

**Jan Hankus, Łukasz Hankus**  
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## **Nowa metoda badań diagnostycznych drutów i lin stalowych z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu.**

Diagnostyka techniczna pracujących lin stalowych obejmuje szeroki zakres badań prowadzonych zarówno w warunkach ruchowych jak i laboratoryjnych [5,6]. Badania takie między innymi od przeszło 50-ciu lat prowadzi Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach. Zakres prac naukowo-badawczych obejmuje bowiem : opracowanie nowych i doskonalenie istniejących konstrukcji lin przy współpracy z fabrykami lin ,określanie głównych własności lin, badanie procesów postępującego zmęczenia ( osłabienia ) oraz opracowanie kryteriów dopuszczalnego zużycia lin w warunkach ruchowych. W pracy przedstawiono próbę wykorzystania w diagnostyce technicznej drutów i lin stalowych nowej metody opartej na efekcie magnetycznej pamięci metalu MPM i naturalnym namagnesowaniu w magnetycznym polu Ziemi. Nowa metoda oparta na efekcie magnetycznej pamięci metalu, uważana jest za metodę diagnostyki XXI wieku [2,3,4]. Ma ona wiele zalet w stosunku do metod tradycyjnych (ultradźwięki, tradycyjna magnetyczna, rentgen it.).

### **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 poddane były różnej wielooperacyjnej obróbce. Pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń roboczych, przewyższających średni poziom naprężeń wewnętrznych, druty poddawane są dalszemu „samonamagnesowaniu” w słabym magnetycznym polu Ziemi Nowa metoda rozwijana przez A.A.Dubowa oparta jest na znanym zjawisku rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej [1]’ Polega na rejestracji własnych magnetycznych pól rozproszenia (WMPR) drutów ,splotek i całej liny w obszarach koncentracji naprężeń (OKN) pod wpływem obciążeń roboczych w słabym magnetycznym polu Ziemi.

### **Magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia**

Podstawowym kryterium przy diagnostyce lin nowych i eksploatowanych metodą magnetycznej pamięci metalu jest określenie na powierzchni drutów i splotek splotek stref koncentracji naprężeń (KN) ,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 odpornością 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  $2l_0$ .  
równy

$$K_{in} = \frac{|\Delta H_p|}{2l_0} = \frac{|H_{p1} - H_{p2}|}{2l_0} \quad (3.1)$$

-gdzie :  $K_{in}$  - magnetyczny współczynnik intensywności naprężenia

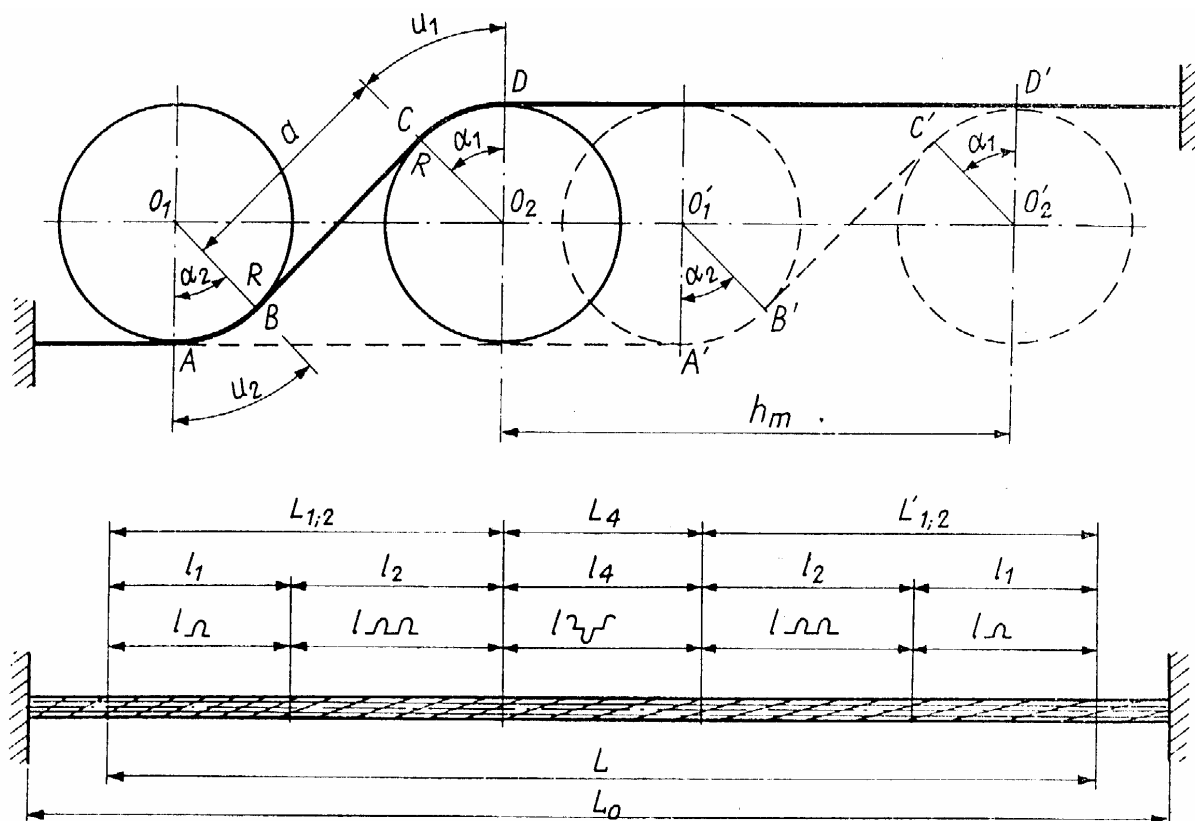
$|\Delta H_p|$  – bezwzględna wartość różnicy  $H_p$  między dwoma punktami położonymi na prostopadłej do KN z zerową wartością  $H_p$  w równej odległości  $l_0$  po przeciwnych stronach KN. Ponieważ  $|\Delta H_p|$  jest proporcjonalne do  $|\Delta\sigma|$  magnetyczny współczynnik koncentracji naprężenia ma wartość wprost proporcjonalną do bezwzględnej wartości różnicy naprężenia na odcinku  $2l_0$ .

### **Wstępne badania doświadczalne**

Badania miały na celu potwierdzenie w sposób namacalny czy zjawisko oparte na efekcie magnetycznej pamięci metalu występuje w drutach linowych o różnym stopniu ich zmęczenia, a także w splotkach liny

### **Badania drutów**

Z odcinka liny po zakończeniu badania zmęczeniowego na maszynie P4-GIG-2 (rys.4), wycięto cztery próbki drutów o długości ok 100 mm, które uzupełniono trzema próbkami przyjmując oznaczenia :



Rys. 3. 1. Rozkład przęgić w odcinku badanym w maszynie P4-GIG-2

Podczas każdego cyklu (ruch wózka tam i z powrotem) odcinki  $l_1$  (rys.4) przeginane są jednostronnie jeden raz, odcinki  $l_2$  jednostronnie dwa razy, a odcinek środkowy  $l_4$  przeginany jest dwustronnie dwa razy. Na tym odcinku następuje zerwanie badanej próbki.

A- drut z miejsca nie przeginanego ;

B – d rut z miejsca przeginanego jednostronnie jeden raz;

C - drut z miejsca przeginanego jednostronnie dwa razy ;

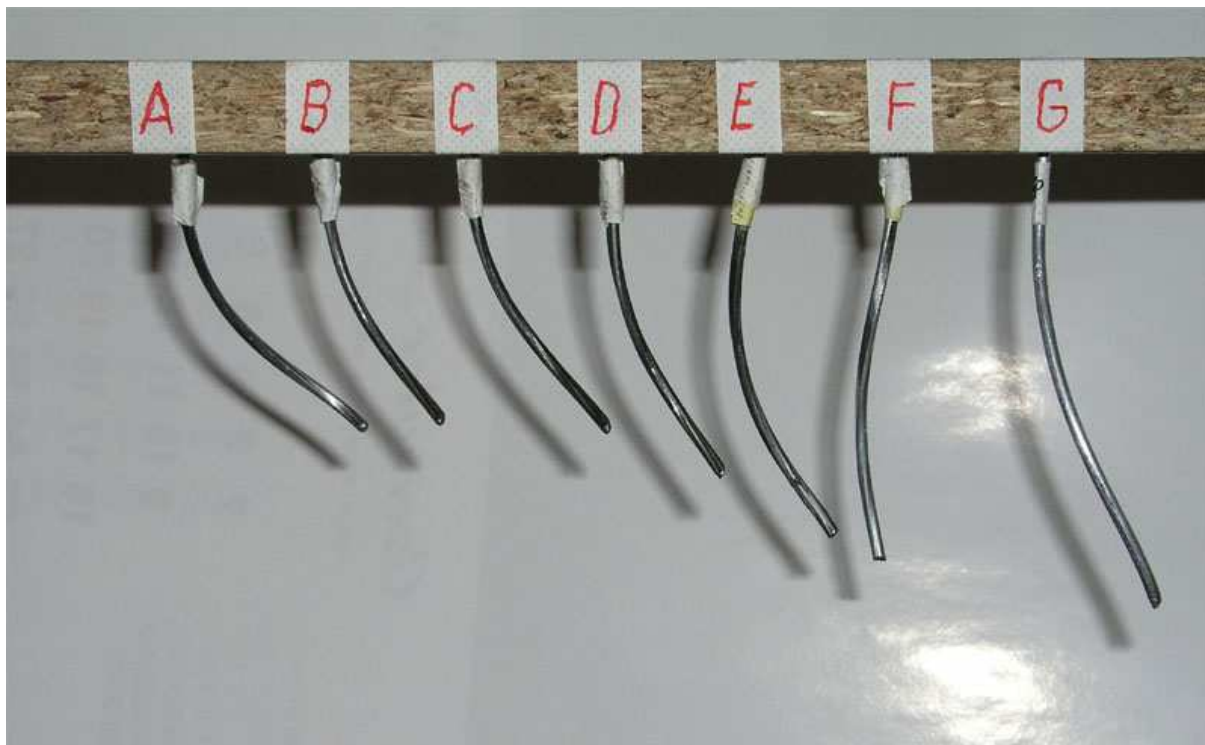
D- drut z miejsca przeginanego dwustronnie dwa razy.

E- drut pęknięty w warunkach ruchowych ;

F- drut z liny w stanie nowym ;

G- drut z innej liny nowej poddanej statystycznej próbie rozciągania aż do zerwania.

Na rysunku 4.1 zestawiono badane próbki drutów (**rys bez opilek** ). Próbki drutów po wycięciu z liny nie prostowano aby nie wpływać na stan wewnętrznych naprężeń dlatego zachowują one kształt przestrzennej linii śrubowej.



Rys. 4.1 Próbki drutów przygotowane do badań

Próbki drutów od A do E pochodzą z liny o powierzchniowym styku drutów typu DYFORM, która została zastosowana w Kopalni Węgla Kamiennego „Rozbark.” Podczas pracy w drutach liny występowały naprężenia rozciągające, zginające, skręcające oraz naciski pomiędzy liną a dnem rowka koła linowego. Działał więc złożony stan naprężeń cyklicznie zmiennych, wywołujący zmęczenie materiału i pękanie drutów. Odcinek liny odłożonej badany w maszynie zmęczeniowej zerwał się po wykonaniu 60275 cykli zmian obciążeń (lina nowa wytrzymała 82430 cykli) przy sumarycznej liczbie 112 pęknięć drutów. Wynika z powyższego, że spadek trwałości liny po zakończeniu eksploatacji w odniesieniu do liny nowej wynosił ok.27%.

Następnie do kolejnych próbek drutów zbliżano pojemnik z opiłkami metalu i stwierdzono z zaskoczeniem, że opiłki przyciągane są do drutów tak jak do magnesu trwałego. Uwidocznione zostało to na rys.4.2

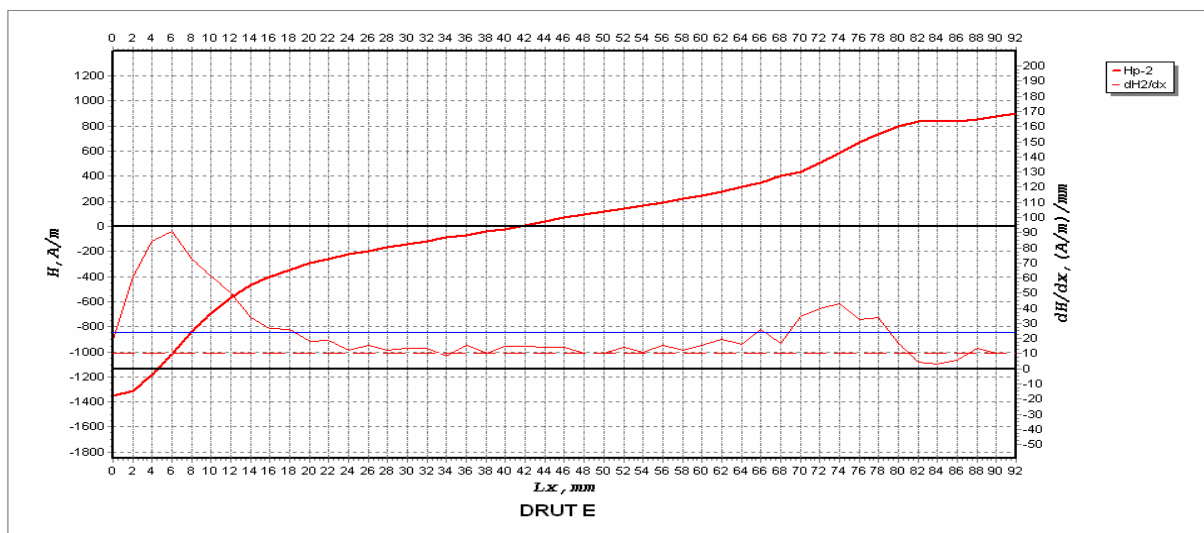


Rys. 4.2. Próbki drutów przyciągające opiłki żelaza

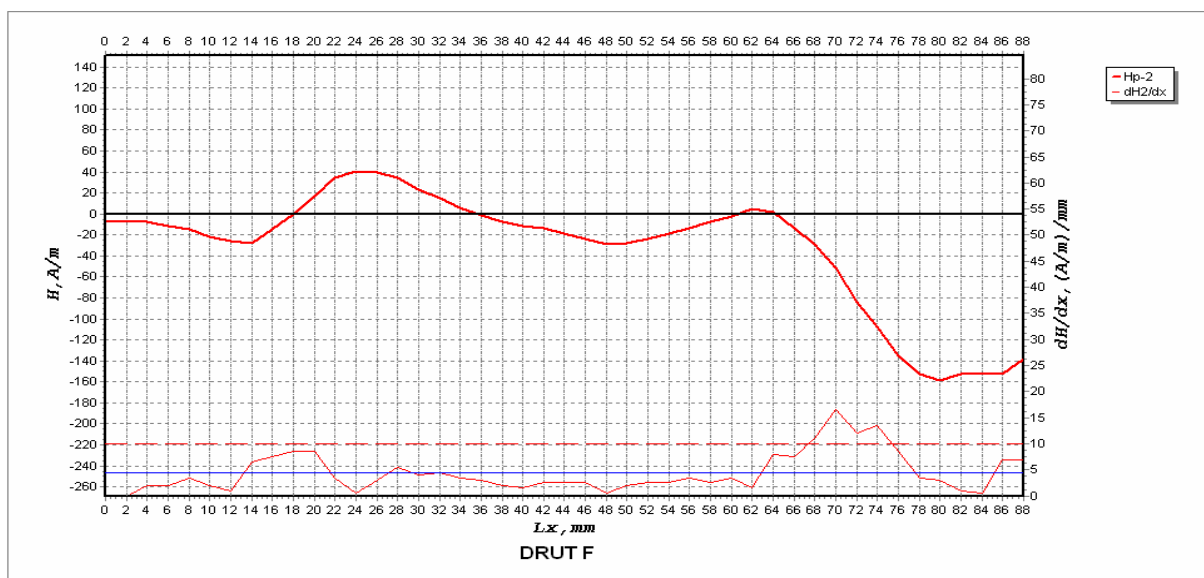
Tym samym ujawnione zostało po raz pierwszy ( J.Hankus lipiec 2003 r) zjawisko namagnesowania się drutów liny obciążanej w warunkach eksploatacji i w czasie badania zmęczeniowego. Jedynie koniec próbki F nie został obklejony opiłkami , co świadczy o znacznie słabszym jej namagnesowaniu niż pozostałych próbek .

Zauważono także, różne ilości podwieszonych opiłków na poszczególnych próbkach, świadczące o różnym stopniu ich namagnesowania. Najmniej opiłków było na próbce A, a najwięcej na próbce D. Próbka D w sposób trwały przyciągała również gwoździ o 17,5 mm .

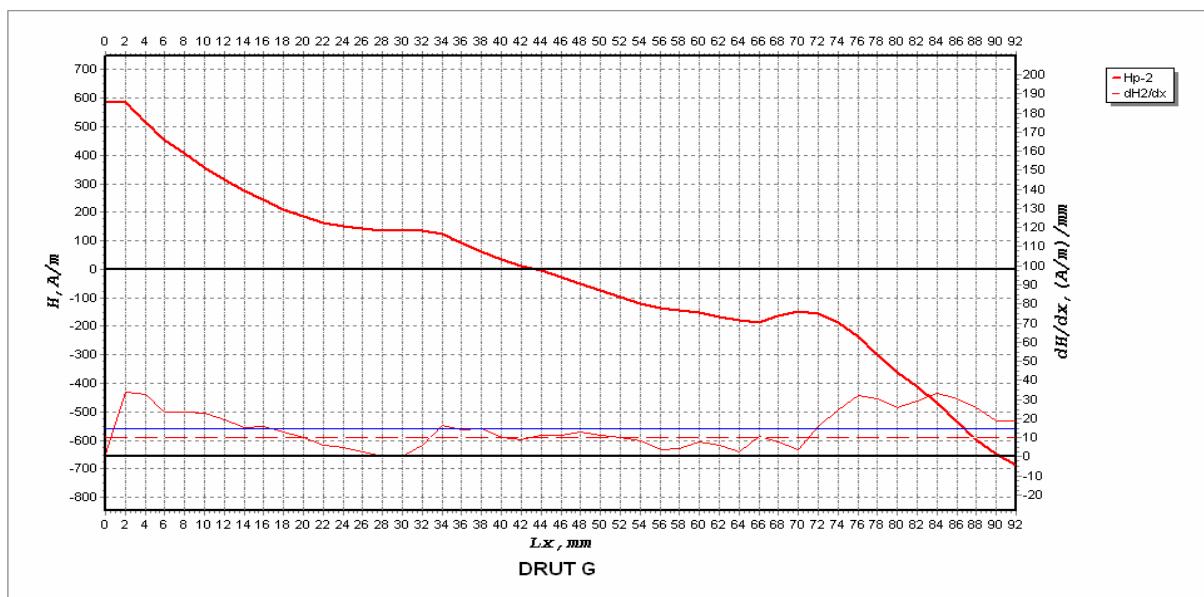
Rysunki 4.3, 4.4 i 4.5 przedstawiają przykładowo przebiegi zależności  $H_p = f(x)$  i  $K_{in} = \varphi(x)$  uzyskane dla próbek E, F, G.



Rys. 4.3 Przebieg zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu E.



Rys.4.4. Przebieg zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu F.



Rys. 4.5. Przebieg zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskany podczas przesuwania sondy wzdłuż osi próbki drutu G

Najniższą wartość magnetycznego współczynnika koncentracji naprężenia wykazuje próbka F reprezentująca drut z liny w stanie nowym. Charakteryzuje on tylko strukturalną i technologiczną dziedziczność w postaci magnetyzmu szczątkowego.

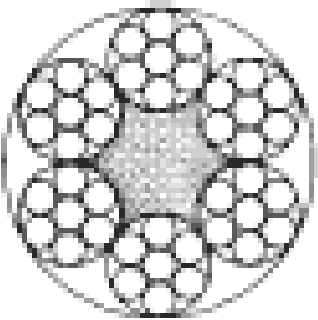
### Badania zmęczeniowe liny

Wartościowe wnioski jakie uzyskano z badań wstępnych omówionych w rozdziale 4 były podstawą do kontynuowania odpowiednio zaprogramowanych badań. Prowadzone były połączone badania zmęczeniowe liny w maszynie P5 –GIG –3 ( rys.5.1) oraz badania z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu. Badania prowadzono za pomocą specjalnie wykonanej w GIG głowicy pomiarowej.

Rys. 5.1. Schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej 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 przednim , 7- łącznik, 8 – korba, 9 – głowica pomiarowa

Przedmiotem badań była próbka liny, której przekrój poprzeczny oraz dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe podano w tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Przekrój poprzeczny oraz dane konstrukcyjne i wytrzymałościowe badanej liny

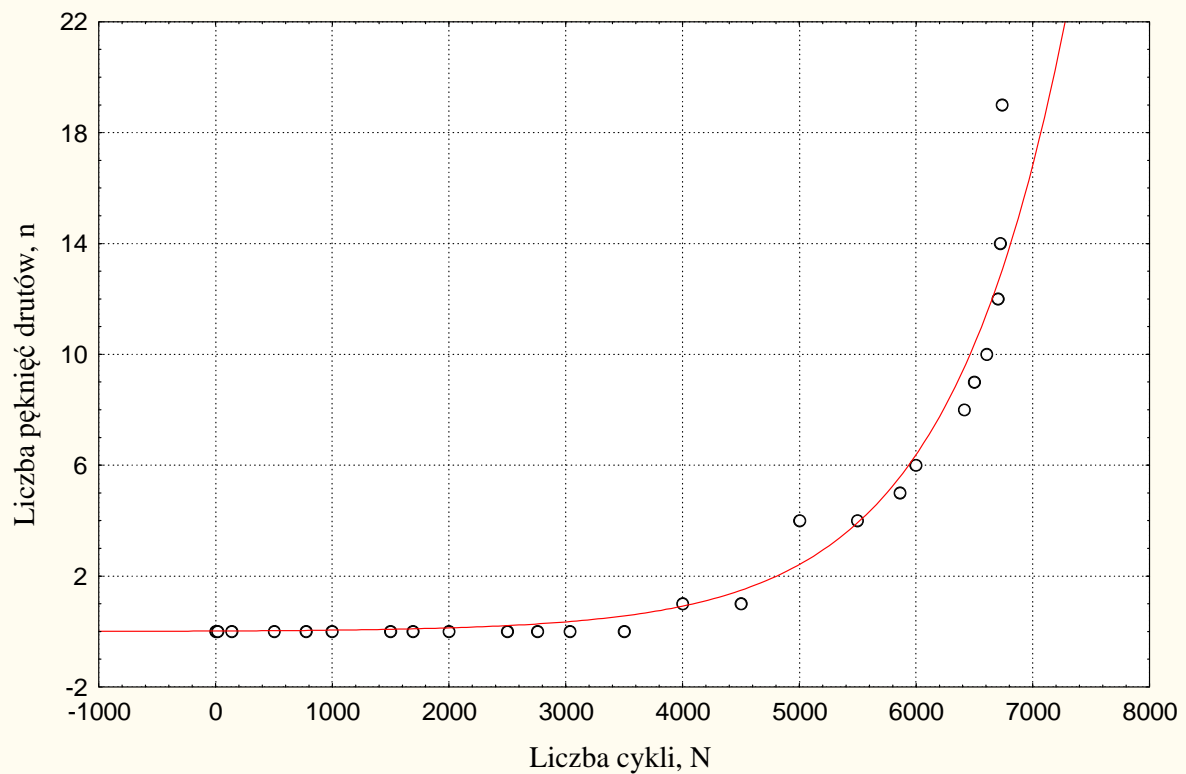
	Parametr	Wartość parametru
	Średnica nominalna $d$ , mm	16
	Przekrój nośny $F$ , mm <sup>2</sup>	95,332
	Masa 1 m $q$ , kg	0,865
	Druty o wytrzymałości $R_m$ , MPa	1570
	Konstrukcja	16 NAT 6x7 + NF , prawa przeciwzwita z/S
	Nominalna siła zrywająca linę $P_n$ , kN	149,67

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

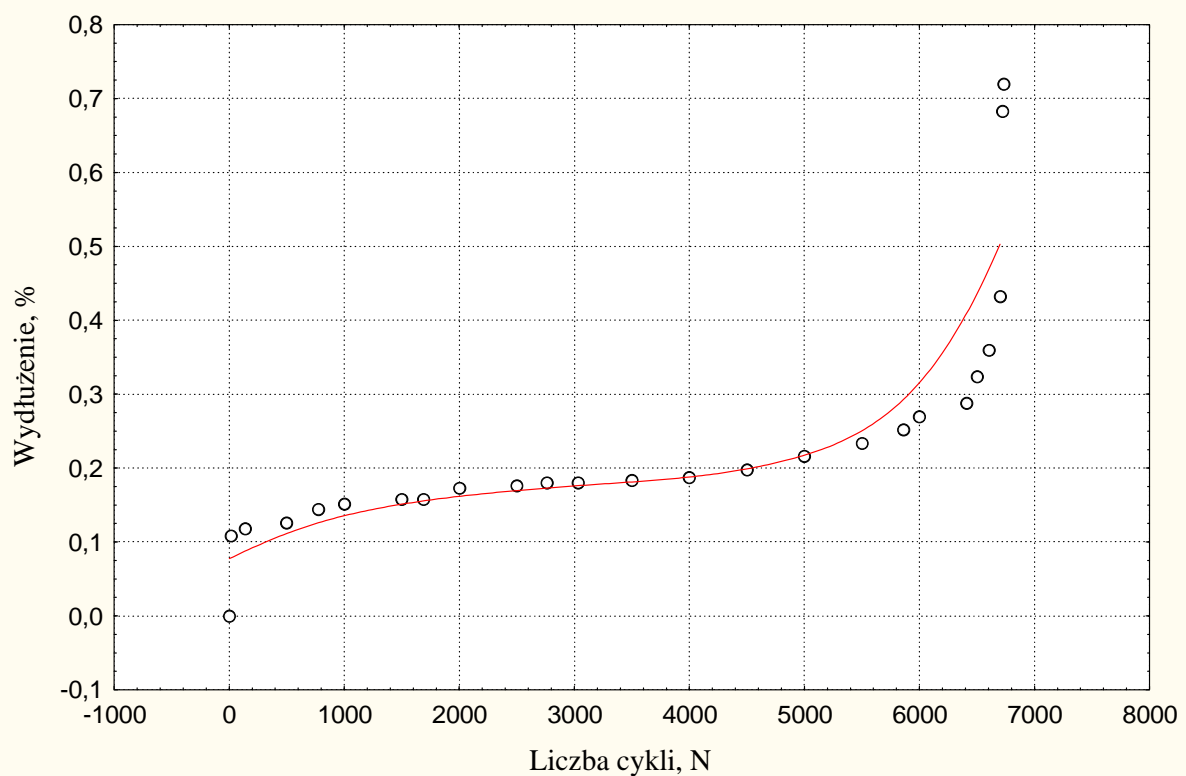
Przy ustalonych liczbach cykli przerywano badanie zmęczeniowe i za pomocą odpowiednio skonstruowanej głowicy mocowanej na linie (rys.5.1 ), prowadzono rejestrację zmian rozproszonego pola magnetycznego wzdłuż jednej splotki.

### Mechaniczne wskaźniki postępującego zmęczenia -zużycia

Wieloletnie badania zmęczeniowe [5] wykazały, że głównymi mechanicznymi wskaźnikami postępującego zmęczenia jest narastanie pęknięć drutów oraz wydłużanie się badanej próbki aż do zerwania liny. Na rys.5.2 i 5.3 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 [ 5].Zerwania liny nastąpiło przy liczbie cykli zmęczeniowych  $N = 6735$ .



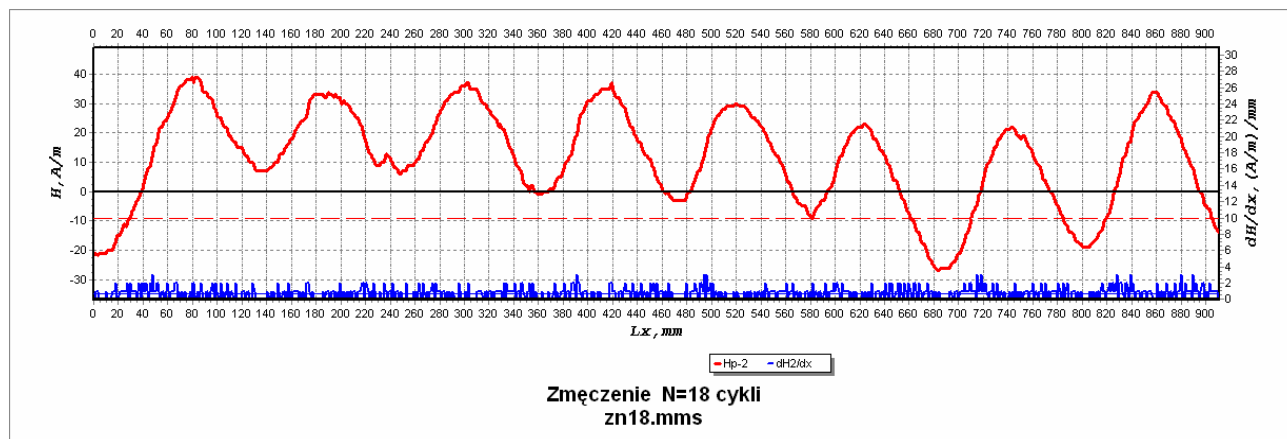
Rys. 5.2. Wykres narastania liczby pęknięć drutów linii 16 NAT 6x7 + NF badanej w maszynie w maszynie P4- GIG-3;



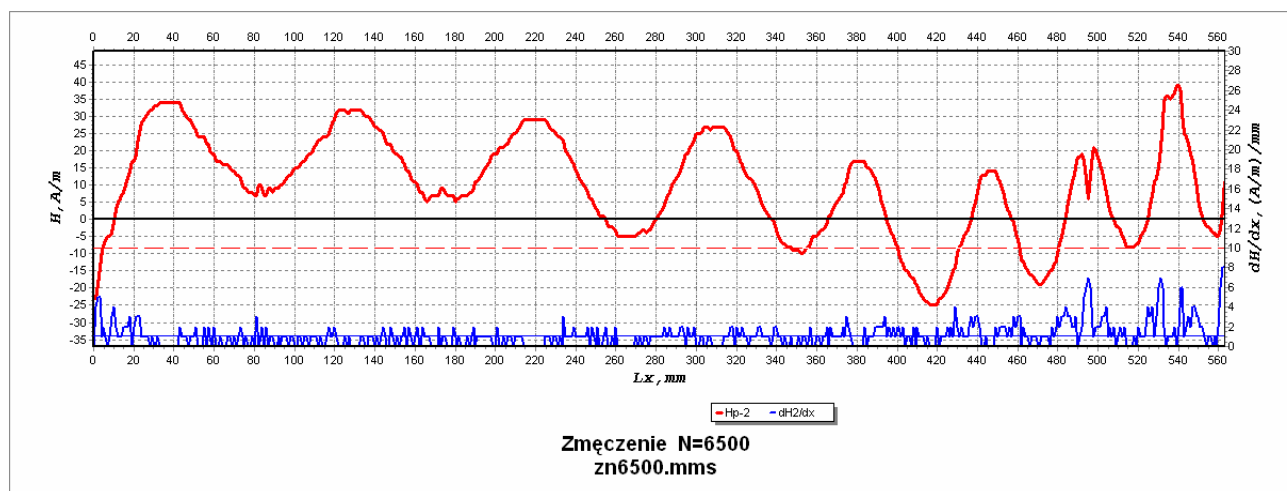
Rys.5.3. Punkty odwzorowujące wyniki badań oraz przebiegi krzywej empirycznej wydłużania się linii 16 NAT 6x7 + NF badanej w maszynie P4- GIG-3;

## Magnetyczne wskaźniki postępującego zmęczenia -zużycia ( umocnienia) lin

Pomiary postępującego zmęczenia z wykorzystaniem efektu magnetycznej pamięci metalu prowadzono za pomocą specjalnej głowicy (rys.5.1 ), która przesuwiała się 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 zmęczeniowych. Na rys.5.4 i 5.5 przedstawiono przykładowo przebiegi zależności  $H_p = f(x)$  i  $K_{in} = \varphi(x)$  uzyskane dla badanej liny po wykonaniu przez nią 18 i 6500 cykli zmęczeniowych.

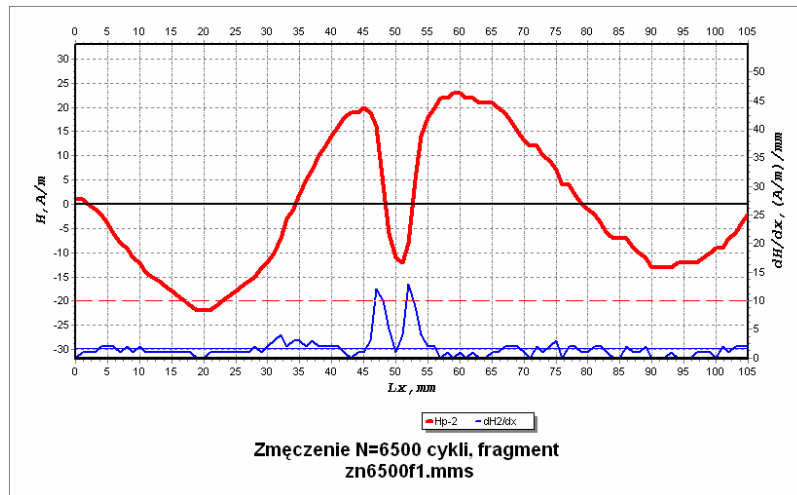


Rys 5.4. Przebiegi zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki po wykonaniu przez linę 18 cykli zmęczeniowych



Rys. 5.5. Przebiegi zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki po wykonaniu przez linę 6500 cykli zmęczeniowych

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 przeginany był dwustronnie przy cyklicznie zmiennych obciążeniach rozciągających. W tym miejscu było najwięcej pękniętych drutów i po dalszych 235 cyklach nastąpiło zerwanie dwóch splotek liny.



Rys.5.6. Przebiegi zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskane podczas przesuwania sondy ruchem śrubowym wzdłuż osi splotki nad pękniętymi drutami

Rysunek 5.6 przedstawia przebiegi zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  uzyskane nad pękniętymi drutami. Wyraźne zmiany pionowej składowej pola magnetycznego  $H_p$  i magnetycznego współczynnika koncentracji naprężeń  $K_{in}$  w miejscu napotkanej przerwy (patrz punkt 2.3. pole magnetyczne nad wadą), wskazuje na dużą czułość metody MPM.

### Ilnościowa ocena stopnia zmęczenia drutów i liny z wykorzystaniem metodyki 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 dla drutów i lin stalowych. Autorzy [ 3,4] w oparciu o wyniki 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 :

1. przegląd uzyskanych magnetogramów na ekranie monitora (rys. 4.2 -4. 4, 4.5, 5.4, 5.5)
2. wyszukanie obszarów koncentracji naprężeń ( KN) na podstawie największych zmian  $H_p$  i  $K_{in}$  na każdym kanale pomiarowym,
3. zestawienie tablic maksymalnych wartości  $K_{in}^{max}$  dla każdego obszaru KN,

4 . obliczenie średniej wartości 
$$K_{in}^{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{in}^i \quad (6.1)$$

ze wszystkich obszarów KN

gdzie: n – ilość obszarów KN

5. określenie magnetycznego wskaźnika zużycia dla wszystkich obszarów koncentracji naprężeń (OKN) według wzoru :

$$\frac{K_{in}^{max}}{K_{in}^{sr}} = m \quad (6.2)$$

Jeżeli uzyskana wartość  $m$  jest większa od granicznej wartości  $m_{gr}$  to można wysnuć wniosek, 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 metodologii.

Jak podają autorzy 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. Jak wykazały laboratoryjne i przemysłowe eksperymenty przeprowadzone przez autorów metodyki, dla badanych materiałów graniczne dopuszczalne wartości  $m_{gr}$  z uwzględnieniem zapasu nie powinny być niższe 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. Korektę wartości  $m_{gr}$  dokonuje się na podstawie nagromadzonych w banku danych z wyników kontroli rzeczywistych wyrobów znajdujących się w eksploatacji.

### Analiza stopnia zmęczenia drutów

W pierwszej kolejności wykorzystując opisaną powyżej metodykę przeprowadzono analizę wyników badań drutów omówionych częściowo w punkcie 4.1. wykorzystując programy komputerowe „MPM-System” i „MPM-Resurs).

W tabelicy 6.1 zestawiono wyniki analizy. 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 wyższą 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  $R_e$  [5]. Wobec tego wyznacza się umowną granicę plastyczności  $R_{0,2}$  odpowiadającą naprężeniu przy którym próbka doznaje 0,2 % względnego wydłużenia trwałego. Jak wynika z danych tabelicy 6.1 dla próbek drutów A,B,C,D i E wartości magnetycznego wskaźnika podatności na odkształcenia  $m$  przewyższają wartość graniczną 2,0.[3,4]. Jest to uzasadnione gdyż próbki te pobrano z liny po zakończonym badaniu zmęczeniowym. Natomiast znaczne mniejsze wartości  $m < 2$  uzyskano dla próbek F (pobrana z liny nowej) i G (pobrana z liny nowej po próbie rozciągania aż do zerwania).

Tablica 6.1 Wyniki analizy MPM drutów

Oznaczenie próbki	$K_{in}^{sr}$ (A/m)/mm	$K_{in}^{max}$ (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
<b>D</b>	<b>58,681</b>	<b>368,000</b>	<b>6,271 &gt; 2,0</b>
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

### Analiza własności liny

Uzyskane z pomiarów magnetogramy poddano ilościowej analizie zgodnie z punktem 5.3. Przeprowadzono również analizę procesów narastania pęknięć drutów i wydłużania się liny. W tabelicy 6.2 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 [3]. Wyniki pomiarów charakteryzuje pewien rozrzut dlatego też dla wykrycia wzajemnych współzależności, dalszą analizę zbiorów prowadzono metodami statystyki i rachunku prawdopodobieństwa (metody probabilistyczne analizy).

Tablica 6.2 Analiza wyników badań własności lin

Liczba cykli N	Liczba pęknięć drutów n	Wydłużenie względne liny $\epsilon, \%$	$K_{in}^{max}$ (A/m)mm	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

### Analiza korelacyjna

Siłę współzależności (powiązania liniowego) między dwoma zmiennymi X,Y określa współczynnik korelacji liniowej Pearsona  $r_{xy}$ . W tabelicy 6.3 zestawiono przykładowe wartości  $r_{xy}$  dla pięciu zmiennych badanych parametrów liny.

Tablica 6.3. Korelacja między parametrami badanej liny nr 1

Parametr	Liczba cykli, N	Liczba pęknięć drutów, n	Wydłużenie, $\epsilon$	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
Wydłużenie, $\epsilon$	0,94	0,96	1,00	0,85	0,81
Współczynnik	0,71	0,81	0,85	1,00	0,82

koncentracji $K_{in}$					
Wskaźnik zmęczenia $m$	0,79	0,80	0,81	0,82	1,00

Z danych tablicy 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  $\epsilon$  istnieje wysoka dodatnia korelacja ( $r_{xy} > 0,70$ ). Oznacza to zależność znaczną.

### 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 danych tablicy 6.3 wynika, że pomiędzy wyznaczonymi wartościami magnetycznego wskaźnika zużycia (umocnienia)  $m$ , a liczbą cykli zmęczeniowych  $N$ , liczbą pęknięć drutów  $n$  i względnym wydłużeniem próbki liny  $\epsilon$  istnieje wysoka współzależność, a współczynniki korelacji liniowej są istotne przy poziomie istotności  $\alpha < 0,05$ . ( $r_{xy} > 0,70$ ). Oznacza to, że pomiędzy rozproszone wyniki pomiarów najlepiej wpisują się proste regresji o równaniach

$$m(N, n, \epsilon) = y = a_i + b_i \cdot x \quad (6.3)$$

gdzie  $m$  - magnetyczny wskaźnik zużycia liny,  
 $a_i, b_i$  - parametry strukturalne modeli,

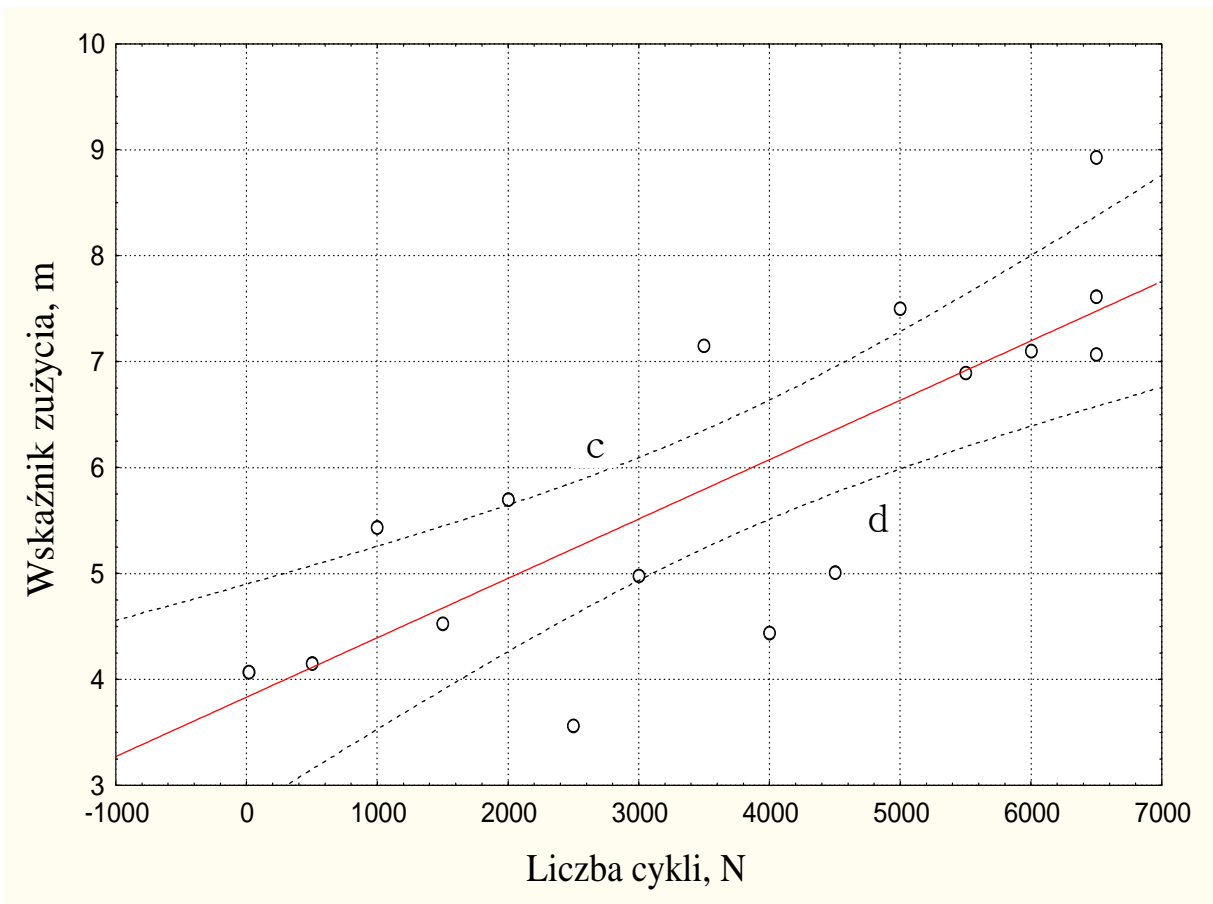
W wyniku obliczeń dla analizowanej liny uzyskano zależności

$$n(N) = 3,8336 + 0,00056 N \quad (6.4)$$

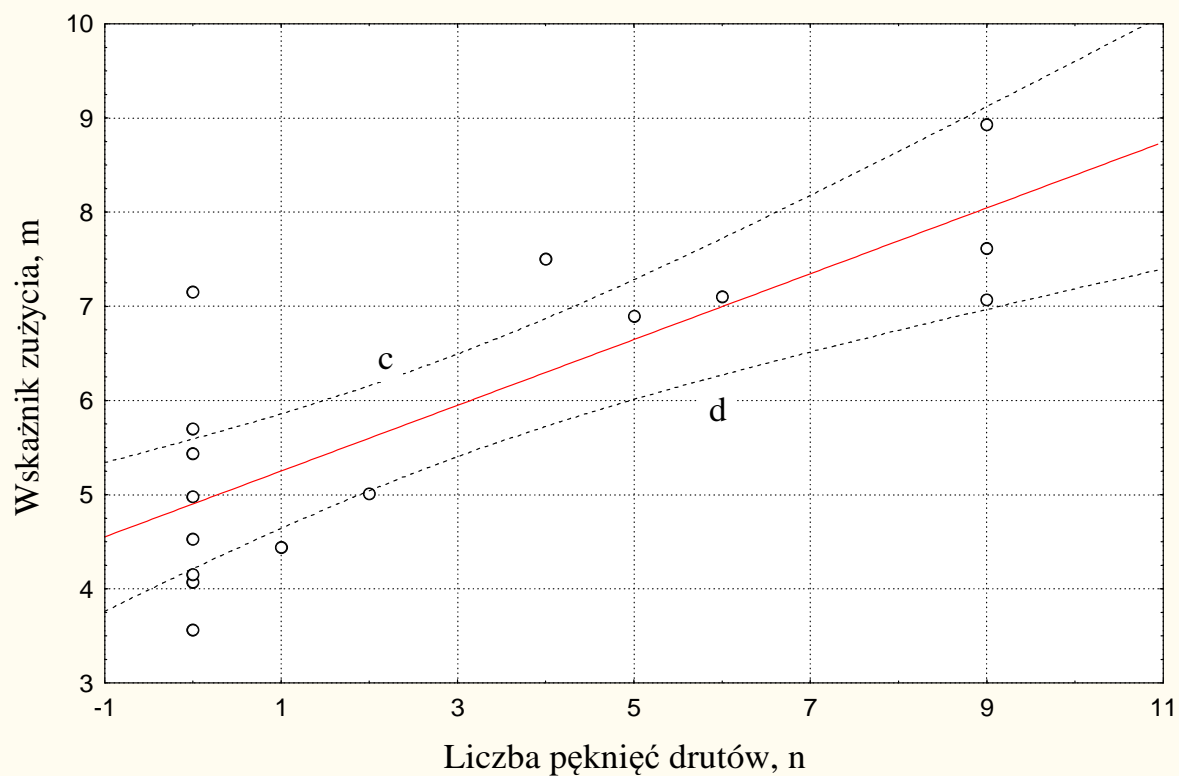
$$m(n) = 4,9016 + 0,3421 n \quad (6.5)$$

$$m(\epsilon) = 1,9811 + 18,757 \epsilon \quad (6.6)$$

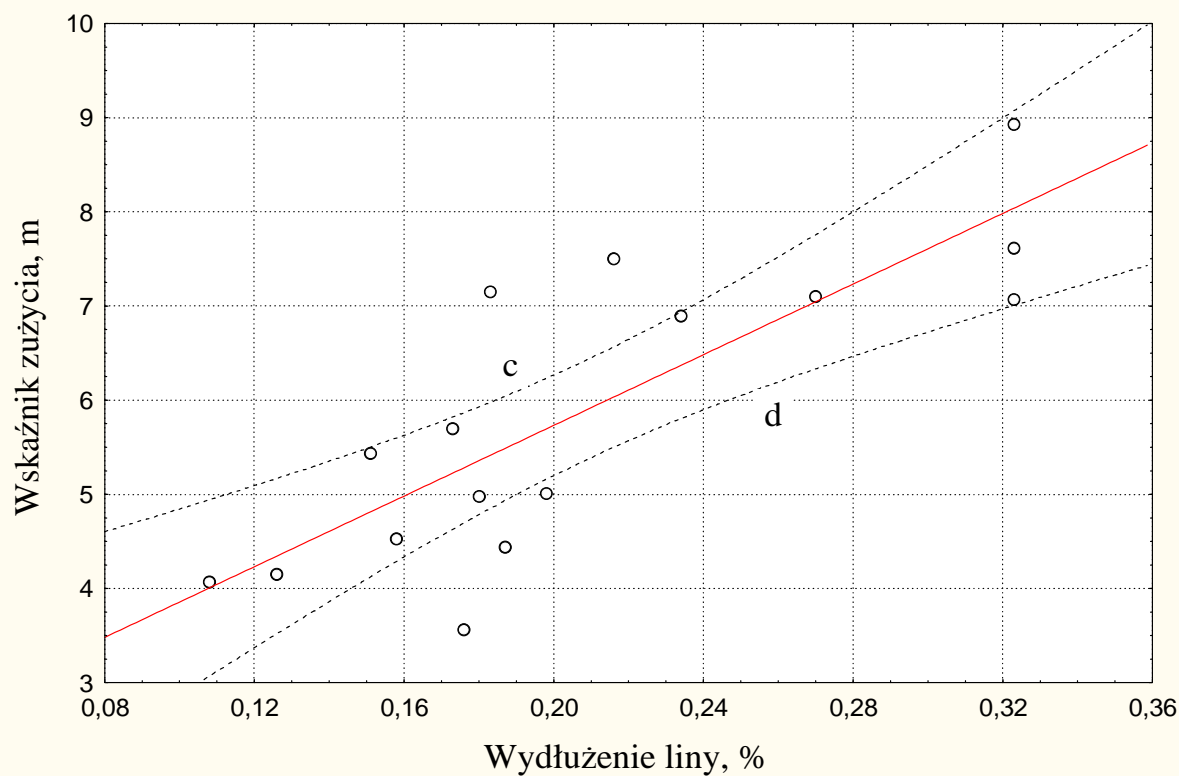
Na rys.6.2, 6.3 i 6.4 przedstawiono wartości magnetycznego wskaźnika  $m$ , przebiegi prostych regresji oraz przedziały ufności (linie c i d) wyznaczone przy poziomie ufności  $P = 95\%$ .



Rys. 6.2. Magnetyczny wskaźnik zużycia  $m = \psi(N)$  linii  $6x7+FN$ ; linie c, d – granice przedziału ufności



Rys.6.3. Magnetyczny wskaźnik zużycia  $m = \psi(n)$  linii 6x7+FN ; linie c , d – granice przedziału ufności



Rys.6.4. Magnetyczny wskaźnik zużycia  $m = \psi(\epsilon)$  linii 6x7+FN ; linie c , d – granice przedziału ufności

## Graniczna wartość magnetycznego wskaźnika zużycia

Wykorzystując otrzymane modele regresyjne zmiany magnetycznego wskaźnika zużycia  $m$ , od liczby cykli zmęczeniowych  $N$ , liczby pęknięć drutów  $n$  i względnego wydłużenia próbki liny  $\epsilon$ , wyznaczamy przybliżone graniczne wartości  $m_{gr}$  w oparciu o dopuszczalne graniczne wartości klasycznych wskaźników zużycia. Dla lin przeciwzwitych konstrukcji 6x7 + FN dopuszczalne ze względów bezpieczeństwa liczby pęknięć drutów wynoszą: 1-na odcinku o długości 6x d – 2 pęknięcia, 2- na odcinku o długości 30x d – 4 pęknięcia (d – średnica liny). Dla badanej liny wcześniej wystąpiło kryterium drugie przy liczbie cykli  $N_{gr} = 5000$  mamy  $n_{gr} = 4$ . Jak wynika z wykresu wydłużania (rys. ), ponowne znaczne wydłużanie liny wystąpiło po przekroczeniu  $\epsilon_{gr} = 0,23\%$ . Podstawiając powyższe wartości do ( 6.4 ), ( 6.5 ) i ( 6.6 ) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} m_{(N)} &= 6,634, \\ m_{(n)} &= 6,27 \\ m_{(\epsilon)} &= 6,295 \end{aligned} \quad ( 6.7 )$$

Są to wartości mało różniące się. Można przyjąć że dla badanej liny przeciwzwitej konstrukcji 6x7 + FN  $m_{gr} = 6$ . Jest to wartość wyższa od uzyskanych dla elementów litych stalowych [3]. Lina ma budowę złożoną. Elementami składowymi są druty, splotki, organiczny rdzeń oraz smary. Proces makro umocnienia przebiega odmiennie niż w

jednorodnych cięgnach lub prętach Zagadnienia te wymagają dalszych badań z linami 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.

## Wnioski i uwagi końcowe

1. 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 poddany był 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.

2. Metoda oceny stanu naprężenia i odkształcenia oparta na efekcie magnetycznej pamięć metalu MPM posiada wiele zalet. Nie wymaga czyszczenia i sztucznego magnesowania badanych elementów, co znacznie ułatwia prowadzenie badań diagnostycznych. Metoda znana jest od 20 lat. Jej twórcą i propagatorem jest A.A Dubow, który opublikował wiele prac, uzyskał wiele patentów i przyczynił się do wdrożenia metody do badania różnych elementów nośnych i konstrukcji

3. 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.

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

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

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

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