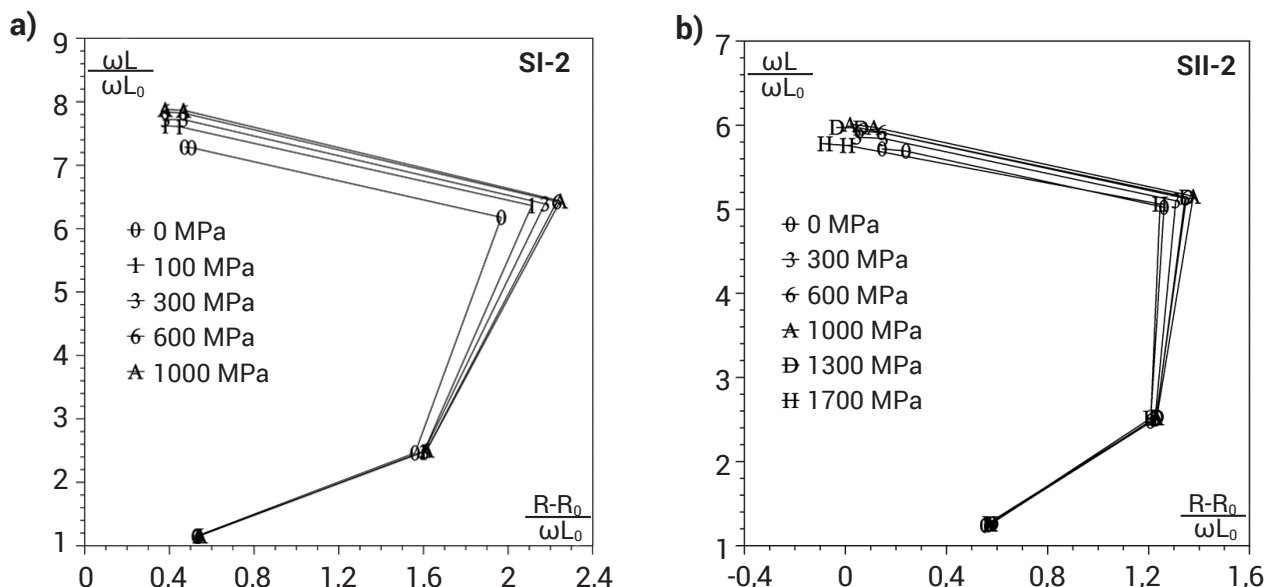
Dla obydwu serii pomiarowych widoczny jest wpływ częstotliwości pomiarowej na wielkość zmian impedancji przy zmianach naprężeń. Im wyższa częstotliwość, tym ten wpływ jest mniejszy, stając się praktycznie niewidoczny na rysunkach 2a i 2b obejmujących wszystkie częstotliwości.

W celu identyfikacji stanu wyężenia istotne są zmiany zachodzące w poszczególnych częstotliwościach. Dla serii SI wpływ naprężeń na wartości znormalizowanych składowych impedancji pokazano na rysunkach 3a, 3b i 3c odpowiednio dla częstotliwości 0,12 kHz, 1 kHz oraz 10 kHz. Rysunki 4a, 4b i 4c pokazują zmiany dla serii pomiarów SII.

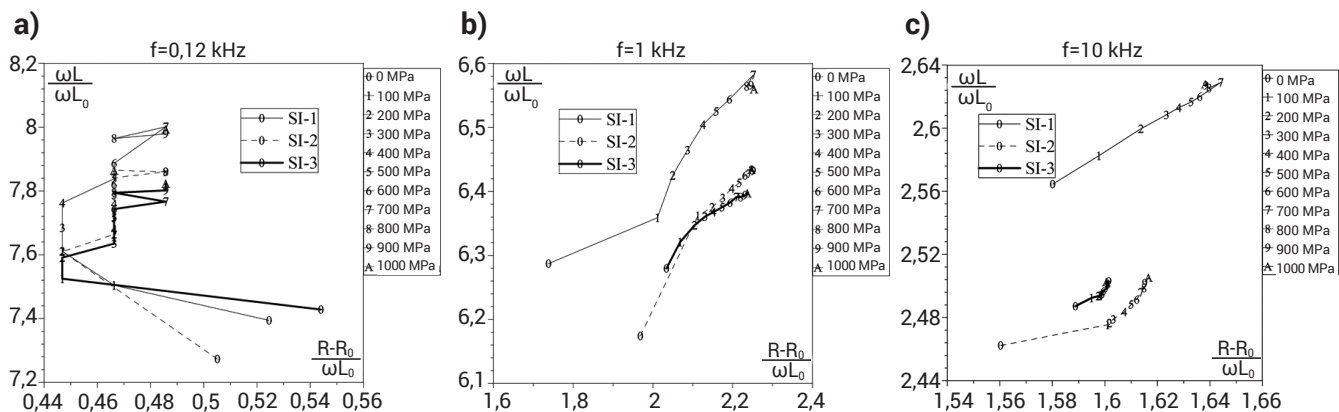
Seria SI obejmuje pomiary z wartościami naprężeń czynnych do 1000 MPa. Dla częstotliwości 0,1 i 0,12 kHz (rys. 3a) trudno nawet mówić o jakimś trendzie zmian. Dla częstotliwości 1 kHz i wyższych (rys. 3b i 3c) widać, że wraz ze wzrostem wartości naprężeń rosną zarówno znormalizowana rezystancja $(R-R_0)/\omega L_0$, jak i znormalizowana indukcyjność $\omega L/\omega L_0$.

W serii SII pomiary wykonywane były aż do zerwania próbki, obejmując tym samym większy zakres zmienności naprężeń niż seria SI. Krzywe wpływu naprężeń na parametry znormalizowanej impedancji są zbliżone do litery U. Dla częstotliwości 0,1 i 0,12 kHz (rys. 4a) jest to kształt zbliżony od odwróconego U. Na początku procesu obciążania i w końcowym jego stadium zmiany znormalizowanej indukcyjności $\omega L/\omega L_0$ zachodzą przy bardzo niewielkich zmianach znormalizowanej rezystancji $(R-R_0)/\omega L_0$, przy czym na początku procesu obciążania indukcyjność rośnie, a na końcu maleje (rys. 4a). Dla częstotliwości 1 kHz odwrócone U pochyła się pod kątem około 45° a jego ramiona przecinają się tworząc pętlę (rys. 4b). Dla częstotliwości 10 i 100 kHz krzywe wpływu naprężeń na parametry znormalizowanej impedancji są zbliżone do obróconej, pochylonej pod kątem ok. 45° litery U (rys. 4c). W tym przypadku, wraz ze wzrostem naprężeń czynnych, wartości znormalizowane rezystancji $(R-R_0)/\omega L_0$ i indukcyjności $\omega L/\omega L_0$ początkowo rosną, w fazie przejściowej spadkowi rezystancji towarzyszy dalszy wzrost indukcyjności, by w końcu wraz ze wzrostem naprężeń malały zarówno znormalizowana rezystancja $(R-R_0)/\omega L_0$, jak i indukcyjność $\omega L/\omega L_0$.

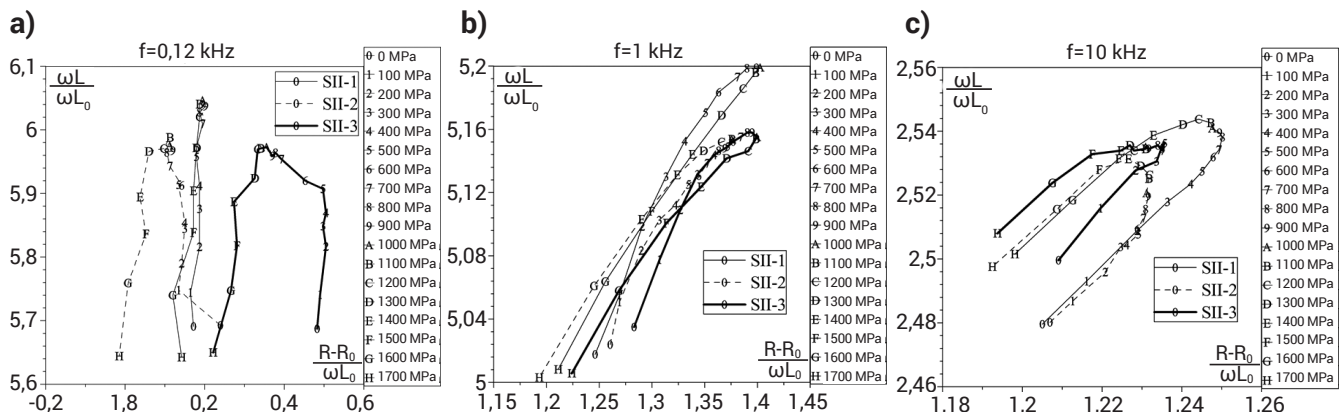
Dla obydwu serii pomiarowych problematyczna jest powtarzalność wyników, która przy podobnych, opisanych powyżej trendach zmian, praktycznie nie występuje. Prawdopodobnie wynika to z właściwości obiektu badań, drutów liny o znacznym i niejednakowym na długości stopniu odkształcenia plastycznego wynikającego z procesu produkcji. Skutkuje to całkowicie nieznanym stanem początkowym próbek pod względem stopnia odkształcenia plastycznego i stanu naprężeń własnych, co znacząco wpływa na otrzymane wyniki pomiarów i ich rozrzut.



Rys. 2. Krzywe znormalizowanych składowych impedancji dla wybranych wartości naprężenia: a) sample SI-2, b) sample SII-2
Fig. 2. Curves of normalized impedance components for selected stress values: a) sample SI-2, b) sample SII-2



Rys. 3. Wpływ naprężeń na wartości znormalizowanych składowych impedancji, seria SI
 Fig. 3. Effect of stresses on normalized impedance components, SI series

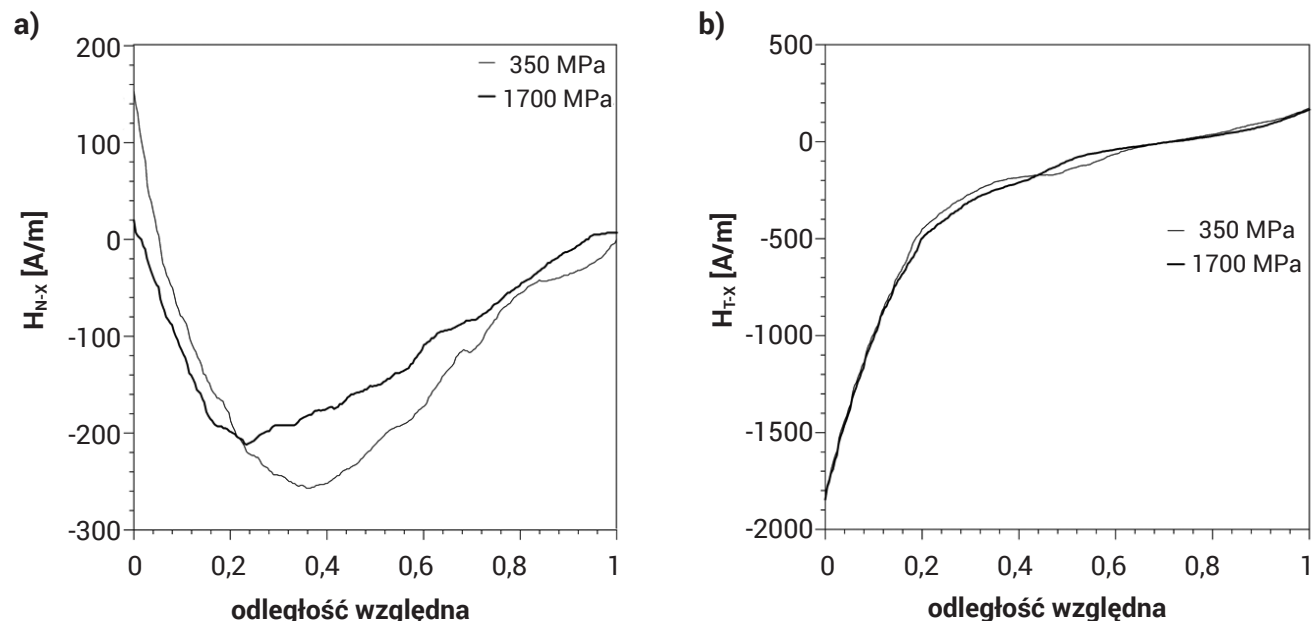


Rys. 4. Wpływ naprężeń na wartości znormalizowanych składowych impedancji, seria SII
 Fig. 4. Effect of stress on normalized impedance components, SII series

Pomiary własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR

Na rysunkach 5a i 5b przedstawiono rozkłady składowych WMPR (rys. 5a – składowa normalna, rys. 5b – składowa styczna) wzdłuż długości próbki drutu o średnicy 2,8 mm dla dwóch stanów obciążenia. Pierwszy z nich to naprężenie 350 MPa, przy którym nastąpiło wyprostowanie odkształconego w procesie produkcji drutu liny (co umożliwiło przeprowadzenie wiarygodnego pomiaru), a drugi 1700 MPa, to pomiar odpowiadający stanowi naprężenia tuż przed zerwaniem.

Widoczne dla przedstawionych, skrajnych stanów obciążenia drutów lin, zmiany wartości składowych WMPR nie są jednakowe na długości pomiarowej ani nie mają jednolitego trendu zmian. Eksperyment ten pokazuje, że dla pojedynczego drutu liny pomiary WMPR, z zastosowaniem opisanej aparatury badawczej, nie dają wyników mogących posłużyć do opracowania korelacji diagnostycznych opisujących stan wytwężenia.



Rys. 5. Rozkład składowych WMPR dla dwóch stanów obciążenia: a) składowa normalna, b) składowa styczna
 Fig. 5. The distribution of own magnetic stray field components for two laden states: a) normal component, b) tangential component

Podsumowanie

Przeprowadzono eksperymenty polegające na rozciąganiu rozplecionych drutów liny i pomiarach własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR oraz parametrów impedancji niskoczęstotliwościowej. Celem badań było rozszerzenie diagnostyki stanu lin o identyfikację stanu ich wyężenia na podstawie pomiarów zmian właściwości magnetycznych.

Wyniki badań pokazały, że pomiary WMPR, przy użyciu stosowanej aparatury badawczej, dla pojedynczego drutu liny nie dają wyników mogących posłużyć do opracowania korelacji diagnostycznych opisujących stan wyężenia. Zmiany wartości składowych WMPR nie mają jednolitego trendu zmian ani nie są jednakowe na długości pomiarowej.

Dla pomiarów impedancji niskoczęstotliwościowej, analizując pojedyncze pomiary, możliwa jest w miarę jednoznaczna identyfikacja stanu wyężenia. Natomiast problem stanowi powtarzalność wyników, która przy podobnych trendach zmian, praktycznie nie występuje. Kolejne badania w kierunku identyfikacji stanu wyężenia lin stalowych powinny dotyczyć rzeczywistego obiektu – całej liny, gdzie sygnał diagnostyczny będzie sygnałem wynikowym z wielu pojedynczych drutów, co może, ale wcale nie musi poprawić powtarzalność wyników pomiarów impedancji niskoczęstotliwościowej.

Literatura

- [1] Kwaśniewski J., Krakowski T., Ruta H., Molski S., Pypno M., Ratuszny K.: Qualitative Assessment of the Working Condition of Ropes in Rope, Applied Mechanics and Materials 683, 2014, pp. 45-49.
 - [2] Kwaśniewski J., Krakowski T., Molski S., Ruta H., Szybowski J.: Aspekty techniczno-metrologiczne nieniszczących badań eksploatacyjnych wybranych elementów urządzeń transportu linowego, Przegląd Komunikacyjny 72 (3), s. 33-38.
 - [3] Deputat J.: Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu, Dozór Techniczny 5/2002, s. 97-105.
 - [4] Roskosz M.: Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych, Gliwice 2014, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 530, ISBN 978-83-7880-244-0.
 - [5] Roskosz M., Fryczowski K.: Analiza możliwości identyfikacji stanu naprężeń czynnych na podstawie własnego magnetycznego pola rozproszenia ferromagnetyka, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 87 Nr 12, 2015, s. 75-77.
 - [6] Żurek Z. H., Duka P.: Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
 - [7] Fryczowski K., Roskosz M., Żurek Z. H.: Badania wstępne wpływu obciążeń rozciągających na parametry obwodu RLC, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 87, Nr 12, 2015, s. 45-49.
 - [8] Witoś M., Roskosz M., Fryczowski K., Żurek Z. H.: Bezdotykowy pomiar naprężeń metodą elektromagnetyczną, Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, Vol. 12, 2016, ISSN: 1509-5878.
 - [9] Roskosz M., Witoś M., Żurek Z. H., Fryczowski K.: Porównanie możliwości diagnostycznych metod magnetycznej pamięci metali, szumu Barkhausena i niskoczęstotliwościowej impedancji, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 88, Nr 10, 2016, s. 57-62, ISSN: 0033-2364.
-