

Tomasz HANISZEWSKI<sup>1</sup>, Damian GAŚKA<sup>2</sup>, Jerzy MARGIELEWICZ<sup>3</sup>

## IDENTYFIKACJA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH LINY STALOWEJ Z RDZENIEM WŁÓKIENNYM

**Streszczenie.** Zagadnienia przedstawione w niniejszym artykule dotyczą oceny właściwości mechanicznych liny. Punktem wyjściowym było przeprowadzenie badań laboratoryjnych, które zrealizowano w Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o. w Mysłowicach-Brzezince. Niezbędne badania lin przeprowadzono na specjalistycznej maszynie wytrzymałościowej przy różnych wartościach współczynników bezpieczeństwa, obciążając ją cyklicznie. Na podstawie zarejestrowanych danych sporządzono charakterystyki siłowo-przemieszczeniowe, będące podstawą identyfikacji współczynników rozproszenia energii oraz charakterystyk statycznych.

**Słowa kluczowe:** model, lina, modelowanie, identyfikacja

## MECHANICAL PROPERTIES IDENTIFICATION OF STEEL WIRE ROPE WITH FIBER CORE

**Summary.** Issues taken in this article, are devoted to the identification of the mechanical properties of the wire rope. The starting point was to carry out the necessary laboratory tests, which were carried out at the The Research and Supervisory Centre of Underground Mining Co. Ltd in Mysłowice-Brzezinka. Stress tests were performed on a specialized testing machine. Test were performed as repeatedly loading and unloading the rope with different safety factors. On the basis of the recorded experimental results, characteristics of strength and displacement were made, which was the basis for identifying the energy dissipation coefficient and static characteristics.

**Keywords:** model, wire rope, modeling, identification

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych problemów, jaki pojawia się podczas numerycznego modelowania zachowania obiektu rzeczywistego, jest identyfikacja jego parametrów mechanicznych. W niniejszym artykule autorzy przedstawiają jedną z metod estymacji wielkości fizycznych modelu liny stalowej o konstrukcji 6x19 SEALE rdzeniem włókiennym

---

<sup>1</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, Poland, e-mail: tomasz.haniszewski@polsl.pl

<sup>2</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, Poland, e-mail: damian.gaska@polsl.pl

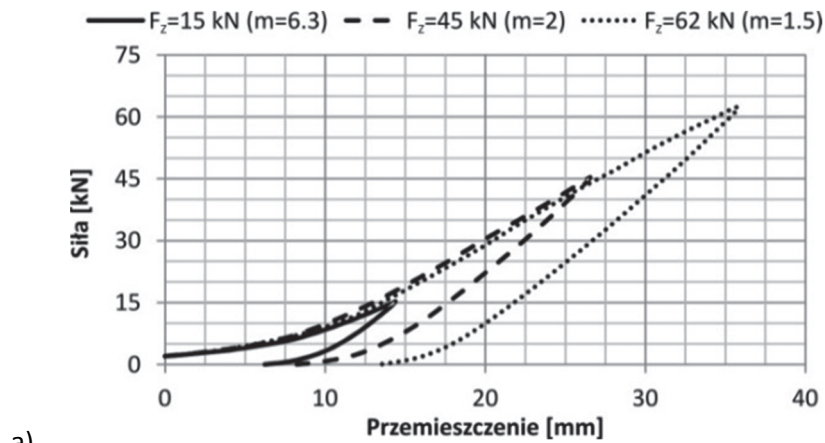
<sup>3</sup> Silesian University of Technology, Faculty of Transport, Katowice, Poland, e-mail: jerzy.margielewicz@polsl.pl

[13]. Na podstawie zarejestrowanych danych w badaniach laboratoryjnych [3, 4] sporządzono ciąg charakterystyk odwzorowujących relacje zachodzące pomiędzy wydłużeniem liny a przenoszona przez nią siłę. Charakterystyki te opisują zachowanie cięga podczas jego obciążenia i odciążenia. O zgodności wyników badań modelowych z danymi pomiarowymi decydują dwa czynniki: po pierwsze, prawidłowe wyodrębnienie tych elementów, które mają decydujący wpływ na przebieg zjawisk zachodzących w badanym układzie, co determinuje przyjęcie odpowiednich założeń modelowych. Natomiast drugim jest przetworzenie w taki sposób danych pomiarowych, by można było w efektywny sposób zidentyfikować wszystkie niezbędne wielkości, wymagane do przeprowadzenia symulacji komputerowej. W tym miejscu należy wyraźnie zaznaczyć, że przebieg obciążeń oddziałujących na linę ma przeważnie charakter złożony, który zasadniczo jest związany z różnorodnością warunków pracy. Obciążenia te wywołują złożone stany mechaniczne, których przebieg w dużej mierze jest zdeterminowany liczbą cykli wymuszających. W zależności od charakteru obciążenia wzbudzane są w linie zjawiska wpływające na deformację cykliczną, takie jak: cykliczne wzmocnienie, osłabienie czy też pełzanie. Podczas cyklicznego obciążania część energii mechanicznej ulega rozproszeniu [11].

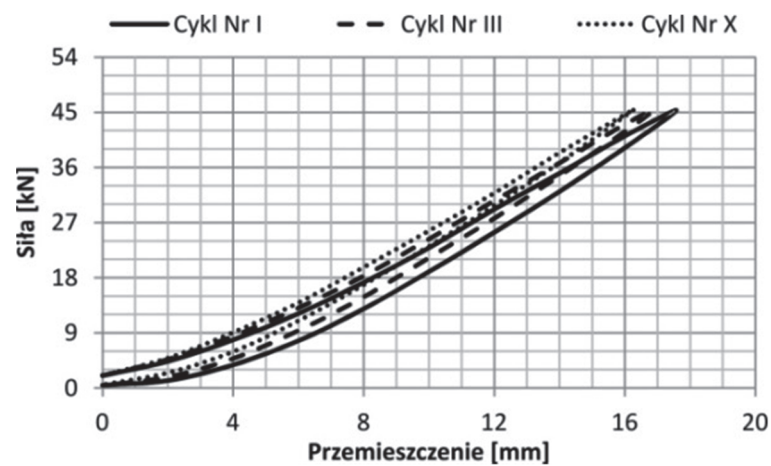
## 2. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Do przygotowania niniejszego artykułu wymagane były pomiary, które wykonano w Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o. w oddziale Mysłowice-Brzezinka. Pomiary te przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej przystosowanej do badań długich odcinków lin, co omówiono szczegółowo w pracach [3, 4].

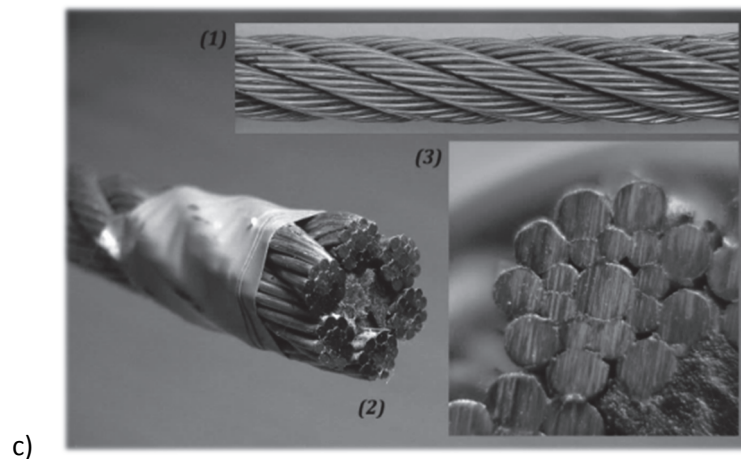
Badania doświadczalne lin realizowano przy uwzględnieniu różnych wartości maksymalnych sił obciążających, zdefiniowanych współczynnikiem bezpieczeństwa  $m$ , gdzie  $m$  jest określone jako stosunek rzeczywistej siły zrywającej linę do siły odpowiadającej danemu obciążeniu. Wartości współczynnika bezpieczeństwa dobrano tak, by prześledzić wpływ obciążenia, a tym samym stopień osadzenia splotek na rdzeniu, na wartość współczynnika rozproszenia energii. Dla ustalonego programu badań zadano, zgodnie z normą [14], małą prędkość rozciągania, powodującą przyrosty naprężenia w przedziale od  $10e6$  [Pa] do  $20e6$  [Pa] w ciągu sekundy dla badanej liny. Warto wspomnieć, że zrealizowane pomiary miały charakter badań wstępnych, a uzyskane charakterystyki w dalszym ciągu zastosowano do estymacji parametrów modelu liny. Wpływ cyklicznego obciążenia liny zobrazowano graficznie na rysunku 1. W pierwszym cyklu obciążeniowym lina ulega trwałemu wydłużeniu. Wydłużenie to jest efektem między innymi kasowania luzów pomiędzy drutami splotki oraz rdzeniem. Ponadto charakterystyczną cechą trwałej deformacji jest to, że punkt końcowy krzywej odciążenia nie pokrywa się z punktem startowym krzywej obciążenia. Z przedstawionych w taki sposób danych pomiarowych uwidacznia się związek pomiędzy siłą a przemieszczeniem, który wykazuje cechy nieliniowe [2, 4, 5], ponieważ zarówno krzywe obciążania, jak i odciążania przybierają kształt, który bardzo dobrze można opisać nieliniowymi funkcjami.



a)



b)



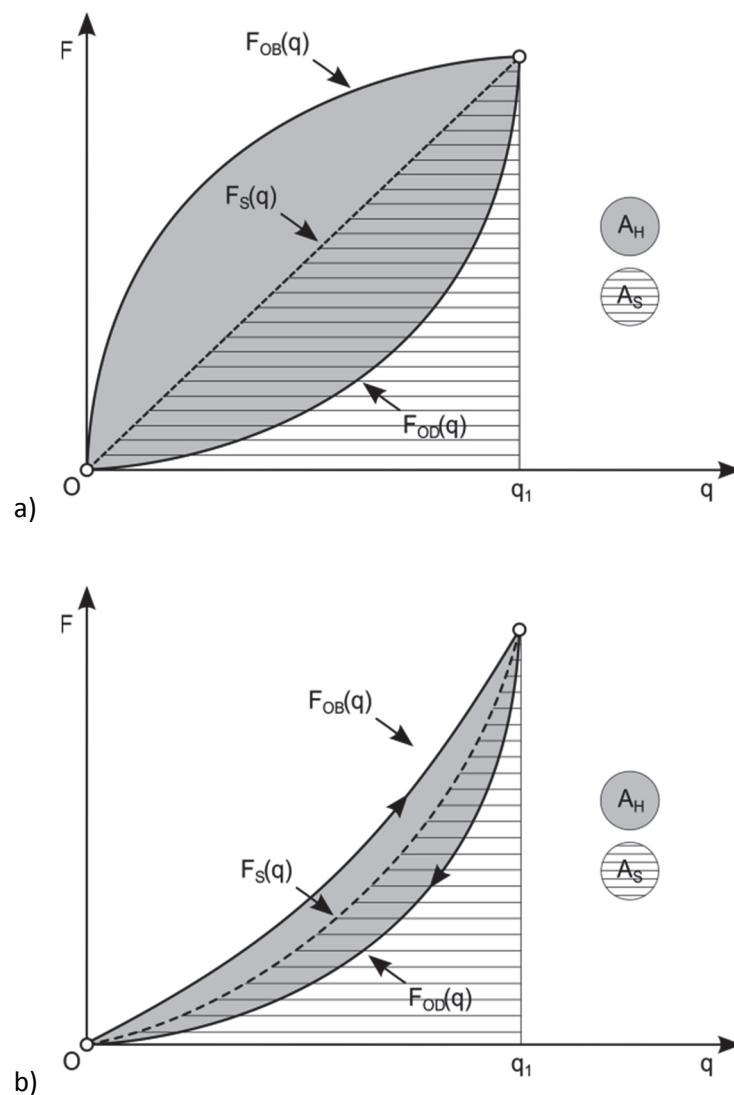
c)

Rys. 1. Charakterystyki siłowo-przemieszczeniowe liny obrazujące wpływ: a) wartości obciążenia zewnętrznego, b) liczby cykli obciążeniowych, c) odcinek badanej liny (1), przekrój (2), budowa splotki (3)

Fig. 1. Strength-displacement characteristics of wire rope, showing the impact of: a) value of the external load, b) number of load cycles, c) tested wire rope (1), cross section (2), construction of strands (3)

### 3. IDENTYFIKACJA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH LINIY

Mając na uwadze przeprowadzenie badań modelowych, konieczne staje się określenie parametrów przyjętego do badań modelu fenomenologicznego. Zazwyczaj zagadnienie to sprowadza się do identyfikacji parametrów mechanicznych badanego obiektu na podstawie wyników eksperymentów laboratoryjnych, przy czym przebieg obciążeń oddziałujących na badany obiekt, w tym wypadku linę, ma charakter złożony, który w głównej mierze jest związany z różnorodnością warunków pracy. Obciążenia te są odpowiedzialne za występujące złożone stany mechaniczne, których przebieg jest uzależniony od liczby cykli oraz maksymalnej siły obciążającej. W trakcie cyklicznego obciążania część energii ulega rozproszeniu, co umożliwia określenie współczynnika rozproszenia energii. Analizując literaturę specjalistyczną, można spotkać się z wieloma hipotezami poświęconymi temu zagadnieniu [6, 9, 10, 11]. Niemniej jednak wielkość energii rozpraszanej w pojedynczym cyklu definiuje się między innymi na podstawie pola powierzchni pętli histerezy (rys. 2).



Rys. 2. Pętle histerezy umożliwiające identyfikację współczynnika dyssypacji energii: a) materiału o właściwościach liniowych, b) materiału o właściwościach nieliniowych

Fig. 2. Hysteresis loops allowing identification of energy dissipation factor: a) linear characteristics material, b) nonlinear characteristics material

Przy oparciu się wyznaczonych pętach histerezy, które są odpowiedzią obiektu na zadane obciążenie, bezwymiarowy współczynnik rozproszenia energii przyjmuje postać [9, 10]:

$$\Psi = \frac{A_H}{A_S}, \quad (1)$$

gdzie:

$A_H$  – pole powierzchni pętli histerezy;  $A_S$  – pole powierzchni pod krzywą reprezentującą właściwości sprężyste materiału.

Przy tym pole powierzchni  $A_S$  można interpretować jako miarę maksymalnej energii odkształcenia sprężystego. W tym miejscu warto wspomnieć, że bezwymiarowy współczynnik rozproszenia energii  $\Psi$ , nie jest jedyną wielkością charakteryzującą straty w materiale. Teoria drgań wyróżnia również inne wielkości [7, 11]:

$$\zeta = \frac{\Psi}{4\pi}, \quad \delta = 2\pi\zeta = \frac{\Psi}{2}, \quad (2)$$

gdzie:

$\zeta$  – bezwymiarowy współczynnik tłumienia;  $\delta$  – logarytmiczny dekrement tłumienia.

Równania (1) i (2) uwzględniają wszystkie czynniki wywołujące straty energii, przy czym bezwymiarowe współczynniki rozproszenia energii należy wyznaczać indywidualnie dla poszczególnych obiektów na podstawie badań laboratoryjnych. Sformułowanie matematycznego modelu tłumienia, który uwzględniałby wszystkie zjawiska zachodzące w materiale, nie jest zadaniem prostym i z reguły prowadzi do nieliniowych związków. Z tego też względu w obliczeniach inżynierskich zakłada się, że siła oporu jest wielkością zależną od prędkości, a współczynnik charakteryzujący ilość rozpraszanej energii nazywa się współczynnikiem tłumienia wiskotycznego. Należy zdawać sobie sprawę, że zdefiniowany w taki sposób opór wiskotyczny jest słuszny jedynie dla niewielkich prędkości, co wynika z analogii do układów hydraulicznych, tj. przemieszczający się tłoczek w ośrodku lepkiem o przepływie laminarnym [1]. Bardzo często w badaniach modelowych tłumienie wiskotyczne, przyjmuje się jako tłumienie zastępcze równoważące inne rodzaje tłumienia:

$$b = \frac{\Psi \cdot c}{\omega}, \quad (3)$$

gdzie:

$b$  – współczynnik tłumienia;  $c$  – współczynnik sztywności;  $\omega$  – częstość siły obciążającej.

Równanie (3) reprezentuje wartość jednostkowych oporów rozproszenia energii na jednostkę prędkości. W celu efektywnego korzystania z tej zależności konieczne jest zidentyfikowanie sztywności badanego obiektu. Niezbędną czynnością jest wówczas wydzielenie z zarejestrowanych danych zarówno fazy obciążenia, jak i odciążenia. Tak przetworzone dane pomiarowe następnie aproksymuje się jedną z metod analizy regresyjnej, przy czym funkcje aproksymujące najczęściej przyjmuje się dowolnie, a dopiero później modyfikuje, tak by uzyskać najlepsze dopasowanie. Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych stwierdzono, że krzywe charakteryzujące fazę obciążania i odciążenia lin można z bardzo dużą dokładnością opisać funkcjami wielomianowymi [8], przyjmującymi postać:

$$\begin{aligned} F_{OB}(q) &= a_1 \cdot q + a_2 \cdot q^2 + a_3 \cdot q^3, \\ F_{OD}(q) &= b_1 \cdot q + b_2 \cdot q^2 + b_3 \cdot q^3, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

$F_{OB}$ ,  $F_{OD}$  – krzywe odwzorowujące fazę obciążania i odciążania,  $a_i$ ,  $b_i$  – współczynniki wielomianów modelujących krzywe obciążenia i odciążania;  $q$  – przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej.

Jawne reprezentacje funkcji obciążenia  $F_{OB}$  i odciążania  $F_{OD}$  umożliwiają bezpośrednio wyznaczenie wartości bezwymiarowego współczynnika rozproszenia energii wprost z równania:

$$\Psi = \frac{\int_0^{q_1} F_{OB}(q) dq - \int_0^{q_1} F_{OD}(q) dq}{\int_0^{q_1} F_S(q) dq}. \quad (5)$$

Kolejnym etapem badań jest identyfikacja właściwości sprężystych przy uwzględnieniu faktu, że zarejestrowane charakterystyki siłowo-przemieszczeniowe badanych próbek lin wykazują cechy nieliniowe. Z tego też względu w dalszym ciągu artykułu przedstawiono niezbędne zależności przydatne do oceny właściwości sprężystych liny. Stosując wyznaczone krzywe obciążenia i odciążania (4), oblicza się charakterystykę statyczną  $F_S$ :

$$F_S(q) = \frac{F_{OB}(q) + F_{OD}(q)}{2}. \quad (6)$$

Należy zadawać sobie sprawę, że wartości liczbowe siły obliczone na podstawie równania (6) odnoszą się do konkretnych przemieszczeń trawersy maszyny wytrzymałościowej, przy czym przemieszczenie trawersy jest tożsame z wydłużeniem liny. Wstępnie przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że w przypadku odwzorowania krzywych obciążenia i odciążania równaniami (4) najlepsze dopasowanie wartości liczbowych zależności (6) uzyskuje się z zastosowaniem funkcji wielomianowej danej równaniem:

$$F_S(q) = d_1 \cdot q + d_2 \cdot q^2 + d_3 \cdot q^3. \quad (7)$$

Na podstawie równania (7) obliczenie sztywności nie stwarza już większych trudności, gdyż jest ona dana zależnością:

$$c(q) = \frac{F_S}{q} = d_1 + d_2 \cdot q + d_3 \cdot q^2. \quad (8)$$

Równania od (4) do (8) stanowią formalną podstawę identyfikacji parametrów fizycznych lin. Tak zidentyfikowane właściwości mechaniczne dostarczają ogólnego poglądu w odniesieniu do charakteru zmian właściwości mechanicznych liny podczas jej cyklicznego obciążania i odciążania.

#### 4. WYNIKI IDENTYFIKACJI WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH LINY

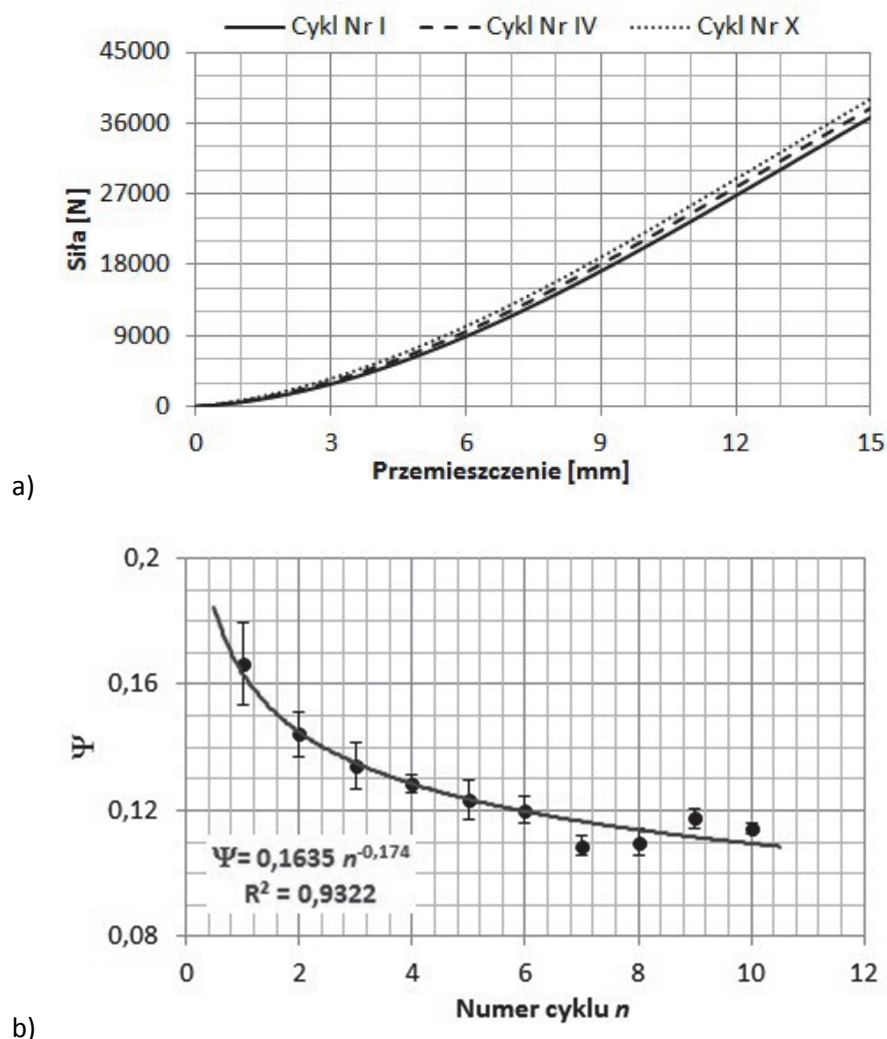
W celu efektywnego stosowania zależności zamieszczonych w punkcie 3 konieczne jest numeryczne przetworzenie danych. Przetwarzanie to wiąże się z wydzieleniem z charakterystyk siłowo-przemieszczeniowych poszczególnych cykli obciążeniowych, jak również krzywych odpowiadających odpowiednio procesowi obciążania i odciążania liny. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki liny obciążanej do wartości 45 kN.

Tablica 1

Wyniki identyfikacji liny obciążanej do wartości 45 kN

Nr badania	Nr cyklu	Współczynniki równania (7)			$\Psi$
		$d_1$	$d_2$	$d_3$	
1	1	377,49	232,58	-6,13	0,140
	2	502,89	220,43	-5,69	0,132
	3	540,07	228,74	-6,19	0,123
	4	509,13	235,01	-6,42	0,124
	5	562,95	229,30	-6,23	0,115
	6	506,95	239,69	-6,67	0,115
	7	1460,50	130,03	-2,91	0,104
	8	1501,10	123,75	-2,69	0,102
	9	478,62	237,74	-6,47	0,115
	10	593,12	225,25	-6,02	0,112
2	1	95,03	237,30	-5,86	0,183
	2	314,28	226,99	-5,68	0,156
	3	317,50	234,17	-6,01	0,148
	4	393,37	233,76	-6,10	0,134
	5	415,74	229,36	-5,89	0,135
	6	457,54	231,89	-6,08	0,129
	7	1473,20	109,54	-1,90	0,108
	8	1407,10	125,69	-2,54	0,115
	9	474,15	234,24	-6,23	0,124
	10	589,02	221,34	-5,79	0,117
3	1	207,22	227,46	-5,61	0,176
	2	322,52	235,81	-6,19	0,144
	3	417,24	231,69	-6,08	0,131
	4	468,75	225,14	-5,85	0,127
	5	437,78	234,04	-6,16	0,119
	6	491,25	228,06	-5,97	0,116
	7	491,74	230,21	-6,09	0,115
	8	575,79	220,00	-5,71	0,113
	9	581,67	226,41	-6,03	0,114
	10	512,75	232,07	-6,18	0,113

Zidentyfikowane wartości liczbowe (zestawione w tablicy 1) z trzech kolejnych badań uśredniono, po czym przedstawiono je graficznie na rysunku 3.



Rys. 3. Wpływ liczby cykli na: a) charakterystykę statyczną, b) współczynnik rozproszenia energii  
 Fig. 3. Influence number of cycles for: a) static characteristics, b) energy dissipation factor

Przedstawione wykresy krzywych ilustrują wpływ liczby cykli obciążeniowych na przebieg charakterystyk statycznych (rys. 3a) oraz współczynnika rozproszenia energii (rys. 3b). Wykresy charakterystyk statycznych wskazują, że wraz z każdym kolejnym cyklem obciążeniowym lina staje się coraz bardziej sztywna. Z kolei na podstawie obserwacji wartości współczynnika rozproszenia energii można stwierdzić, że z każdym kolejnym cyklem obciążeniowym właściwości dyssypacyjne liny ulegają osłabieniu. Uzyskane wyniki identyfikacji właściwości tłumiących świadczą o tym, że dla niższych wartości obciążeń współczynnik rozproszenia energii przyjmuje wyższe wartości. Należy wiązać to z faktem, że splotki drutów liny nie zacisnęły się na rdzeniu jak w przypadku dużo większych obciążeń.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz numerycznych określono charakterystyki statyczne badanych lin. Przedstawione charakterystyki wskazują, że wraz z przyrostem kolejnych cykli obciążeniowych właściwości sprężyste liny wzrastają. Jest to związane w głównej mierze z osadzaniem splotek na rdzeniu włókiennym. W odniesieniu natomiast do współczynników rozproszenia energii można stwierdzić, że wraz z każdym kolejnym cyklem obciążeniowym zdolność liny do rozpraszania energii ulega pogorszeniu.



Zidentyfikowane w artykule wielkości mechaniczne liny można stosować skutecznie podczas symulacji komputerowych np. mechanizmu podnoszenia suwnicy. W tym miejscu warto wspomnieć, że oszacowane wartości sztywności są zbliżone do tych, które uzyskałoby się przy zastosowaniu uproszczonych zależności, zamieszczonych w pracach [2, 5, 12].

*Zrealizowane badania były współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego „Aktywizacja społeczności akademickiej, jako element realizacji Regionalnej Strategii Innowacji” POKL.08.02.01-24-019/08”. Praca była realizowana jako część BKM-297/RT3/2012 i BKM-511/RT3/2013.*

## **Bibliografia**

1. Arczewski K., Pietrucha J., Szuster J.T.: Drgania układów fizycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
2. Golis B., Pilarczyk J.W., Muskalski Z.J., Błażejowski Z.: Liny stalowe. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006.
3. Haniszewski T., Gąska D.: Line 6x19 seale +FC sZ hysteresis determination, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport, z. 73, Gliwice 2011, s. 21-30.
4. Haniszewski T.: Modelowanie dynamiki lin stalowych w konstrukcjach maszyn transportowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2013.
5. Hankus J.: Budowa i własności mechaniczne lin stalowych. GIG, Katowice 2000.
6. Harris C.M., Piersol A.G.: Harris' Shock And Vibration Handbook 5th Ed., McGraw-Hill, 2002.
7. Kruszewski J., Sawiak S., Wittbrodt E.: Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji, Warszawa 1999.
8. Margielewicz J., Haniszewski T., Gąska D., Pypno C.: Badania modelowe mechanizmów podnoszenia suwnic. Wydawnictwo J&L Leszek Żochowski, Katowice 2013.
9. Markusik S.: Reologia taśm przenośnikowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
10. Opracowanie zbiorowe: Wspomaganie konstruowania układów redukcji drgań i hałasu maszyn, WNT, Warszawa 2001.
11. Osiński Z. (red.): Tłumienie drgań, PWN, Warszawa 1997.
12. Tytko A.: Eksploatacja lin stalowych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2003.
13. Katalog lin, [http://www.kr-poland.pl/img/l\\_st\\_normy/Normseile\\_6x19\\_Seale.pdf](http://www.kr-poland.pl/img/l_st_normy/Normseile_6x19_Seale.pdf), 2014.04.03.
14. PN-EN ISO 6892-1:2010 - Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.