

Jan Hankus, Łukasz Hankus

NOWA METODA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH LIN STALOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MAGNETYCZNEJ PAMIĘCI METALU

Streszczenie

Diagnostyka techniczna pracujących lin stalowych obejmuje szeroki zakres badań prowadzonych zarówno w warunkach ruchowych, jak i laboratoryjnych. Badania takie między innymi od przeszło pięćdziesięciu lat są prowadzone w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach.

W artykule przedstawiono próbę wykorzystania, w diagnostyce technicznej drutów i lin stalowych, nowej metody, której podstawą jest efekt magnetycznej pamięci metalu MPM i naturalne namagnesowanie w magnetycznym polu Ziemi. Metoda ta jest uważana za metodę diagnostyki XXI wieku. Magnetyczna pamięć metalu MPM jest to nieodwracalna zmiana stanu namagnesowania drutów stalowych, splotek i całej liny. Początkowa MPM nowej liny przejawia się w postaci magnetyzmu szczątkowego, „uformowanego” po wykonaniu drutów, splotek i skręceniu ich w linę w magnetycznym polu Ziemi. Charakteryzuje ona strukturalną i technologiczną dziedziczność wyrobu, który był poddany wielooperacyjnej obróbce. Pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń roboczych, przewyższających średni poziom naprężeń wewnętrznych, druty i cała lina są poddawane dalszemu „samonamagnesowaniu” w słabym magnetycznym polu Ziemi.

Nowa metoda MPM rozwijana przez A.A. Dubowa oparta jest na znanym zjawisku rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennie przenikalności magnetycznej. Ma ona wiele zalet. Nie wymaga czyszczenia i sztucznego magnesowania badanych elementów, co znacznie ułatwia prowadzenie badań diagnostycznych. Zjawisko magnetycznej pamięci metalu zostało najpierw potwierdzone w badaniach drutów linowych o różnym stopniu ich zmęczenia. Zauważono bowiem różną ilość podwieszonych opilek na poszczególnych próbkach, świadczące o różnym stopniu ich namagnesowania. Jedynie koniec próbki drutu z liny nowej nie został oklejony opilkami. Przeprowadzone w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych GIG połączone badania zmęczeniowe liny oraz badania z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu dostarczyły dalszych ważnych wniosków. Stwierdzono, że między klasycznymi (mechanicznymi) i magnetycznymi wskaźnikami postępującego zmęczenia istnieje duża współzależność. Współczynniki korelacji wszystkich zmiennych są istotne przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$.

Między magnetycznym wskaźnikiem zmęczenia (zużycia) m a liczbą cykli zmęczeniowych N , liczbą pęknięć drutów n i wydłużeniem ϵ istnieje znaczna zależność regresyjna. Opracowane modele regresyjne pozwoliły na określenie dla badanej liny przybliżonej wartości granicznej magnetycznego wskaźnika zużycia $m_{gr} = 6$. Zagadnienia te wymagają dalszych badań z linami różnych konstrukcji i w różnych warunkach obciążeń.

New method of diagnostic tests of steel ropes using the magnetic memory

Abstract

The technical diagnostics of steel ropes comprises a wide range of investigations conducted both in operational and laboratory conditions. Such investigations are carried out among others since fifty years in the Laboratory of Ropes and Shaft Equipment of the Central Mining Institute in Katowice.

The article presents a trial to use in the technical diagnostics of wires and steel ropes a new method, the basis of which is the effect of metal magnetic memory and natural magnetisation in the magnetising field of the Earth. This method is considered as the method of diagnostics of the 21st century. The metal

magnetic memory is the irreversible change of the magnetisation state of steel wires, rope strands and the entire rope. The initial metal magnetic memory appears in the form of residual magnetism, "formed" after the performance of wires rope strands and rope laying in the magnetic field of the Earth. It characterises the structural and technological heredity of the product, which was subject to multioperational treatment. Under the influence of cyclically variable working loads, exceeding the average level of internal stresses, the wires and the entire rope are subject to further "self-magnetisation" in a weak magnetic field of the Earth.

The new metal magnetic memory method developed by A.A. Dubov is based on the known phenomenon of magnetic flux dissipation in material of different magnetic permeability. It has many advantages. This method does not require cleaning and artificial magnetisation of tested elements, what considerably facilitates conducting of diagnostic tests. The phenomenon of metal memory has been at first proved in tests of rope wires with a different degree of their fatigue. One has observed various quantities of suspended filings on individual samples, showing a different degree of their magnetisation. Only the end of wire sample from a new rope has not been covered with filings. The carried out in the Laboratory of Ropes and Shaft Equipment of CMI joint fatigue tests and investigations using the metal magnetic memory were the source of further important conclusions. It has been stated that between classic (mechanical) and magnetic indices of following fatigue exists a great interdependence. The correlation coefficients of all variables are essential in case of significance level $\alpha < 0,05$.

Between the magnetic fatigue (wear) index m and the number of fatigue cycles N , number of wire cracks n and elongation ε there exists a considerable regressive relationship. The developed regressive models enabled to determine for the tested rope the approximate boundary value of the magnetic wear index $m_{gr} = 6$. These problems require further tests with ropes of different constructions and in different load conditions.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY

Magnetyczna pamięć metalu MPM jest to nieodwracalna zmiana stanu namagnesowania ferromagnetyków, czyli wyrobów stalowych (drutów stalowych, liny itp). Początkowa MPM nowej liny przejawia się w postaci magnetyzmu szczątkowego, „uformowanego” po wykonaniu drutów i skręceniu ich w linę, a następnie schłodzeniu w magnetycznym polu Ziemi. Charakteryzuje ona strukturalną i technologiczną dziedziczność drutów, które były poddane różnej wielooperacyjnej obróbce. Pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń roboczych, przewyższających średnie wartości naprężeń wewnętrznych, druty są poddawane dalszemu „samonamagnesowaniu” w słabym magnetycznym polu Ziemi.

Metoda diagnostyczna, w której została wykorzystana magnetyczna pamięć metalu MPM bazuje na znanym zjawisku rozpraszania strumienia magnetycznego materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej. Rozproszone pole magnetyczne jest od dawna wykorzystywane w defektoskopii magnetycznej do ujawniania wad powierzchniowych i podpowierzchniowych takich, jak pęknięcia czy korozyjne ubytki grubości. W odróżnieniu od klasycznej defektoskopowej metody MFL, metoda magnetycznej pamięci metalu MPM, rozwijana przez A.A. Dubowa, służy do badania odkształceń i naprężeń w stalowych elementach konstrukcyjnych (Deputat 2002). Polega na rejestracji własnych magnetycznych pól rozproszenia (WMPR) splotek nośnych liny w obszarach koncentracji naprężeń (OKN) pod wpływem obciążeń roboczych w słabym **magnetycznym polu Ziemi**. Różnice między metodami MFL i MPM dotyczą nie tylko zakresu zastosowań, ale także samej techniki badania, aparatury i sposobu oceny wyników. W badaniach defekto-

skopowych MFL, badany element jest silnie magnesowany za pomocą elektromagnesów albo magnesów stałych. Przy stosowaniu metody MPM badanych elementów nie magnesuje się w sposób sztuczny. Wykorzystuje się ich naturalne namagnesowanie w magnetycznym polu Ziemi. Natężenie prostopadłej do powierzchni składowej pola magnetycznego H_p rejestrują sondy przemieszczane przy powierzchni badanego elementu. Zmiany znaku i wartości H_p są wskazaniem, na podstawie których jest dokonywana ocena naprężenia i odkształcenia w materiale badanego elementu. W szczególności są wykrywane tak zwane obszary koncentracji naprężenia, w których mogą zachodzić procesy prowadzące do zmniejszenia wytrzymałości materiału.

Związek między rejestrowanymi wskazaniem H_p i odkształceniami czy naprężeniem materiału opiera się na zależności między naprężeniem i przenikalnością magnetyczną ferromagnetyków, zwanej jako zjawisko magnetosprężyste.

Podstawowym kryterium w diagnostyce nowych i używanych elementów (znajdujących się w eksploatacji) z zastosowaniem metody magnetycznej pamięci metalu jest określenie na powierzchni badanego elementu stref koncentracji naprężeń (KN), charakteryzujących się zmianą znaku pola magnetyzmu szczątkowego H_p lub linii na powierzchni metalu, charakteryzujących się zerową wartością składowej normalnej pola H_p . Pomiar pola magnetycznego H_p jest dokonywany specjalistycznymi magnetometrami typu IMNM-1F.

1.1. Magnesowanie

Miarą stopnia namagnesowania materiału ferromagnetycznego jest wartość indukcji magnetycznej B , jaka została wytworzona wewnątrz materiału (Deputat 2002). Stopień namagnesowania jest zależny od natężenia pola magnetycznego H i od przenikalności magnetycznej materiału μ

$$B = \mu H \quad (1)$$

Przenikalność magnetyczna jest tangensem kąta nachylenia stycznej do krzywej magnesowania

$$\mu = \frac{\delta B}{\delta H} \quad (2)$$

Wartość przenikalności magnetycznej μ dla danego materiału nie jest stała i zależy od natężenia pola magnetycznego H i od historii magnesowania.

1.2. Zjawisko magnetosprężyste

Wskutek działania obciążeń zewnętrznych powodujących odkształcenia mechaniczne w materiale ferromagnetycznym, nawet przy istnieniu magnetycznego pola Ziemi, zachodzi zmiana indukcji magnetycznej i stanu naprężenia. Zjawisko to nazywa się efektem magnetosprężystym.

W materiale ferromagnetycznym, znajdującym się w polu magnetycznym, pod wpływem naprężenia zmienia się stopień namagnesowania. Miarą czułości efektu magnetosprężystego jest stosunek wielkości zmiany indukcji do przyrostu naprężenia, który tę zmianę spowodował

$$\lambda = \left(\frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{H,T} \quad (3)$$

Czułość λ określa się przy ustalonych wartościach naprężenia pola magnesującego i temperatury.

Kolejne cykle zginania prowadzą do stopniowego narastania namagnesowania. Mechanizm ten powoduje silne magnesowanie cyklicznie obciążanych elementów stalowych.

1.3. Pole magnetyczne nad miejscem osłabienia

Wewnątrz namagnesowanego jednorodnego elementu linie sił biegną równolegle do powierzchni i nie ma składowej indukcji prostopadłej do powierzchni. Strumień magnetyczny wewnątrz zamkniętego obwodu magnetycznego o jednakowym przekroju i jednakowych własnościach magnetycznych materiału nie powoduje wytworzenia pola magnetycznego na zewnątrz, nie generuje rozproszonego pola magnetycznego. Natężenie pola magnetycznego przy powierzchni jednorodnego zamkniętego obwodu magnetycznego jest równe zero. Oddzielne elementy konstrukcji namagnesowane w polu magnetycznym Ziemi zachowują się jak magnesy sztabkowe. Elementy konstrukcji zamocowane w instalacji mogą być odcinkami zamkniętego obwodu. Pole magnetyczne powstałe w wyniku rozproszenia spowodowanego przez wadę, występującą w materiale, ma podobne własności do pola wytwarzanego przez magnes sztabkowy.

Sondy magnetometrów przesuwane nad powierzchnią namagnesowanych elementów mogą rejestrować oddzielnie składową natężenia pola, zorientowaną w kierunku stycznym do powierzchni H_x i składową natężenia pola rozproszonego skierowaną prostopadle do powierzchni badanego elementu H_p .

Składowe w różny sposób zmieniają się wzdłuż drogi sondy. Składowa prostopadła do powierzchni ma największą wartość naprzeciwko bieguna północnego, a w miarę oddalania się od bieguna północnego maleje do zera w połowie odległości między biegunami, zmienia znak na przeciwny, osiąga ekstremum po stronie wartości ujemnych i zdąża do zera.

1.4. Związek między składową pionową natężenia pola i naprężeniem

W metodzie MPM do oceny stopnia odkształcenia materiału są wykorzystywane rozkłady pionowej składowej natężenia rozproszenia pola magnetycznego H_p wyznaczone blisko powierzchni badanych elementów. W ogólnym przypadku wewnątrz elementu ferromagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ powstaje indukcja $B = \mu H$, gdzie H jest natężeniem pola magnesującego, którym w przypadku

metody MPM jest pole magnetyczne Ziemi. Powstanie rozproszonego pola magnetycznego nad powierzchnią elementu jest zależne od składowej indukcji prostopadłej do powierzchni badanego elementu B_p . Składowa ta powstaje wtedy, gdy na drodze strumienia indukcji wewnątrz elementu znajdzie się obszar materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej μ .

Wartość H_p jest wprost proporcjonalna do wartości pionowej składowej indukcji B_p

$$H_p = l \frac{B_p}{\mu_0} \quad (4)$$

gdzie l jest odległością między biegunami magnesu.

Stała $\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7}$ jest przenikalnością magnetyczną powietrza $\left[\frac{H}{m}\right]$ (przenikalność stali transformatorowej $\mu = 6000 \left[\frac{H}{m}\right]$, żelaza chemicznie czystego około 280 000 $\left[\frac{H}{m}\right]$).

Po dalszych przekształceniach (Deputat 2002) otrzymuje się

$$H_p = \frac{l}{\mu_0 \lambda_{H,T} \Delta \sigma} \quad (5)$$

We wzorze tym $\lambda_{H,T}$ jest czułością zjawiska magnetosprężystego materiału, w stałym polu magnesującym H i w stałej temperaturze T .

Wartość H_p jest wprost proporcjonalna do zmiany naprężenia na odcinku Δz i zależy od czułości zjawiska magnetosprężystego badanego materiału.

Zależność między H_p i σ , albo między H_p i odkształceniem materiału, jest zależna od wielu czynników, w tym, oprócz wymienionych, także od rodzaju odkształcenia (rozciąganie, ściskanie, stany złożone). Przy ilościowej ocenie wyników badań metodą MPM wykorzystuje się specyfikę badanych elementów, warunków ich pracy i warunków badania.

1.5. Magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia

Podstawowym kryterium w diagnostyce lin nowych i eksploatowanych z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu jest określenie stref koncentracji naprężeń (KN) na powierzchni splotek, charakteryzujących się zmianą znaku magnetycznego pola rozproszenia H_p lub linii charakteryzujących się zerową wartością składowej normalnej pola H_p . Z liniami koncentracji naprężeń mogą być związane znaczne odkształcenia plastyczne, wżery korozyjne, starcia i zmęczeniowe pęknięcia drutów, które powodują lokalne zmniejszenie przenikalności magnetycznej. Linia $H_p = 0$ odpowiada przekrojowi części elementu (drutu) z maksymalną odporno-

ścią magnetyczną i opisuje obszar największej niejednorodności struktury metalu oraz maksymalnej koncentracji naprężeń wewnętrznych (OKNW). Drugim wskaźnikiem stanu jest magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia K_{in} , określony jako gradient (intensywność zmiany) składowej pionowej rozproszonego pola magnetycznego na ustalonym odcinku $2l_o$, równy

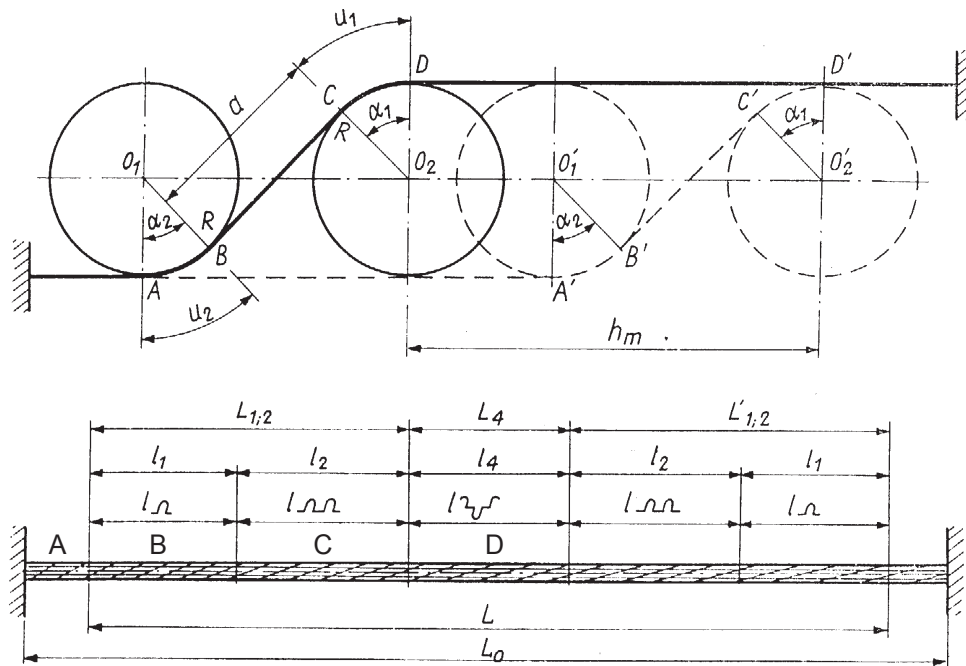
$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p|}{2l_o} = \frac{|H_{p1} - H_{p2}|}{2l_o} \quad (6)$$

Jest to bezwzględna wartość różnicy H_p między dwoma punktami położonymi w równej odległości l_o po przeciwnych stronach KN. Magnetyczny współczynnik koncentracji ma zatem wartość wprost proporcjonalną do bezwzględnej wartości różnicy naprężenia na odcinku $2l_o$.

2. WARUNKI PRACY LIN STALOWYCH

Liny stalowe pracują najczęściej w trudnych warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, w środowisku korozyjnym itp. Z tego też powodu ulegają znacznie szybciej zużyciu od innych elementów maszyn i urządzeń. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi biorących udział w procesach produkcyjnych lub obsługujących urządzenia, a także na ciągłą bezawaryjną pracę. Bardzo ważnym zagadnieniem są więc badania diagnostyczne stanu bezpieczeństwa lin przy wykorzystaniu różnych metod (Hankus 2002). Podczas pracy lin w drutach występują naprężenia rozciągające, zginające, skręcające oraz naciski między liną a dnem rowka koła linowego. Działa więc złożony stan naprężeń cyklicznie zmiennych, powodujący zmęczenie materiału i pękanie drutów. W celu odtworzenia skutków działania obciążeń zmiennych, w warunkach laboratoryjnych są prowadzone badania zmęczeniowe odcinków lin nowych i odłożonych na maszynach zmęczeniowych (Hankus 2000). Podczas tych badań w znacznym stopniu są odwzorowywane warunki, w jakich pracują liny w urządzeniach wyciągowych, dźwigowych itp. Liny podlegają dwustronnemu (dwukierunkowemu) zginaniu, przy sile rozciągającej statycznej lub pulsującej. Maszyna ma mechanizm pokrętny, dzięki któremu badana próbka obraca się dookoła własnej osi. Rozkład przegięć w odcinku badanym w maszynie typu P4-GIG-2 przedstawiono na rysunku 1.

Podczas każdego cyklu (ruch wózka tam i z powrotem) odcinki l_1 (rys. 1) są przeginane jednostronnie jeden raz, odcinki l_2 jednostronnie dwa razy, a odcinek środkowy l_4 jest przeginany dwustronnie dwa razy. Na tym odcinku następuje zerwanie badanej próbki.



Rys. 1. Rozkład przegięć w odcinku badanym w maszynie typu P4-GIG-2
 Fig. 1. Distribution of contraflexures in the tested section in the machine of P4-GIG-2 type

3. WSTĘPNE BADANIA DOŚWIADCZALNE

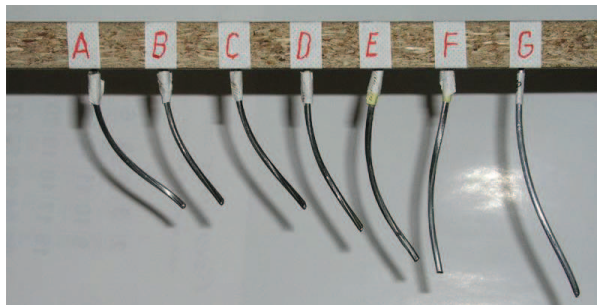
Badania wykonano w celu potwierdzenia, czy zjawisko magnetycznej pamięci metalu występuje w drutach linowych o różnym stopniu ich zmęczenia, a także w splotkach liny. Wykonanie badań było możliwe dzięki życzliwości i pomocy firmy „Resurs” z Warszawy w osobach Panów mgr. inż. Andrzeja Radziszewskiego i mgr. inż. Tomasza Śliwińskiego.

3.1. Badania drutów

Z odcinka liny po zakończeniu badania zmęczeniowego na maszynie typu P4-GIG-2 (rys. 1), wycięto cztery próbki drutów o długości około 100 mm, które uzupełniono trzema próbkami (fot. 1):

- A – drut z miejsca nieprzeżeganego,
- B – drut z miejsca przeżeganego jednostronnie jeden raz,
- C – drut z miejsca przeżeganego jednostronnie dwa razy,
- D – drut z miejsca przeżeganego dwustronnie dwa razy,
- E – drut pęknięty w warunkach ruchowych,
- F – drut z nowej liny,
- G – drut z innej liny nowej po statystycznej próbie rozciągania aż do zerwania.

Próbki drutów po wycięciu z liny nie były prostowane, aby nie powodować zmiany naprężeń wewnętrznych, dlatego zachowały kształt przestrzennej linii śrubowej.

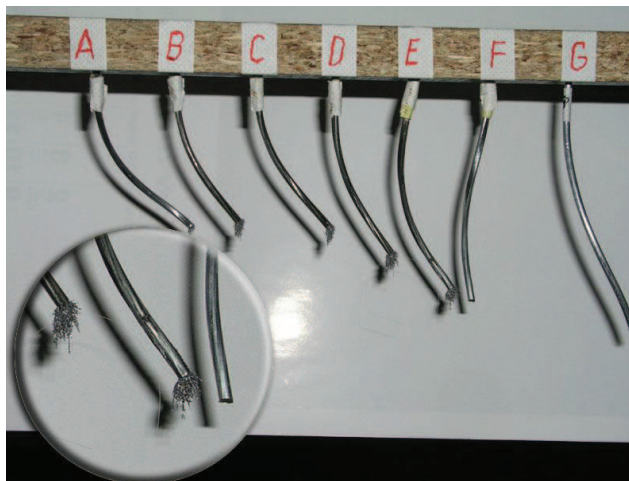


Fot. 1. Próbki drutów przygotowane do badań

Photo 1. Wire samples prepared for tests

Próbki drutów od A do E pochodzą z liny o powierzchniowym styku drutów typu DYFORM, która została zastosowana w kopalni „Rozbark”. Podczas pracy w drutach liny występowały naprężenia rozciągające, zginające, skręcające oraz naciski między liną a dnem rowka koła linowego. Działał więc złożony stan naprężeń cyklicznie zmiennych, powodujący zmęczenie materiału i pękanie drutów. Odcinek liny odłożonej badany w maszynie zmęczeniowej zerwał się po wykonaniu 60 275 cykli zmian obciążeń (lina nowa wytrzymała 82 430 cykli), przy sumarycznej liczbie 112 pęknięć drutów. Wynika z powyższego, że zmniejszenie trwałości liny po zakończeniu eksploatacji w odniesieniu do liny nowej wynosiło około 27%.

Do kolejnych próbek drutów zbliżano następnie pojemnik z opiłkami metalu i stwierdzono z zaskoczeniem, że opiłki są przyciągane do drutów tak, jak do magnesu trwałego. Uwidocznione zostało to na fotografii 2.



Fot. 2. Próbki drutów przyciągające opiłki żelaza

Photo 2. Wire samples attracting iron filings

Tym samym zostało ujawnione po raz pierwszy (lipiec 2003 roku) zjawisko namagnesowania się drutów liny obciążanej w warunkach eksploatacji i w czasie badania zmęczeniowego. Jedynie koniec próbki F nie został oklejony opiłkami, co świadczy o znacznie słabszym jej namagnesowaniu niż pozostałych próbek. Nasuwało się pytanie, dlaczego drut z nowej liny zachował się zdecydowanie odmiennie niż druty z lin pracujących. Odpowiedzią może być potwierdzenie hipotezy o magnetyzmie szczątkowym uformowanym w czasie produkcji i schłodzeniu w magnetycznym polu Ziemi. Charakteryzuje on tylko strukturalną i technologiczną dziedziczność drutu powstałą w procesie jego wykonania.

Zauważono także różne ilości opiłek na poszczególnych próbkach, świadczące o różnym stopniu ich namagnesowania. Najmniej opiłek było na próbce A, a najwięcej na próbce D. Postanowiono kontynuować to doświadczenie, zamieniając opiłki na gwoździe małych rozmiarów. Stwierdzono, że poszczególne próbki w sposób trwały przyciągały gwoździe o długościach:

- A – 10 mm,
- B – 17,5 mm,
- C – 17,5 mm,
- D – $2 \times 17,5$ mm,
- E – 17,5 mm,
- F – 0 mm.

Próbka D przyciągała również w sposób trwały spinacz biurowy.

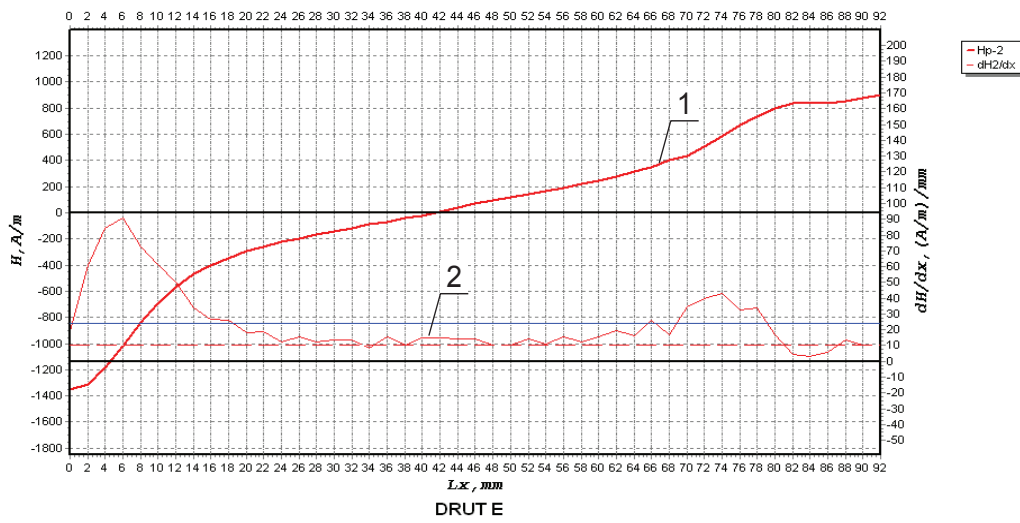
Próbki drutów poddano badaniom; dla każdej z nich określono przebiegi zmian składowej pionowej magnetycznego pola rozproszenia H_p i magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} (magnetogramy). Przebiegi te były zróżnicowane. Uwzględniając, że średnica drutów wynosiła 2,70 mm, na podstawie danych z wykresów i zależności (6), obliczono przybliżone wartości magnetycznego współczynnika intensywności (koncentracji) naprężenia K_{in} . Uzyskane wyniki zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Przybliżone wartości magnetycznego współczynnika koncentracji naprężenia badanych próbek drutów

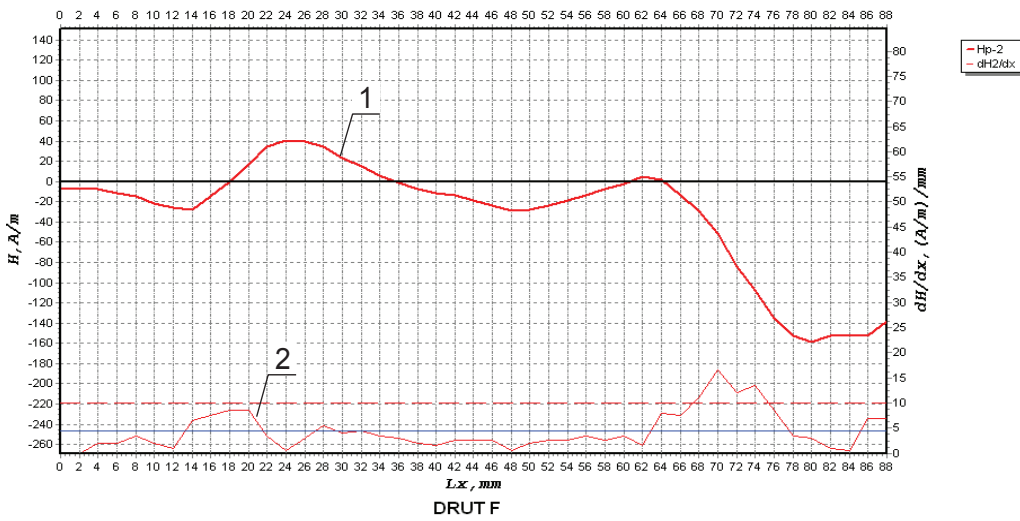
Oznaczenie próbki	Współczynnik koncentracji naprężeń K_{in} (A/m)/mm
A	13,70
B	32
C	51
D	52
E	16
F	8,75
G	13,75

Przybliżone wartości magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} dla badanych drutów zawierają się w granicach od około 8 do 52 (A/m)/mm.

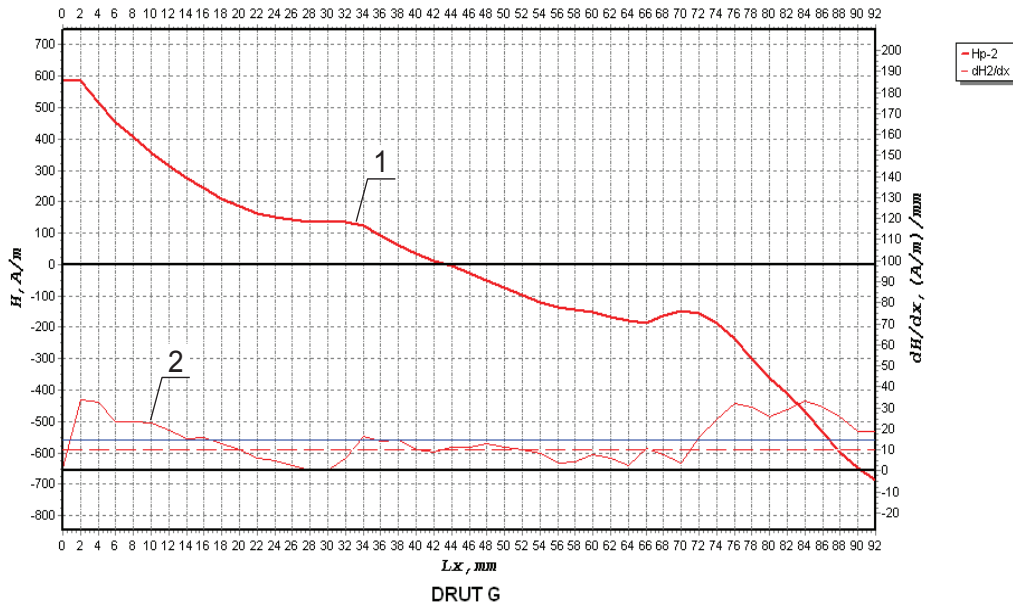
Przykładowe przebiegi zależności $H_p = f(x)$ i $K_{in} = \varphi(x)$ uzyskane dla próbek E, F, G przedstawiono na rysunkach 2–4.



Rys. 2. Przebieg zmian H_p (1) i K_{in} (2) uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu E
 Fig. 2. Course of H_p (1) and K_{in} (2) changes obtained during probe displacement along the axis of wire sample E



Rys. 3. Przebieg zmian H_p (1) i K_{in} (2) uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu F
 Fig. 3. Course of H_p (1) and K_{in} (2) changes obtained during probe displacement along the axis of wire sample F



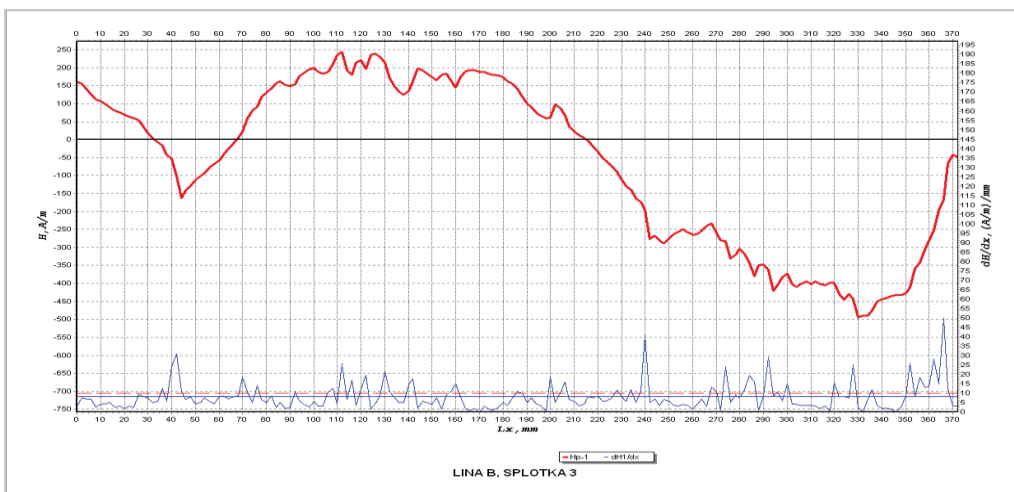
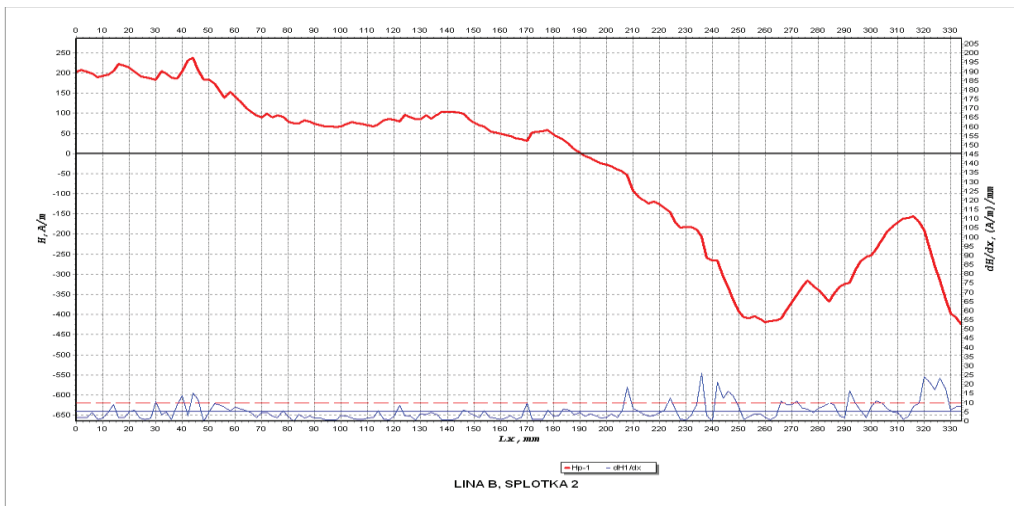
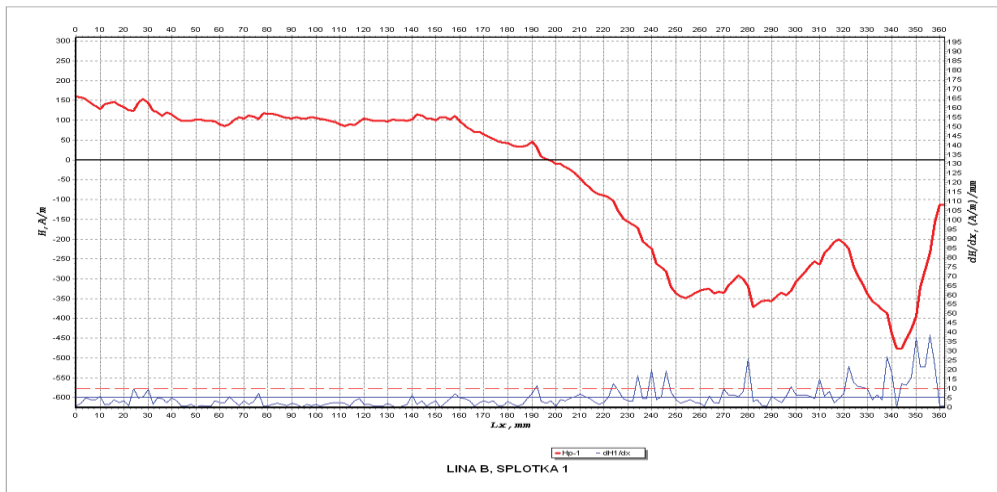
Rys. 4. Przebieg zmian H_p (1) i K_{in} (2) uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu G
Fig. 4. Course of H_p (1) and K_{in} (2) changes obtained during probe displacement along the axis of wire sample G

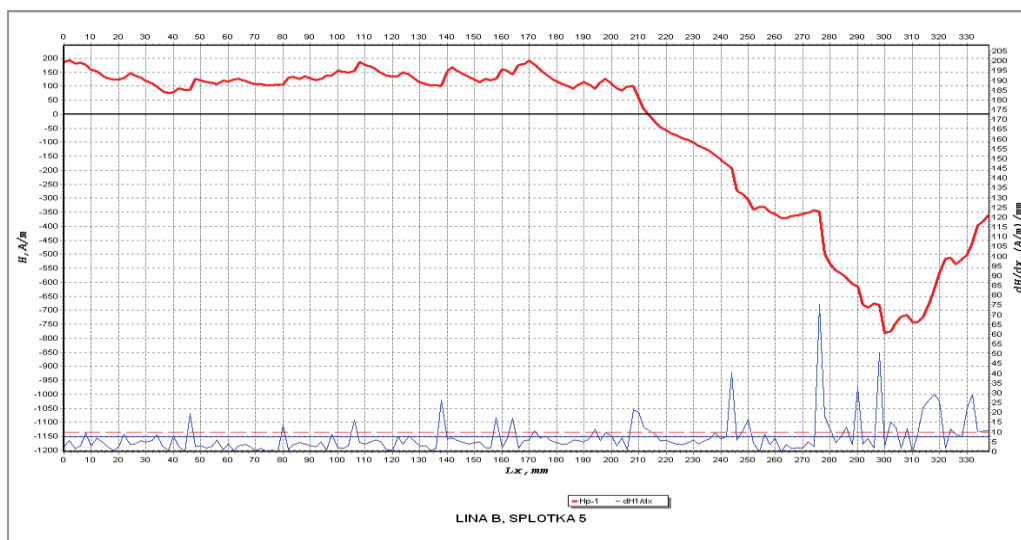
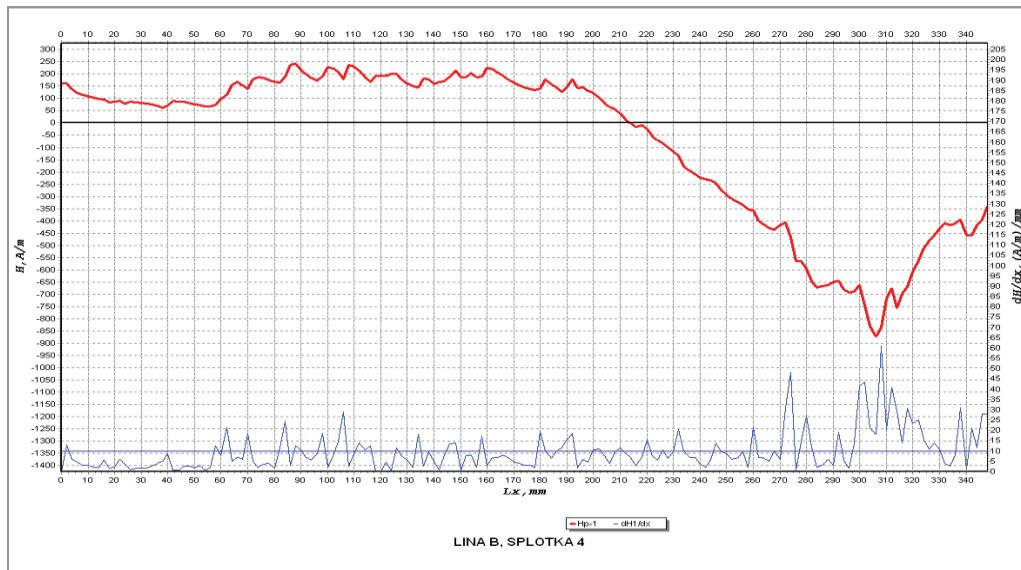
Najniższą wartość magnetycznego współczynnika koncentracji naprężenia wykazuje próbka F reprezentująca drut z liny w stanie nowym.

Wykonanie drutu składało się z wielu operacji technologicznych (Hankus i inni 2004) takich, jak obróbka termiczna (patentowanie) oraz kilku operacji przeróbki plastycznej na zimno w postaci ciągnięcia. Ponadto, drut był dwa razy zwijany, pierwszy raz w czasie skręcania splotki, a drugi raz podczas skręcania liny. Charakteryzuje on tylko strukturalną i technologiczną dziedziczność w postaci magnetyzmu szczątkowego. Nieco wyższe i jednakowe wartości K_{in} , uzyskano dla próbek A i G, które podlegały tylko wzdłużnemu rozciąganiu.

3.2. Badania splotek liny

W drugim etapie badaniom poddano dwie próbki liny okrągłosplotkowej o średnicy 16 mm konstrukcji 6×7+FN przeciwzitej. Lina poprzednio była również cyklicznie przeginana i rozciągana w maszynie zmęczeniowej aż do zerwania. Badanie metodą MPM, w firmie Resurs, polegało na skanowaniu kolejnych sześciu splotek. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowo magnetogramy obrazujące przebiegi zmian zależności $H_p = f(x)$ i $K_{in} = \varphi(x)$ uzyskane dla oddzielnych splotek liny B.





Rys. 5. Przebiegi zmian H_p i K_{in} uzyskane podczas przesuwania sondy wzdłuż oddzielnych sześciu splotek liny B
Fig. 5. Courses of H_p and K_{in} changes obtained during probe displacement along separate six rope strands of rope B

W przypadku trzech splotek (4, 5 i 6) przebiegi zmian $H_p = f(x)$ były bardzo podobne. Również podobieństwo zmian H_p wystąpiło dla splotek 1 i 2, w przeciwieństwie do splotki 3, gdzie w trzech punktach $H_p = 0$ i wystąpiła zmiana znaku.

Biorąc pod uwagę, że średnica splotek wynosiła 5,33 mm, na podstawie danych pomiarowych i zależności (6) obliczono również przybliżone wartości magnetycznego współczynnika intensywności (koncentracji) naprężenia. W tabelicy 2 zestawiono uzyskane wyniki.

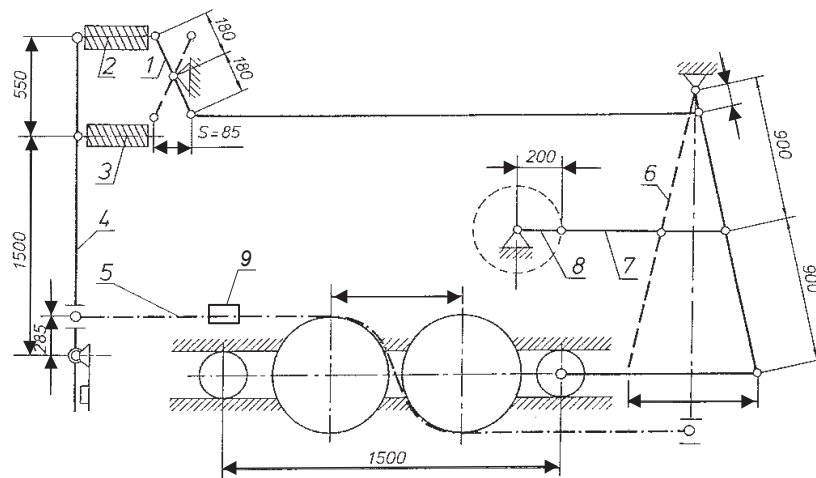
Tablica 2. Przybliżone wartości magnetycznego współczynnika koncentracji naprężenia badanych próbek lin

Oznaczenie splotki	Magnetyczny współczynnik koncentracji naprężeń K_{in} (A/m)/mm	
	lina A	lina B
1	4,221	5,628
2	6,566	5,159
3	4,503	4,690
4	7,317	5,628
5	3,471	9,380
6	3,752	4,690

Zróżnicowane przebiegi zależności $H_p = f(x)$ i $K_{in} = \varphi(x)$ i rozrzut wartości magnetycznego współczynnika koncentracji naprężenia obrazuje prawdopodobnie nierównomierny rozkład obciążeń splotek podczas badania zmęczeniowego lin, a tym samym zróżnicowany stopień ich zmęczenia. Średnie wartości K_{in} dla splotek liny A i B różniły się nieznacznie i wynosiły odpowiednio 4,97 i 5,55.

4. BADANIA ZMĘCZENIOWE LINY

Wyniki, jakie uzyskano w badaniach wstępnych, omówionych w rozdziale 3, były podstawą do odpowiednio zaprogramowanych dalszych badań. Wykonano połączone badania zmęczeniowe liny w maszynie typu P5-GIG-3 (rys. 6) oraz badania z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu. Zastosowano do nich specjalną głowicę wykonaną w GIG i aparaturę rejestrująco-analizującą wypożyczoną z firmy Resurs.

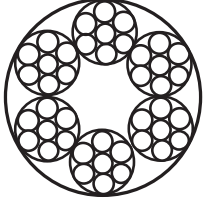


Rys. 6. Schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej typu P4-GIG-3 do badania lin o średnicy 10–20 mm: 1 – wahacz górny, 2 – sprężyna pulsacyjna, 3 – sprężyna napinająca, 4 – wahacz tylny, 5 – lina, 6 – wahacz przedni, 7 – łącznik, 8 – korba, 9 – głowica pomiarowa

Fig. 6. Kinematic scheme of fatigue-testing machine of P4-GIG-3 type for testing ropes of diameter 10–20 mm: 1 – upper rocker, 2 – pulsatory spring, 3 – pull spring, 4 – rear rocker, 5 – rope, 6 – frontal rocker, 7 – connector, 8 – crank, 9 – measuring head

Przedmiotem badań była próbka liny, której przekrój poprzeczny oraz dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe podano w tablicy 3.

Tablica 3. Przekrój poprzeczny oraz dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe badanej liny

	Parametr	Wartość parametru
	Średnica nominalna d , mm	16
Przekrój nośny F , mm ²	95,332	
Masa 1 m q , kg	0,865	
Druty o wytrzymałości R_m , MPa	1570	
Konstrukcja	16 NAT + NF, prawa przeciwwzłata Z/S	
Nominalna siła zrywająca linę P_n , kN	149,67	

Lina była przeginana dwustronnie przy cyklicznie zmiennych obciążeniach rozciągających i obrocie liny wokół własnej osi. Poniżej podano warunki badań.

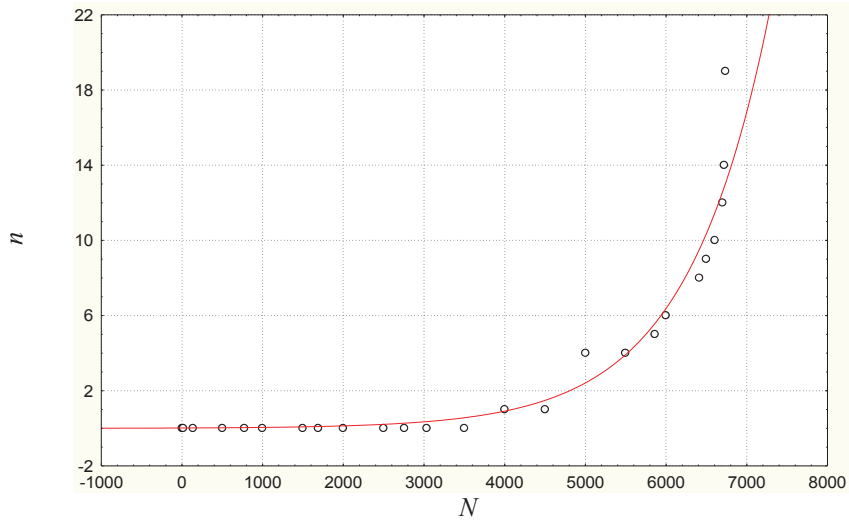
Warunki badań

Siła statyczna	$P_s = 29,81$ kN
Współczynnik pewności	$n = 5,00$
Średnica koła zginającego	$D = 510$ mm
Stosunek	$D/d = 31,87$
Nacisk na dno rowka koła linowego	$p = 7,306$ MPa
Długość odcinka liny	$L = 2780$ mm
Długość zginanego odcinka liny	$L_{zg} = 1600$ mm

Przy ustalonych liczbach cykli przerywano badanie zmęczeniowe i za pomocą odpowiednio skonstruowanej głowicy mocowanej na linie (rys. 6), prowadzono rejestrację zmian rozproszonego pola magnetycznego wzdłuż jednej splotki.

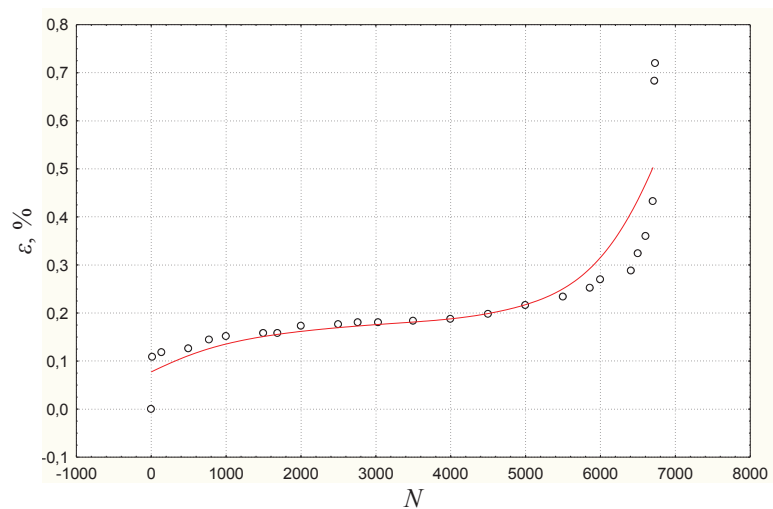
4.1. Mechaniczne wskaźniki postępującego zmęczenia – zużycia

Wieloletnie badania zmęczeniowe (Hankus 2000) wykazały, że głównymi mechanicznymi wskaźnikami postępującego zmęczenia jest narastanie pęknięć drutów oraz wydłużanie się badanej próbki aż do zerwania liny. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi krzywych narastania liczby pęknięć drutów i wydłużania się liny w funkcji liczby cykli zmęczeniowych. Przebiegi $n = f(N)$ i $\epsilon = \varphi(N)$ są typowe, jakie uzyskuje się w laboratoryjnych badaniach zmęczeniowych (Hankus 2000). Zerwanie liny nastąpiło przy liczbie cykli zmęczeniowych $N = 6735$.



Rys. 7. Wykres narastania liczby pęknięć drutów liny 16 NAT 6x7 + NF badanej w maszynie typu P4-GIG-3: N – liczba cykli, n – liczba pęknięć drutów

Fig. 7. Diagram of accretion of the number of wire cracks of the rope 16 NAT 6x7 + NF tested in the machine of P4-GIG-3 type: N – number of cycles, n – number of wire cracks



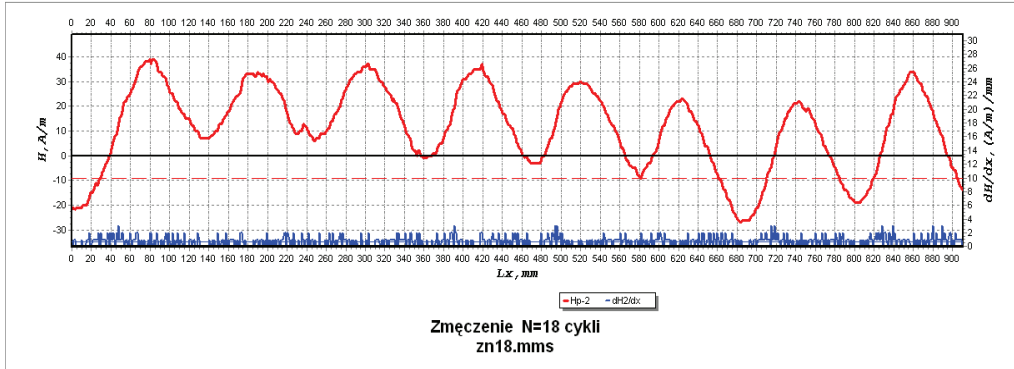
Rys. 8. Punkty odwzorowujące wyniki badań oraz przebiegi krzywej empirycznej wydłużania się liny 16 NAT 6x7+ NF badanej w maszynie typu P4-GIG-3: N – liczba cykli, ε – wydłużenie

Fig. 8. Points reproducing the testing results and courses of the empirical curve of rope elongation 16 NAT 6x7+ NF tested in the machine of P4-GIG-3 type: N – number of cycles, ε – elongation

4.2. Magnetyczne wskaźniki postępującego zmęczenia – zużycia (umocnienia) lin

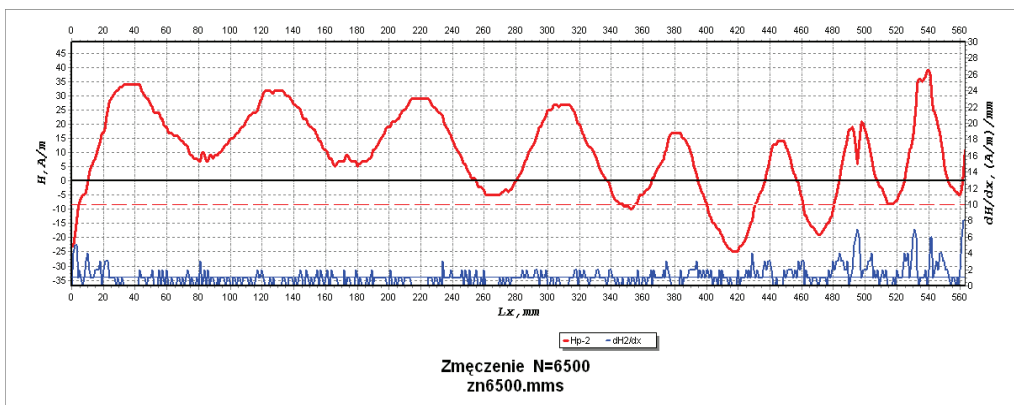
Pomiary postępującego zmęczenia z wykorzystaniem efektu magnetycznej pamięci metalu wykonywano za pomocą specjalnej głowicy (rys. 6), którą przesuwno nad powierzchnią splotek ruchem śrubowym o skoku równym skokowi liny. Pomiary zmian

pionowej składowej pola magnetycznego H_p i magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} prowadzono sukcesywnie przy różnych liczbach cykli zmęczenia. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykładowo przebiegi zależności $H_p = f(x)$ i $K_{in} = \varphi(x)$ uzyskane dla badanej liny po wykonaniu 18 i 6500 cykli zmęczenia.



Rys. 9. Przebiegi zmian H_p i K_{in} uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki po 18 cyklach zmęczenia liny

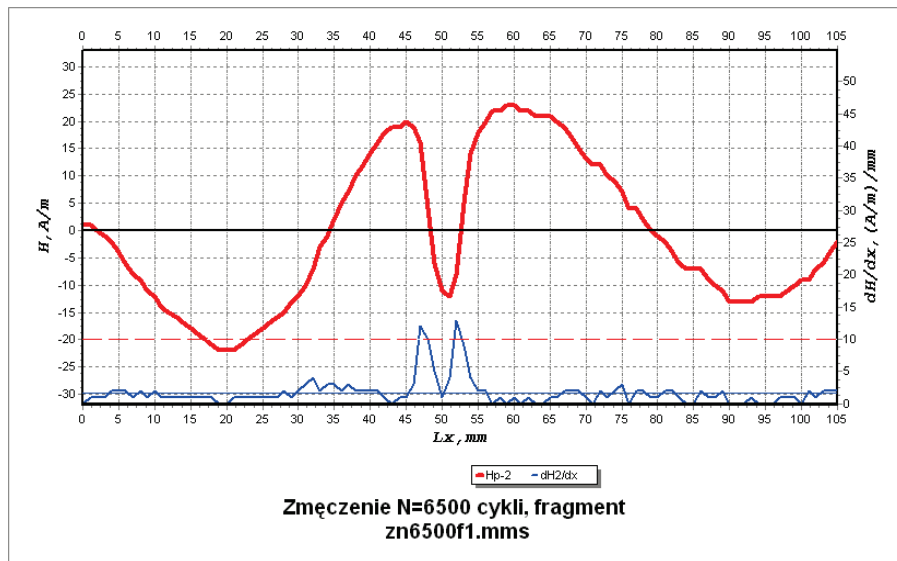
Fig. 9. Courses of H_p and K_{in} changes obtained during probe displacement using the screw motion along the rope strand axis after 18 rope fatigue cycles



Rys. 10. Przebiegi zmian H_p i K_{in} uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki po 6500 cyklach zmęczenia liny

Fig. 10. Courses of H_p and K_{in} changes obtained during probe displacement using the screw motion along the rope strand axis after 6500 rope fatigue cycles

Z magnetogramów widać zmienne przebiegi H_p i K_{in} dla liny prawie nowej i liny tuż przed zerwaniem. Zauważa się znaczny wzrost wartości magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} w obszarze, gdzie odcinek liny był przeginany dwustronnie przy cyklicznie zmiennych obciążeniach rozciągających. W tym miejscu było najwięcej pękniętych drutów i po dalszych 235 cyklach nastąpiło zerwanie dwóch splotek liny.



Rys. 11. Przebiegi zmian H_p i K_{in} uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki nad pękniętymi drutami

Fig. 11. Courses of H_p and K_{in} changes obtained during probe displacement using the screw motion along the rope strand axis over cracked wires

Wyraźne zmiany pionowej składowej pola magnetycznego H_p i magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} w miejscu napotkanej przerwy (rozd. 1.3 pole magnetyczne nad miejscem osłabienia), wskazuje na dużą czułość metody MPM (rys. 11).

5. ILOŚCIOWA OCENA STOPNIA ZMĘCZENIA DRUTÓW I LINY Z WYKORZYSTANIEM METODY MPM

Dalszym etapem prac było sprawdzenie czy opracowana przez A.A. Dubowa i jego zespół metodyka określania stopnia zużycia pracujących elementów i urządzeń z wykorzystaniem MPM może być również przydatna w przypadku drutów i lin stalowych. Autorzy (Dubow 2003; Dubow A.A., Dubow A.L.A., Kołokolnikow 2004) na podstawie wyników badań doświadczalnych prowadzonych w warunkach rozciągania i cyklicznego obciążania próbek z różnych gatunków stali (węglowych i perlitycznych niskostopowych) opracowali metodykę cyfrowej analizy wyników pomiarów obejmującą:

- przegląd uzyskanych magnetogramów na ekranie monitora (fot. 1, rys. 2–4, rys. 9–10),
- wyszukanie obszarów koncentracji naprężeń KN na podstawie największych zmian H_p i K_{in} na każdym kanale pomiarowym,
- zestawienie tablic maksymalnych wartości K_{in}^{\max} dla każdego obszaru KN ,
- obliczanie średniej wartości $K_{in}^{st} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{in}^i$ (7) ze wszystkich obszarów KN gdzie: n – liczba obszarów KN ,

- określenie magnetycznego wskaźnika zużycia dla wszystkich obszarów koncentracji naprężeń (OKN) według wzoru

$$\frac{K_{in}^{max}}{K_{in}^{sr}} = m \quad (8)$$

Jeżeli uzyskana wartość m jest większa od granicznej wartości m_{gr} , to można stwierdzić, że badany element jest tuż przed uszkodzeniem w analizowanym OKN. Dla pozostałych odcinków z OKN, dla których wartość $m \leq m_{gr}$ dokonuje się obliczeń końcowego okresu pracy według wyżej opisanej metodyki.

Według autorów metodyki wartości m mogą zmieniać się w zależności od strukturalno-mechanicznego stanu metalu po różnych obróbkach technologicznych lub wpływu różnych czynników eksploatacyjnych. Dla badanych materiałów w zależności od ich stanu strukturalno-mechanicznego wartości parametru m zawierały się w przedziale od 2 do 4.

Dla konkretnych przypadków należy ustalić graniczne wartości parametrów m_{gr} , przy których możliwa jest jeszcze bezpieczna eksploatacja elementów konstrukcji i maszyn. Eksperymenty, laboratoryjne i przemysłowe, przeprowadzone przez autorów metodyki, wykazały, że dla badanych materiałów graniczne dopuszczalne wartości m_{gr} z uwzględnieniem zapasu nie powinny być mniejsze niż 2,0. W praktyce, w zależności od warunków obciążenia, charakteru stanu naprężeń i deformacji, temperatury, ciśnienia medium roboczego, prędkości i cykliczności obciążenia, wpływu otaczającego środowiska i innych czynników dopuszczalne graniczne wartości m_{gr} w OKN mogą różnić się od wartości otrzymanych w warunkach laboratoryjnych. Korekty wartości m_{gr} dokonuje się na podstawie nagromadzonych w banku danych z wyników kontroli rzeczywistych wyrobów znajdujących się w eksploatacji.

5.1. Analiza stopnia zmęczenia drutów

Wykorzystując opisaną powyżej metodykę przeprowadzono analizę wyników badań drutów omówionych częściowo w punkcie 3.1, z zastosowaniem programów komputerowych MPM-System i MPM-Resurs. Wyniki analizy zestawiono w tablicy 4.

Druty linowe wykonuje się ze stali węglowej, przy czym próbki A, B, C, D, E i F miały wytrzymałość na rozciąganie 1770 MPa, a próbka G wytrzymałość 1670 MPa. Druty linowe w procesie produkcji poddaje się wielu operacjom technologicznym, w tym również przeróbce plastycznej na zimno, tzw. ciągnięciu. Powoduje to, że na wykresie rozciągania nie ma wyraźnie zaznaczonej granicy plastyczności R_e (Hankus 2000). Wobec tego wyznacza się umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$ odpowiadającą naprężeniu, przy którym próbka doznaje 0,2% względnego wydłużenia trwałego. Z tablicy 4 wynika, że w przypadku próbek drutów A, B, C, D i E wartości magnetycznego wskaźnika podatności na odkształcenia m przewyższają wartość graniczną 2,0 (Dubow 2003; Dubow A.A., Dubow A.L.A., Kołokolnikow 2004). Jest to uzasadnione, gdyż próbki te pobrano z liny po zakończonym badaniu zmęczeniowym.

Znacznie mniejsze wartości $m < 2$ uzyskano natomiast dla próbek F (pobrana z liny nowej) i G (pobrana z liny nowej po próbie rozciągania aż do zerwania).

Tablica 4. Wyniki analizy MPM drutów

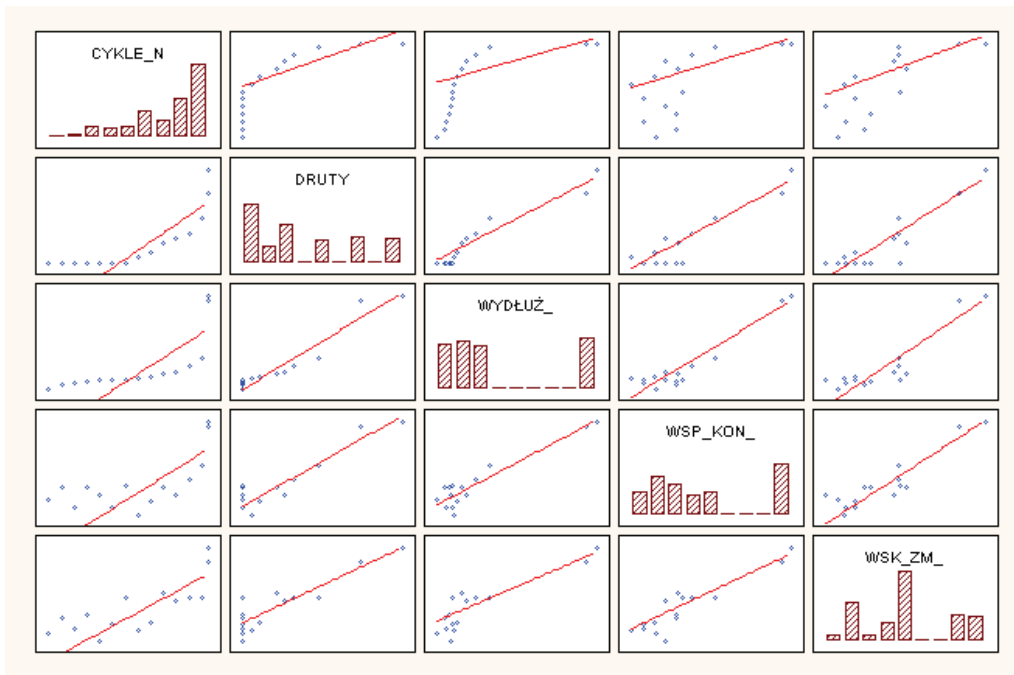
Oznaczenie próbki	K_{in}^{sr} (A/m)/mm	K_{in}^{maxr} (A/m)/mm	m
A	18,361	69,000	3,758 > 2,0
B	38,383	90,143	2,349 > 2,0
C	33,910	111,357	3,284 > 2,0
D	58,681	368,000	6,271 > 2,0
E	1,900	4,000	2,105 > 2,0
F	1,901	0,500	0,263 < 2,0
G	1,902	1,000	0,526 < 2,0

5.2. Analiza własności liny

Uzyskane z pomiarów magnetogramy poddano ilościowej analizie, zgodnie z punktem 4.3. Przeprowadzono również analizę procesów narastania pęknięć drutów i wydłużania się liny. W tablicy 5 zestawiono zmianę klasycznych (mechanicznych) i magnetycznych wskaźników postępującego zmęczenia w funkcji liczby cykli zmęczeniowych. Widzimy, że wszystkie wartości magnetycznego wskaźnika podatności na odkształcenia m przewyższają wartość graniczną 2,0 proponowaną dla elementów litych stalowych (Dubow 2003). Wyniki pomiarów charakteryzuje pewien rozrzut, dlatego też w celu wykrycia wzajemnych współzależności, dalszą analizę zbiorów prowadzono metodami statystyki i rachunku prawdopodobieństwa (metody probabilistyczne). Rysunek 12 przedstawia macierzowy wykres rozrzutu dla wybranej piątki zmiennych (analizowanych parametrów diagnostycznych liny). Wizualna ocena wykresów rozrzutu umożliwia wstępne określenie siły i rodzaju zależności, i ułatwia prowadzenie dalszej analizy.

Tablica 5. Analiza wyników badań własności lin

Liczba cykli N	Liczba pęknięć drutów n	Wydłużenie względne liny ϵ , %	Współczynnik koncentracji naprężeń K_{in}^{maxr} (A/m)/mm	Wskaźnik zmęczenia m
18	0	0,108	3,000	4,071
500	0	0,126	12,000	13,309
1000	0	0,151	8,000	5,435
1500	0	0,158	5,000	4,531
2000	0	0,173	8,000	5,702
2500	0	0,176	7,000	3,564
3000	0	0,180	5,000	4,976
3500	0	0,183	11,00	11,346
4000	1	0,187	4,000	4,440
4500	2	0,198	6,000	5,013
5000	4	0,216	12,00	13,309
5500	5	0,234	7,000	6,893
6000	6	0,270	5,000	4,908
6500	9	0,323	8,000	7,072
6723	14	0,683	22,00	12,778
6735	19	0,719	22,00	11,297



Rys. 12. Macierzowy wykres rozrzutu zmian pięciu parametrów diagnostycznych liny

Fig. 12. Matrix dispersion diagram of changes of five diagnostic rope parameters

5.2.1. Analiza korelacyjna

Siłę współzależności (powiązania liniowego) między dwoma zmiennymi X , Y określa współczynnik korelacji liniowej Pearsona r_{xy} . W tabelicy 6 zestawiono przykładowe wartości r_{xy} dla pięciu zmiennych badanych parametrów liny.

Tabela 6. Korelacja między parametrami badanej liny 1

Parametr	Liczba cykli N	Liczba pęknięć drutów n	Wydlużenie ϵ	Współczynnik koncentracji K_{in}	Wskaźnik zmęczenia m
Liczba cykli N	1,00	0,88	0,94	0,71	0,79
Liczba pęknięć drutów n	0,88	1,00	0,96	0,81	0,80
Wydlużenie ϵ	0,94	0,96	1,00	0,85	0,81
Współczynnik koncentracji K_{in}	0,71	0,81	0,85	1,00	0,82
Wskaźnik zmęczenia m	0,79	0,80	0,81	0,82	1,00

Z danych zawartych w tabelicy wynika, że wszystkie współczynniki korelacji są istotne przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$. Uwzględniając przyjmowaną w analizie statystycznej skalę korelacji, można stwierdzić, że między wszystkimi zmiennymi istnieje duża współzależność.

Między współczynnikiem koncentracji naprężeń K_{in} i wskaźnikiem zmęczenia m a liczbą cykli zmian obciążeń N , liczbą pęknięć drutów n i wydłużeniem ϵ , istnieje wysoka dodatnia korelacja ($r_{xy} > 0,70$). Oznacza to zależność znaczną.

5.2.2. Analiza regresyjna

Analiza regresyjna jest metodą umożliwiającą określenie analitycznego związku między zmienną zależną, będącą wynikiem badanego zjawiska a innymi zmiennymi, które mają istotny wpływ na przebieg tego zjawiska. Związek taki zwany jest funkcją (modelem regresji). Z tablicy 6 wynika, że między wyznaczonymi wartościami magnetycznego wskaźnika zużycia (umocnienia) m a liczbą cykli zmęczeniowych N , liczbą pęknięć drutów n i względnym wydłużeniem próbki liny ϵ istnieje wysoka współzależność, a współczynniki korelacji liniowej są istotne, przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$ ($r_{xy} > 0,70$). Oznacza to, że między rozproszone wyniki pomiarów najlepiej wpisują się proste regresji o równaniach

$$m(N, n, \epsilon) = y = a_i + b_i x \quad (9)$$

gdzie:

m – magnetyczny wskaźnik zużycia liny,
 a_i, b_i – parametry strukturalne modeli.

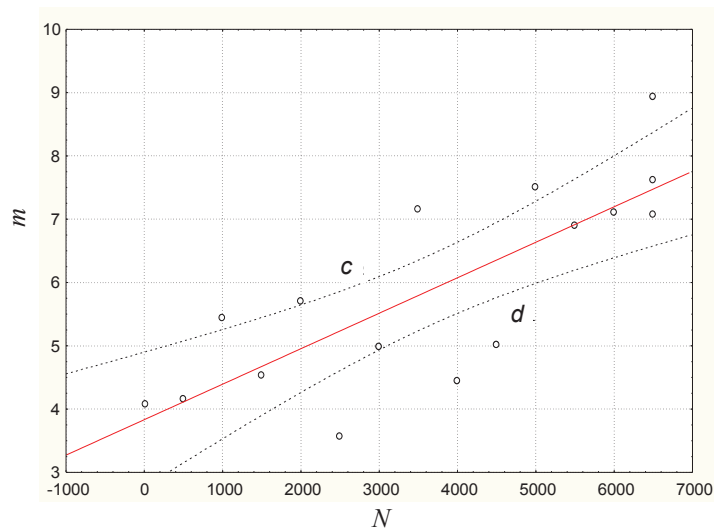
W wyniku obliczeń dla analizowanej liny uzyskano zależności:

$$n(N) = 3,8336 + 0,00056 N \quad (10)$$

$$m(n) = 4,9016 + 0,3421 n \quad (11)$$

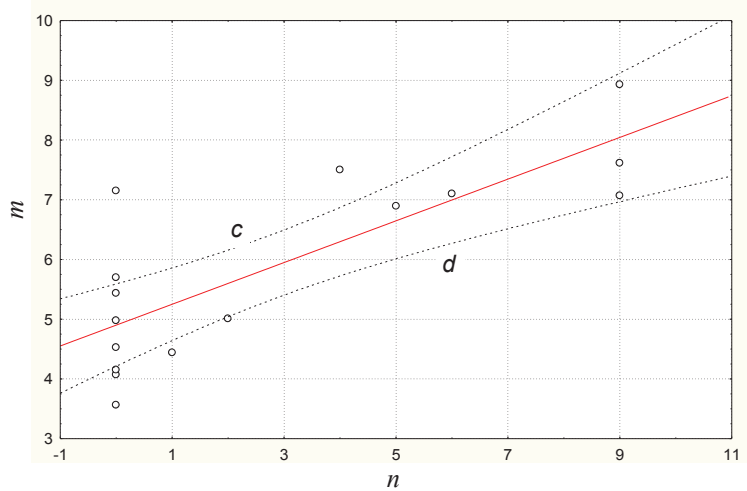
$$m(\epsilon) = 1,9811 + 18,757 \epsilon \quad (12)$$

Na rysunkach 13–15 przedstawiono wartości magnetycznego wskaźnika m , przebiegi prostych regresji oraz przedziały ufności (linie c i d) wyznaczone przy poziomie ufności $P = 95\%$.

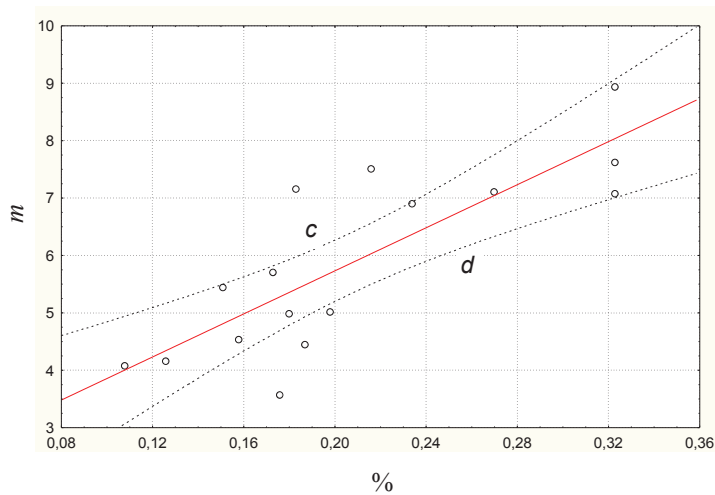


Rys. 13. Magnetyczny wskaźnik zużycia $m = \psi(N)$ liny 6x7 + FN; linie c, d – granice przedziału ufności

Fig. 13. Magnetic wear index $m = \psi(N)$ of rope 6x7 + FN; lines c, d – boundaries of confidence interval



Rys. 14. Magnetyczny wskaźnik zużycia $m = \psi(n)$ liny 6x7 + FN; linie c, d – granice przedziału ufności
 Fig. 14. Magnetic wear index $m = \psi(n)$ of rope 6x7 + FN; lines c, d – boundaries of confidence interval



Rys. 15. Magnetyczny wskaźnik zużycia $m = \psi(\epsilon)$ liny 6x7 + FN; linie c, d – granice przedziału ufności
 Fig. 15. Magnetic wear index $m = \psi(\epsilon)$ of rope 6x7 + FN; lines c, d – boundaries of confidence interval

5.3. Graniczna wartość magnetycznego wskaźnika zużycia

Wykorzystując otrzymane modele regresyjne zmiany magnetycznego wskaźnika zużycia m , zależne od liczby cykli zmęczeniowych N , liczby pęknięć drutów n i względnego wydłużenia próbki liny ϵ , można wyznaczyć przybliżone graniczne wartości m_{gr} na podstawie dopuszczalnych granicznych wartości klasycznych wskaźników zużycia. Dla lin przeciwzwitych konstrukcji 6x7 + FN dopuszczalne, ze względów bezpieczeństwa, liczby pęknięć drutów wynoszą:

- 1) na odcinku o długości $6 \times d$ – dwa pęknięcia,
- 2) na odcinku o długości $30 \times d$ – 4 pęknięcia (d – średnica liny).

Dla badanej liny wcześniej wystąpiło kryterium drugie, przy liczbie cykli $N_{gr} = 5000$, n_{gr} wynosiło 4. Z wykresu wydłużania wynika, że ponowne znaczne wydłużenie liny wystąpiło po przekroczeniu $\epsilon_{gr} = 0,23\%$. Podstawiając powyższe wartości do (10), (11) i (12) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} m(N) &= 6,634 \\ m(n) &= 6,27 \\ m(\epsilon) &= 6,295 \end{aligned} \tag{13}$$

Są to wartości mało różniące się. Można przyjąć, że dla badanej liny przeciwzwiązanej konstrukcji $6 \times 7 + FN$ $m_{gr} = 6$. Jest to wartość większa od uzyskanych dla elementów litych stalowych (Dubow 2003). Lina ma budowę złożoną. Elementami składowymi są druty, splotki, organiczny rdzeń oraz smary. Proces makroumocnienia przebiega odmiennie niż w jednorodnych cięgnach lub prętach. Zagadnienia te wymagają dalszych badań lin różnych konstrukcji i przy różnych warunkach obciążeń. Otrzymane wstępne wyniki potwierdzają, że wartość magnetycznego wskaźnika m zależy od przebiegu procesu postępującego zmęczenia. W miarę wzrostu liczby cykli pracy, liczby pęknięć drutów i narastającego wydłużenia zmniejsza się przekrój liny, co powoduje wzrost naprężeń.

UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Magnetyczna pamięć metalu MPM jest to nieodwracalna zmiana stanu namagnesowania drutów stalowych, splotek i całej liny. Początkowa MPM nowej liny przejawia się w postaci magnetyzmu szczytkowego, „uformowanego” po wykonaniu drutów, splotek i skręceniu ich w linę w magnetycznym polu Ziemi. Charakteryzuje ona strukturalną i technologiczną dziedziczność wyrobu, który był poddany różnej wielooperacyjnej obróbce. Pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń roboczych, przewyższających średni poziom naprężeń wewnętrznych, druty i cała lina poddawane są dalszemu „samonamagnesowaniu” w słabym magnetycznym polu Ziemi.

Metoda oceny stanu naprężenia i odkształcenia, której podstawę stanowi efekt magnetycznej pamięci metalu MPM ma wiele zalet. Nie wymaga czyszczenia i sztucznego magnesowania badanych elementów, co znacznie ułatwia prowadzenie badań diagnostycznych. Metoda znana jest od dwudziestu lat. Jej twórcą i propagatorem jest A.A. Dubow, który opublikował wiele prac, uzyskał wiele patentów i przyczynił się do wdrożenia metody do badań różnych elementów nośnych i konstrukcji.

Badania drutów i splotek wykonane metodą magnetycznej pamięci metalu MPM pozwoliły na określenie przebiegu zmian składowej pionowej magnetycznego pola rozproszenia H_p i magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń K_{in} . Wyniki te pozwalają ocenić zróżnicowany stopień zmęczenia tych elementów.

Zastosowanie metody MPM do badań diagnostycznych lin stalowych wymaga opracowania odpowiednich głowic pomiarowych i wykorzystania specjalistycznej małowabarytowej aparatury oraz oprogramowania komputerowego.

Przeprowadzone w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych GIG połączone badania zmęczeniowe liny oraz badania z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu dostarczyły dalszych ważnych wniosków. Między klasycznymi (mechanicznymi) i magnetycznymi wskaźnikami postępującego zmęczenia istnieje duża współzależność. Współczynniki korelacji wszystkich zmiennych są istotne przy poziomie istotności $\alpha < 0,05$.

Między magnetycznym wskaźnikiem zmęczenia (zużycia) m a liczbą cykli zmęczeniowych N , liczbą pęknięć drutów n i wydłużeniem ϵ istnieje znaczna zależność regresyjna. Opracowane modele regresyjne pozwoliły na określenie dla badanej liny przybliżonej wartości granicznej magnetycznego wskaźnika zużycia $m_{gr} = 6$.

Zagadnienia te wymagają dalszych badań z linami różnych konstrukcji i przy różnych warunkach obciążeń, co uzasadnia zakupienie niezbędnej aparatury i programów komputerowych.

Literatura

1. Deputat J.(2002): *Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu*. Dozór Techniczny nr 5(203).
2. Dubow A.A. (1999): *Diagnostyka przewodów rurowych, oprzyrządowania konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu*. Zbiór artykułów i wykładów. Warszawa, Wydawca mgr inż. Andrzej Radziszewski, inż. Piotr Buczkowski.
3. Dubow A.A. (2003): *Sposób określenia stanu granicznego metalu i oceny rewersu oprzyrządowania na podstawie magnetycznych parametrów diagnostycznych*. Zbiór referatów III Międzynarodowej Konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu”, Moskwa 26–28 lutego 2003 r. (w języku rosyjskim).
4. Dubow A.A., Dubow A.L.A., Kołokolnikow S.M. (2004): *Metoda magnetycznej pamięci metalu (MPM) i przyrządy kontroli*. Poradnik. Warszawa, Firma Resurs.
5. Hankus J. (2000): *Budowa i własności mechaniczne lin stalowych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.
6. Hankus J. (2002): *Zintegrowane metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa lin stalowych*. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko nr 4.
7. Hankus J. i inni (2004): *Podstawy badawcze nowej metody nieniszczących badań lin i innych elementów nośnych urządzeń szybowych z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu (MPM)*. Dokumentacja pracy statutowej GIG symbol komputerowy 11040704 – 181/2004 (niepublikowana).
8. Hankus J. (2005): *Biomagnetyzm i magnetyzm ziemski sprzymierzeńcami badań diagnostycznych lin stalowych*. Dozór Techniczny nr 1 (217).
9. Hankus J., Hankus Ł. (2005): *Niekonwencjonalne metody badań diagnostycznych drutów lin stalowych*. Wiadomości Hutnicze nr 2.
10. Hankus J. i inni (2005): *Głowica do badań nieniszczących lin stalowych z wykorzystaniem efektu magnetycznej pamięci metalu*. Zgłoszenie patentowe.

Recenzent: dr inż. Mariusz Szot