

Jan Hankus

WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA LIN WYCIĄGOWYCH NOŚNYCH

Streszczenie

Współczynnik bezpieczeństwa liny wyciągowej jest pojęciem bardzo ważnym, mającym istotne znaczenie na etapie projektowania, doboru lin i eksploatacji górniczych wyciągów szybowych. Na przykład przy zmniejszeniu współczynnika bezpieczeństwa lin nośnych o około 30% można uzyskać znacznie korzystniejsze zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym, parametry wyciągu szybowego. Obecnie przez współczynnik bezpieczeństwa górniczych lin wyciągowych rozumie się stosunek rzeczywistej siły zrywającej linę w całości do maksymalnego obciążenia statycznego.

Badania teoretyczne i wieloletnie doświadczenia ruchowe prowadzone w różnych krajach wykazały, że współczynnik bezpieczeństwa powinien być uzależniony od typu wyciągu i jego przeznaczenia, warunków przeginania liny, głębokości ciągnięcia, a także od konstrukcji liny. Znalazło to odzwierciedlenie w formułach na obliczanie wymaganego współczynnika bezpieczeństwa, które jednak w różnych krajach są różne.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że współczynniki bezpieczeństwa maleją z głębokością ciągnięcia i w szybach głębokich osiągają bardzo małe wartości ($m = 4-3$), co nasuwa pytanie, jaki jest wpływ zmiany współczynnika bezpieczeństwa na trwałość i niezawodność lin stalowych.

Przeprowadzone w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych Głównego Instytutu Górniczego badania doświadczalne wykazały, że wraz ze wzrostem obciążenia rozciągającego linę, czyli zmniejszania się współczynnika bezpieczeństwa, w tych samych warunkach przeginania, maleje trwałość zmęczeniowa lin stalowych. Procentowy spadek trwałości zmęczeniowej jest większy niż procentowa zmiana współczynnika bezpieczeństwa.

Badania doświadczalne wykazały również, że dobre przybliżenie zależności zmiany trwałości zmęczeniowej od zmiany współczynnika bezpieczeństwa, można uzyskać na modelach empirycznych (regresyjnych) w formie krzywej wykładniczej lub potęgowej.

Wraz ze spadkiem wartości współczynnika bezpieczeństwa szybciej pojawiają się pierwsze pęknięcia drutów, natomiast ich sumaryczna liczba tuż przed zerwaniem próbki maleje.

Spadek wartości współczynnika bezpieczeństwa w warunkach badań laboratoryjnych wywiera silny wpływ na przebieg funkcji niezawodności. Bliskie jedności prawdopodobieństwo zerwania badanej próbki, przy współczynniku bezpieczeństwa 5, wystąpiło przy przeszło dwukrotnie mniejszej liczbie cykli zmęczeniowych niż próbki badanej przy współczynniku bezpieczeństwa 8,5.

Factors of safety of hoisting ropes

Abstract

Factors of safety of hoisting ropes is a very important notion, has a great importance on period of project design, ropes selection and exploitation of mining shafts installations. For example, decreasing factors of safety ratio about near 30%, it ropes is possible to get advantageous, considerably equal in technical and economic respect, parameters of shafts extraction. Presently by safety ratio of carrying lines is understood as relation of real power breaking lines totally to maximum statistic load.

Theoretical researches and many years experiences led in different countries have presented, that factor of safety should be subordinated with type of extraction and its destination, conditions ropes bending, depth of draw, as well as with rope construction. It found a mirror in the formula on scaling of required factor of safety which is different in different countries.

Carried analysis shows that factor of safety diminish with depth of draw and in deep wells achieve very small values ($m = 4-3$), what suggest question about change factor of safety influence on constancy and reliability of steel lines.

Carried researches in Laboratory of Rope and Shaft Equipment of Central Mining Institute have shown, that along an incrementation of load stretching line so decreasing ratio, constancy of line diminishes also. Percentage decreasing of constancy is bigger then percentage change factor of safety.

Experimental researches have shown also that good approximation of dependence of constancy change from factor of safety change can be obtained on empirical (regressive) models in the form of exponential or power curve. Decreasing value factor of safety, first cracks of wires appear faster, however, its number before breaking of sample diminish.

Decreasing value factor of safety in laboratory researches has important influence on course of reliability function. Close unity probability of breaking of researched sample at factor of safety 5, has appear smaller then twice number of cycles then sample researched at safety ratio 8,5.

WSTĘP

Współczynnik bezpieczeństwa liny wyciągowej nowej najogólniej można określić jako stosunek siły zrywającej linę P do maksymalnego obciążenia liny podczas eksploatacji Q . Wyraża się go wzorem

$$m = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

gdzie:

P – siła zrywająca linę,

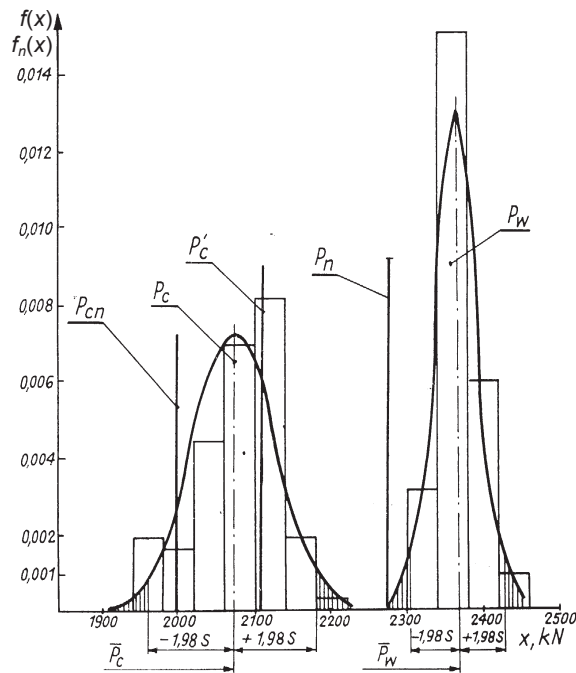
Q – maksymalne obciążenie liny podczas eksploatacji.

Podczas wieloletnich badań nad bezpieczeństwem lin siłę zrywającą linę określano w różny sposób, co wynikało ze złożonej budowy lin, złożonego procesu ich wykonywania, a także z konieczności spełnienia wymagań dyktowanych przez użytkowników [5]. Graficzną interpretację różnych określeń siły zrywającej linę, jakie są stosowane w praktyce w zależności od konkretnych potrzeb, ilustruje rysunek 1.

Przedstawiono na nim pięć określeń siły zrywającej linę stalową, którymi są:

- nominalna siła zrywająca linę P_n ,
- sumaryczna siła zrywająca linę P_w ,
- rzeczywista siła zrywająca linę P_c ,
- teoretyczna siła zrywająca linę w całości P'_c ,
- nominalna siła zrywająca linę w całości P_{cn} .

W przypadku lin tej samej konstrukcji, średnicy i nominalnej wytrzymałości drutów na rozciąganie R_m , siły P_w i P_c są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym. Jako wartości stałe przyjmuje się natomiast siły P_n , P'_c i P_{cn} . Interpretacja graficzna ułatwia zrozumienie i ilościową ocenę podstawowego parametru wytrzymałościowego, jakim jest niewątpliwie siła zrywająca linę stalową. Oznacza to, że podstawiając do zależności (1) wartości odpowiadające różnym określeniom siły zrywającej linę, otrzymuje się różne wartości współczynnika bezpieczeństwa. Również obciążenie liny Q podczas eksploatacji jest zmienne i określane z pewnym przybliżeniem, co wpływa na zakres zmian faktycznej wartości współczynnika bezpieczeństwa.



Rys. 1. Graficzna interpretacja różnych określeń sił zrywających liny trójkątnospłotkowe $\phi 56$ mm: x – wartość zmiennej losowej siły zrywającej linę, $f(x)$ i $f_n(x)$ – gęstość prawdopodobieństwa rozkładu normalnego

Fig. 1. Graphic interpretation of different terms of power breaking triple tangle lines $\phi 56$ mm: x – variable breaking the line value, $f(x)$ and $f_n(x)$ – density of probability of normal disposition

Według obowiązujących przepisów [11], współczynnik bezpieczeństwa górniczych lin wyciągowych stanowi stosunek rzeczywistej siły zrywającej linę w całości P_c do maksymalnego obciążenia statycznego Q . Wartość siły P_c wyznacza się w statycznej próbie rozciągania aż do zerwania liny lub też oblicza się z zależności

$$P_c = \eta_0 R_m F \quad (2)$$

gdzie:

η_0 – nominalna sprawność wytrzymałościowa liny na rozciąganie [5],

R_m – nominalna wytrzymałość drutów na rozciąganie,

F – przekrój nośny liny nowej.

1. WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA WYMAGANE PRZEZ PRZEPISY

Do 1973 roku według obowiązujących wówczas przepisów bezpieczeństwa górniczego i Przepisów Technicznej Eksploatacji Kopalń (PTEK) [8], lina w bębnowym urządzeniu wyciągowym powinna mieć statyczny współczynnik bezpieczeństwa co

najmniej 6 przy wyciąganiu urobku i 8 do jazdy ludzi. W wyciągach z kołem pędym Koepe wymagany współczynnik bezpieczeństwa wynosił 7 w przypadku wyciągania urobku i 9 do jazdy ludzi. Współczynnik bezpieczeństwa był obliczany w odniesieniu do sumarycznej siły zrywającej linę P_w , bez uwzględnienia głębokości szybu.

Długoletnie doświadczenia ruchowe z eksploatacji lin wyciągowych w wielu krajach wykazały, że ich trwałość i niezawodność w znacznym stopniu zależą od przyjętego na początku współczynnika bezpieczeństwa odnoszącego się do obciążenia statycznego [2].

Jest oczywiste, że współczynnik bezpieczeństwa nie może mieć jednakowej wartości i być niezależny od warunków zewnętrznych. Doświadczalnie ustalono, że współczynnik bezpieczeństwa powinien być określony z uwzględnieniem następujących czynników [2]:

- typu wyciągu i jego przeznaczenia,
- liczby kół linowych, tj. liczby przegięć liny,
- stosunku średnicy organu napędowego do średnicy liny (D/d),
- wysokości ciągnięcia.

W różnych krajach czynniki te występują we wzorach na obliczanie wymaganego współczynnika bezpieczeństwa [2]. W Anglii i Australii wymagany współczynnik bezpieczeństwa oblicza się według złożonej zależności, z uwzględnieniem większości wymienionych czynników

$$m = 1,5 \frac{\left(\frac{D}{d} + c \right)}{\frac{D}{d} + 1,005 H \sqrt{H} - 3,5} \quad (3)$$

gdzie:

$c = 35$ przy braku kół kierujących i $c = 43$ przy występowaniu kół kierujących,
 H – maksymalna długość zwisającej liny, m.

Zależność ta została sformułowana na podstawie wieloletnich obserwacji eksploatacji lin, przy czym założono, że żadna lina nie może pracować dłużej niż trzy lata.

W Kanadzie przy doborze lin do wyciągów z kołem ciernym przyjmuje się zależność

$$m = 9,5 - 0,00075 H \quad (4)$$

przy czym minimalny współczynnik bezpieczeństwa nie może być mniejszy niż 5,5.

W Szwecji minimalne współczynniki bezpieczeństwa określa się zależnościami:

– dla wyciągów do transportu urobku

$$m = 6 - 0,00075 H \geq 5,0 \quad (5)$$

– dla wyciągów do transportu urobku i jazdy ludzi

$$m = 8 - 0,00075 H \geq 6,0. \quad (6)$$

W Niemczech dopuszczalne współczynniki bezpieczeństwa oblicza się z zależności:

$$m = 7,2 - 0,0005 H \quad (7)$$

$$m = 9,5 - 0,001 H \quad (8)$$

odpowiednio dla wyciągów do transportu urobku i jazdy ludzi.

Empiryczną zależność zmiany współczynnika bezpieczeństwa od głębokości opracowano w ZSRR na podstawie wyników badań 728 lin wyciągowych [15]

$$m = 7,5 - 1,65H^{0,4} \quad (9)$$

gdzie głębokość H podawana jest w kilometrach.

W RPA dla wyciągów bębnowych dopuszczalne współczynniki bezpieczeństwa zarówno do transportu urobku, jak i jazdy ludzi oblicza się z zależności [7, 12]

$$m = 2500/(4000 + H) \quad (10)$$

W Polsce według aktualnie obowiązujących przepisów dla podziemnych zakładów górniczych [11], w wyciągach jedno- i wielolinowych dla głębokości ciągnięcia do 400 m przyjmuje się stałe wartości współczynników bezpieczeństwa, które przykładowo dla jazdy ludzi wynoszą:

- dla wyciągów jednolinowych $m = 7,5$,
- dla wyciągów wielolinowych $m = 7,2$.

Dla głębokości ciągnięcia od 400 do 1200 m współczynniki maleją zgodnie z zależnościami:

$$- \text{ dla wyciągów jednolinowych } m = 7,5 - 0,001(H - 400), \quad (11)$$

$$- \text{ dla wyciągów wielolinowych } m = 7,2 - 0,001(H - 400), \quad (12)$$

gdzie H oznacza długość liny od kół linowych, bębna lub koła pędnego do naczynia w najniższym położeniu w metrach.

Dla głębokości ciągnięcia większej od 1200 m wymagany współczynnik bezpieczeństwa jest stały i ma wartość obliczoną dla głębokości równej 1200 m.

Dla porównania, dopuszczalne współczynniki bezpieczeństwa stosowane w różnych krajach zestawiono w tabelicy 1.

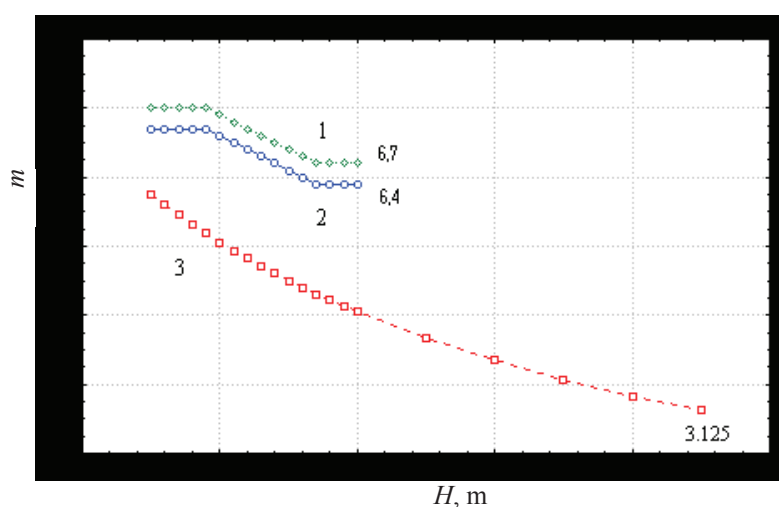
Z danych zawartych w tabelicy 1 wynika, że współczynniki bezpieczeństwa maleją z głębokością ciągnięcia. Ten rezultat osiągnięty został w różny sposób: na bazie teorii wytrzymałości zmęczeniowej i metody statystyki matematycznej. Zmniejszenie współczynnika bezpieczeństwa lin nośnych ze wzrostem głębokości ciągnięcia jest w pełni uzasadnione, gdyż największe sumaryczne naprężenia w drutach lin występują w czasie ich zginania na kołach i bębnach. W szybach głębokich cykl jazdy jest dłuższy i liczba przecięć poszczególnych przekrojów liny w jednostce czasu jest mniejsza niż w szybach płytkich. Osiągnięcie więc tej samej trwałości lin jest możliwe przy mniejszym współczynniku bezpieczeństwa. Z analizy danych zawartych w tabelicy 1 wynika również, że od głębokości 600 m najmniejsze współczynniki bezpieczeństwa mają liny wyciągowe w USA i RPA.

Tablica 1. Współczynniki bezpieczeństwa lin wyciągowych nośnych stosowane w różnych krajach

Kraj	Współczynnik bezpieczeństwa						Uwagi
	Długość zwisającej liny H , m						
	150	300	600	900	1200	1500	
Polska jazda ludzi*)	6,5	6,5	6,3	6,0	5,7	5,7	wyciągi jednolinowe – wydobywanie wyciągi wielolinowe – wydobywanie
	6,2	6,2	6,0	5,7	5,4	5,4	
Anglia jazda ludzi*)	7,2	7,0	6,8	6,6	6,4	6,4	$D/d = 80$, wydobywanie $D/d = 100$, bez kół linowych
	6,5	6,4	6,1	6,0	5,8	5,7	
Kanada	9,4	9,3	9,0	8,8	8,6	8,4	wyciągi z tarczą pędną
Szwecja	5,9	5,8	5,6	5,3	5,1	5,0	wydobywanie
	7,9	7,8	7,6	7,3	7,1	6,9	wydobywanie i jazda ludzi
Niemcy	7,1	7,0	6,9	6,7	6,6	6,4	wydobycie jazda ludzi
	9,3	9,2	8,9	8,6	8,3	8,0	
Rosja według przepisów	6,5	6,5	6,5	5,8	5,4	5,0	wydobywanie
	7,5	7,5	7,5	6,8	6,0	5,5	wydobywanie i jazda ludzi
	9,0	9,0	9,0	7,8	7,0	6,3	jazda ludzi
	według zależności (9)	6,73	6,48	6,16	5,92	5,73	5,56
USA	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	4,0	nowa linia
	6,4	5,8	5,0	4,3	3,6	3,6	wymiana liny
RPA	6,02	5,81	5,43	5,10	4,81	4,54	wyciągi bębnowe – wydobywanie i jazda ludzi

*) Współczynniki bezpieczeństwa lin dla jazdy ludzi zwiększa się o 1.

Na rysunku 2 dla przykładu porównano wymagane współczynniki bezpieczeństwa lin wyciągowych nośnych w Polsce i w RPA.



Rys. 2. Wymagane współczynniki bezpieczeństwa lin wyciągowych nośnych: m – współczynnik bezpieczeństwa, H – długość liny, 1 – wyciągi jednolinowe do jazdy ludzi, 2 – wyciągi wielolinowe do jazdy ludzi, 3 – wyciągi bębnowe do jazdy ludzi i transportu urobku (RPA)

Fig. 2. Required safety ratios of carrying lines: m – safety ratio, H – line length, 1 – one-cable extraction for riding of people, 2 – multicable extraction for riding of people, 3 – tumbler extraction for riding of people and output

2. ZNACZENIE PRAKTYCZNE RÓŻNYCH WARTOŚCI WSPÓLCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA

Jak wspomniano na wstępie przyjmowane wartości współczynników bezpieczeństwa mają istotne znaczenie zarówno na etapie projektowania, doboru lin, jak i eksploatacji górniczych wyciągów szybowych. W tabelicy 2 zestawiono wybrane parametry mechaniczne wyciągów szybowych, określone dla współczynników bezpieczeństwa $m = 6,4$ i $m = 4,5$, przy jednakowej głębokości ciągnięcia i jednakowej masie użytecznej urobku.

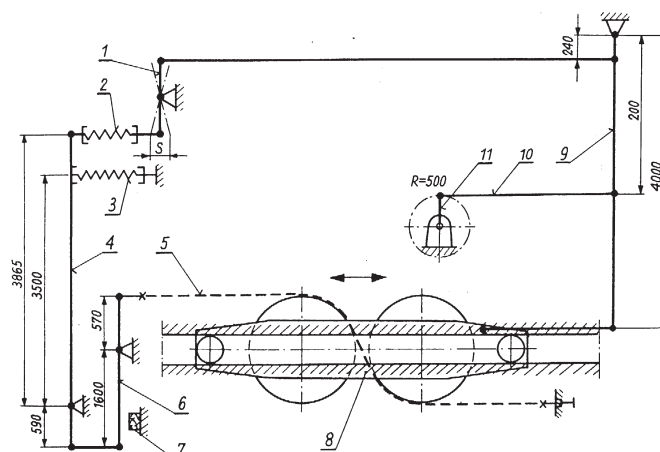
Tablica 2. Parametry mechaniczne wyciągów szybowych

Charakterystyka	Współczynnik bezpieczeństwa, m	
	6,4	4,5
Głębokość ciągnięcia H_g , m	1000	1000
Masa użyteczna urobku Q_u , kg	20 000	20 000
Średnica liny nośnej d , mm	65	52
Masa 1 m liny nośnej q , kg	18,2	11,4
Masa martwa Q_m , kg	41 013	33 269
Średnica bębna D_B , mm	6000	5000
Moment zamachowy GD^2 , N·m ²	2 942 000	1 276 000
Średnica koła linowego D , m	6 000	5000
Moment zamachowy GD^2 , N·m ²	2 942 000	1 276 000
Stosunek Q_m/Q_u	2,05	1,66

Z porównania wynika, że przy zmniejszeniu współczynnika bezpieczeństwa lin o około 30% uzyskano znacznie korzystniejsze parametry zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. Lina nośna o mniejszej o 13 mm średnicy może mieć prostszą budowę, tym samym łatwiejszą do oceny stanu zużycia podczas badań ruchowych. Mniejsze mogą być również elementy współpracujące z liną, jak: bęben, koła linowe i zawiesia, co obniża wielkość mas ruchowych i straty wynikające z ich rozruchów. Umożliwia to budowę mniejszych napędów, wież i hal maszyn.

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE WPLYWU ZMIANY WSPÓLCZYNNIKA BEZPIECZEŃSTWA NA TRWAŁOŚĆ LIN STALOWYCH

W celu określenia wpływu różnych wartości cyklicznie zmiennych obciążeń na trwałość zmęczeniową lin stalowych, w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych Głównego Instytutu Górnictwa wykonano badania na maszynach zmęczeniowych typu P4-GIG-2 (średnica lin od 40 do 65 mm) i P5-GIG-3 (średnica lin od 10 do 20 mm). Schemat kinematyczny maszyny P4-GIG-2 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej typu P4-GIG-2: 1 – wahacz górny, 2 – sprężyna pulsacyjna, 3 – sprężyna napinająca, 4 – wahacz tylny, 5 – lina, 6 – wahacz środkowy, 7 – belka oporowa, 8 – wózek, 9 – wahacz przedni, 10 – łącznik, 11 – korba

Fig. 3. Cinematic scheme of machine P4-GIG-2 type: 1 – overhead oscillator, 2 – pulsating spring, 3 – straining spring, 4 – back oscillator, 5 – line, 6 – middle oscillator, 7 – resistance beam, 8 – wheelchair, 9 – front oscillator, 10 – adapter, 11 – crank

W maszynach do badań zmęczeniowych w znacznym stopniu mogą być odwzorowane warunki, w jakich pracują liny w urządzeniach wyciągowych, dźwigowych itp. Liny podlegają dwustronnemu (dwukierunkowemu) zginaniu przy sile rozciągającej statycznej lub pulsującej, z obrotem lub bez obrotu próbki dookoła własnej osi. Badany odcinek chłodzi się natryskiem wody w celu zabezpieczenia go przed nadmiernym nagrzewaniem i wyciekaniem smaru.

Maszynę typu P4-GIG-2 wraz z zestawem aparaturowym do pomiaru zmian sił w linie podczas badania zmęczeniowego przedstawiono na zdjęciu 1.



Fot. 1. Zestaw aparatury do pomiaru zmian sił w linie podczas badania zmęczeniowego w maszynie P4-GIG-2

Photo 1. Equipment suit for measurement of power change in lines during research in machine P4-GIG-2

W maszynie tej (podobnie jak w maszynie typu P5-GIG-3) realizowany jest jednostronny dodatni cykl zmiany sił w linie. Szczegółowy opis badań zmęczeniowych lin podano w publikacjach [4, 5].

Wyniki badań zmęczeniowych odcinków lin nowych badanych przy różnych wartościach współczynników bezpieczeństwa, zestawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Wyniki badań zmęczeniowych lin przy różnych wartościach współczynników bezpieczeństwa

Symbol liny	Konstrukcja liny	Średnica liny d , mm	Liczba próbek J	Współczynnik bezpieczeństwa m	Liczba cykli N_o	Liczba cykli N_c	Liczba pęknięć drutów n_c	Wydłużenie liny E_c %	Spadek trwałości, %	Zmiana współczynnika bezpieczeństwa m %
A	6x19 +FN przeciwwzłita $R_m = 1670$ MPa	12	5	7,4	-	24263*)	-	-	0	0
			5	5,3	-	11746	-	-	52	28,4
B	WS6x26+FN przeciwwzłita $R_m = 1670$ MPa	12	5	6,7	-	38913*)	-	-	0	0
			5	4,8	-	22921	-	-	41,1	28,4
C	WS6x26+IW współwzłita $R_m = 1670$ MPa	12	5	6,7	-	77163*)	-	-	0	0
			5	4,8	-	44836	-	-	41,9	28,4
D	S6x19+FN przeciwwzłita $R_m = 1570$ MPa	12	2	9,80	41950	72375	158	0,645	0	0
			2	6,28	23927	33096	95	0,664	54,3	36
E	WS6x36+FN współwzłita $R_m = 1670$ MPa	50	1	8,5	68908	90724	62	1,348	0	0
			1	8,0	63520	74232	51	1,047	18,2	5,9
			1	7,0	42745	57577	43	0,994	36,5	17,6
			1	6,0	43968	52161	28	0,978	42,5	29,4
F	WS6x36+FN współwzłita $R_m = 1570$ MPa	50	2	5,65	37684	57849	94	0,881	0	0
			2	5,59	39272	59162	142	0,8461	0	0
					39093	55251	63	0,9494		
					40071	54442	90	0,6393	6,25	1,06

Uwaga: *) wartości średnie, N_o – liczba cykli, po której wystąpiły pierwsze pęknięcia drutów, N_c – liczba cykli aż do zerwania próbki – trwałość zmęczeniowa, n_c – łączna liczba pęknięć drutów na przeginanym w maszynie zmęczeniowej odcinku liny, ε_c – wydłużenie względne liny tuż przed zerwaniem.

Ostatnie kolumny tabelicy 3 zawierają wartości procentowego spadku trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do procentowej zmiany współczynników bezpieczeństwa.

Z danych zawartych w tabelicy 3 wynika, że procentowy spadek trwałości zmęczeniowej jest większy niż procentowa zmiana współczynnika bezpieczeństwa. Im mniejsza jest wartość współczynnika bezpieczeństwa, tym próbki zrywają się przy mniejszej liczbie widocznych zewnętrznych pęknięć drutów. Na przykład w przypadku próbki liny Seale, badanej przy współczynniku bezpieczeństwa 2,49, zerwanie nastąpiło przy dwóch widocznych pękniętych drutach, ale przy nieco większym wydłużeniu.

4. MODELE REGRESYJNE WPŁYWU ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ LIN STALOWYCH

Analiza wyników badań doświadczalnych wykazała, że dobre przybliżenie zależności $N = f(m)$ można uzyskać na modelach empirycznych (regresyjnych) w formie krzywej potęgowej i wykładniczej współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z [1]:

$$- \text{model potęgowy } N(m) = am^b, \quad (13)$$

$$- \text{model wykładniczy } N(m) = a \exp(bm), \quad (14)$$

gdzie:

$N(m)$ – liczba cykli pracy liny,

m – współczynnik bezpieczeństwa,

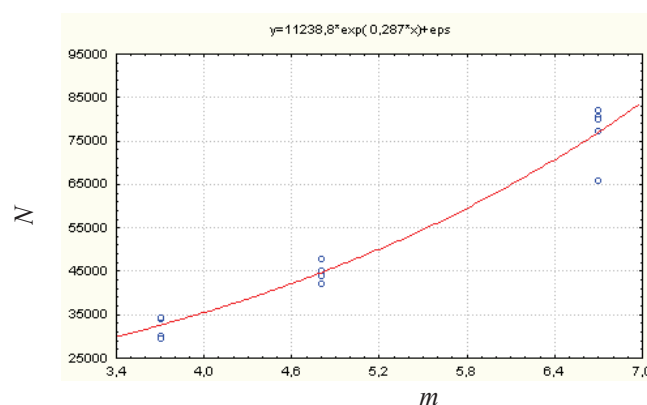
a, b – parametry strukturalne modeli.

Parametry modeli empirycznych badanych odcinków lin zestawiono w tabelicy 4. Podano w niej również wartości stosunku korelacyjnego R .

Tablica 4. Parametry strukturalne modeli empirycznych wpływu zmiany współczynnika bezpieczeństwa na trwałość zmęczeniową lin różnych konstrukcji

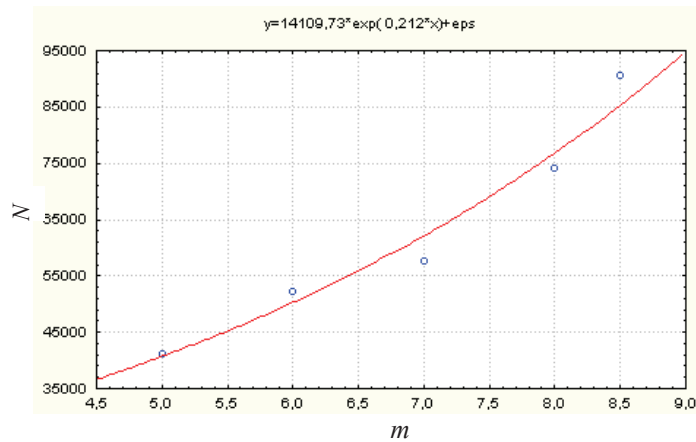
Symbol liny	Model potęgowy			Model wykładniczy		
	a	b	R	a	b	R
A	313,695	2,17175	0,9903	1883,385	0,3452	0,9902
B	2437,871	1,4483	0,9851	5790,365	0,2846	0,987
C	4700,479	1,461	0,981	11238,799	0,2873	0,984
D	1762,916	1,604	0,995	4338,124	0,2962	0,992
E	4276,937	1,3874	0,9741	14109,731	0,2117	0,984
F	0,0798	7,7986	0,9007	23,0216	1,3877	0,9007

Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono przykładowo empiryczne wykładnicze zależności $N = f(m)$ dla liny WS6x26+IWR (rdzeń stalowy) o średnicy 12 mm, liny WS 6x36+FN (rdzeń organiczny), współzwitej o średnicy 50 mm i liny S6x19+FN przeciwzwitej o średnicy 12 mm.



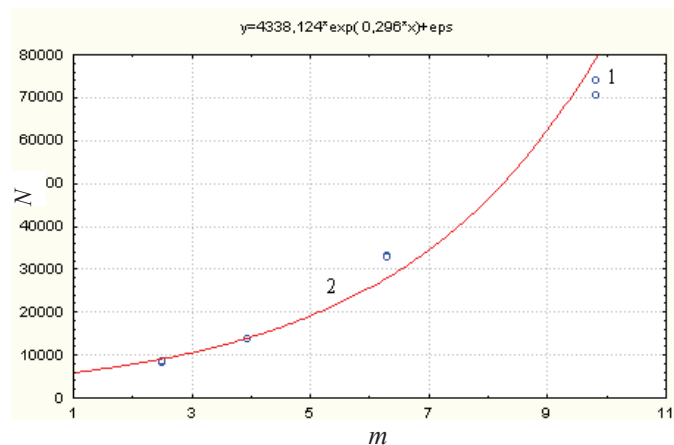
Rys. 4. Zależność trwałości zmęczeniowej N w funkcji współczynnika bezpieczeństwa m liny WS 6x26+IWR o średnicy 12 mm

Fig. 4. Dependence of constancy N in function of safety ratio m of WS 6x26+IWR line with 12 mm of diameter



Rys. 5. Zależność trwałości zmęczeniowej N w funkcji współczynnika bezpieczeństwa m liny WS 6x36 + FN o średnicy 50 mm

Fig. 5. Dependence of constancy N in function of safety ratio m of WS 6x36 +1FN line with 50 mm of diameter



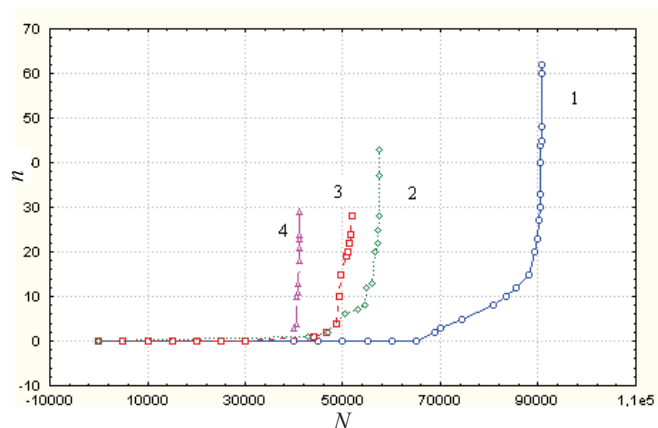
Rys. 6. Zależność trwałości zmęczeniowej N w funkcji współczynnika bezpieczeństwa m liny S 6x19 +FN o średnicy 12 mm: 1 – wyniki badań, 2 – przebieg krzywej empirycznej

Fig. 6. Dependence of constancy N in function of safety ratio m of S 6x19 +1FN line with 12 mm of diameter: 1 – research results, 2 – empirical curve

5. NARASTANIE ZMĘCZENIOWYCH PĘKNIĘĆ DRUTÓW PRZY RÓŻNYCH WSPÓŁCZYNNIKACH BEZPIECZEŃSTWA

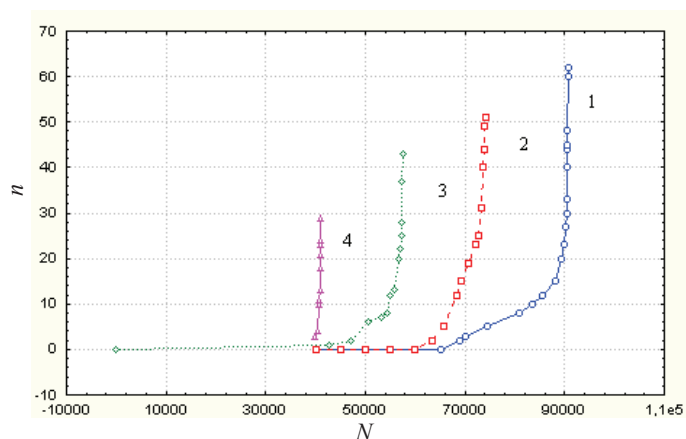
Głównymi mierzalnymi objawami zmęczenia lin w warunkach laboratoryjnych jest pęknięcie drutów i wydłużanie się badanego odcinka. Towarzyszą temu zmiany przekroju nośnego i średnicy liny, a także zmiany własności sprężystych.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wykresy narastania liczby pęknięć n w funkcji liczby cykli N dla próbek lin badanych przy współczynnikach bezpieczeństwa $m = 8,5; 8,0; 7,0; 6,0$ i $5,0$.



Rys. 7. Narastanie liczby pęknięć drutów n próbek linii WS 6x36+FN badanych przy współczynnikach bezpieczeństwa $m = 8,5$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3) i $5,0$ (4); N – liczba cykli

Fig. 7. Increase of number of wire crack n samples of WS 6x36+FN line researched at m safety ratio equal $8,5$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3): $5,0$ (4); N – cycle number



Rys. 8. Narastanie liczby pęknięć drutów n próbek linii WS 6x36+FN badanych przy współczynnikach bezpieczeństwa $m = 8,0$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3) i $5,0$ (4); N – liczba cykli

Fig. 8. Increase of number of wire crack n samples of WS 6x36+FN line researched at m safety ratio equal $8,0$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3): $5,0$ (4); N – cycle number

Zerwanie badanych próbek linii występuje w miejscu o największej liczbie pęknięć. Przebieg krzywych $n = f(N, m)$ jest znacznie zróżnicowany. W początkowym okresie badania aż do około 40 tys. cykli nie stwierdzono pęknięć drutów. Następnie narastanie liczby pęknięć drutów było tym intensywniejsze im większe było obciążenie linii (mniejszy współczynnik bezpieczeństwa). Wzrost szybkości narastania liczby

pęknięć jest wynikiem wzrostu stopnia zmęczenia tworzywa drutów na skutek pracy liny w warunkach cyklicznie zmiennych obciążeń liny.

Analiza wyników badań doświadczalnych wykazała, że dobre przybliżenie zależności $n = f(N)$ można uzyskać na modelach empirycznych (regresyjnych) również w formie krzywej potęgowej lub wykładniczej liczby cykli, co zapisuje się:

$$- \text{model potęgowy } n(N) = cN^a, \quad (15)$$

$$- \text{model wykładniczy } n(N) = c \exp(aN), \quad (16)$$

gdzie:

$n(N)$ – liczba pęknięć drutów,

N – liczba cykli pracy liny,

c, a – parametry strukturalne modeli.

W tabelicy 5 zestawiono parametry modeli empirycznych narastania zmęczeniowych pęknięć drutów lin różnych konstrukcji badanych przy różnych współczynnikach bezpieczeństwa

Tablica 5. Parametry modeli empirycznych narastania zmęczeniowych pęknięć drutów lin różnych konstrukcji

Symbol liny	Współczynnik bezpieczeństwa m	Model potęgowy			Model wykładniczy		
		c	a	R	c	a	R
D	9,80	$2,999 \cdot 10^{-29}$	6,3473	0,976	0,07276	$1,113 \cdot 10^{-4}$	0,955
	6,28	$2,484 \cdot 10^{-30}$	7,0246	0,9297	0,04217	$2,457 \cdot 10^{-4}$	0,911
	3,92	–	–	–	–	–	–
E	8,5	$5,011 \cdot 10^{-54}$	11,061	0,9315	$1,331 \cdot 10^{-4}$	$1,378 \cdot 10^{-4}$	0,9377
	8,0	$3,537 \cdot 10^{-91}$	10,913	0,988	$7,5351 \cdot 10^{-8}$	$2,728 \cdot 10^{-4}$	0,986
	7,0	$4,053 \cdot 10^{-56}$	11,931	0,964	$2,955 \cdot 10^{-5}$	$2,371 \cdot 10^{-4}$	0,971
	6,0	$9,558 \cdot 10^{-98}$	20,874	0,968	$4,333 \cdot 10^{-9}$	$4,340 \cdot 10^{-4}$	0,970
	5,0	–	–	0,968	$3,607 \cdot 10^{-34}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	0,969
F	5,65	$8,248 \cdot 10^{-55}$	11,801	0,988	$8,293 \cdot 10^{-5}$	$2,497 \cdot 10^{-4}$	0,983
	5,65	$4,947 \cdot 10^{-45}$	9,778	0,986	$1,0385 \cdot 10^{-3}$	$2,1283 \cdot 10^{-4}$	0,990
	5,59	$8,086 \cdot 10^{-3}$	7,7737	0,997	$7,604 \cdot 10^{-3}$	$1,6204 \cdot 10^{-4}$	0,996
	5,59	$1,051 \cdot 10^{-35}$	7,8081	0,969	0,0187	$1,5722 \cdot 10^{-4}$	0,953

6. NIEZAWODNOŚĆ LIN STALOWYCH PRZY RÓŻNYCH WARTOŚCIACH WSPÓŁCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA

Tradycyjne metody analizy postępującego zmęczenia jedynie na podstawie liczby dni lub cykli pracy są niewystarczające. Krzywe zmęczenia lin należy opisywać także w zależności od prawdopodobieństwa zniszczenia. Wymaga to opracowania analizy wyników badań zmęczeniowych z wykorzystaniem modeli i teorii niezawodności [1, 5, 14]. W nomenklaturze niezawodnościowej lina stalowa nośna jest zaliczana do obiektów technicznych nieodnawialnych. Zakłada się, że początkowo obiekty takie są zdadne do realizacji nakładanych na nie zadań i zdadność tę utrzymują w pewnym przedziale liczby cykli $[0, N_0]$.

W warunkach laboratoryjnych zmęczeniowe badania niszczące są prowadzone aż do momentu zerwania [4, 5, 8, 9].

Przykładowo, funkcję wiodącą procesu narastania liczby pęknięć drutów zgodnie z (16) opisano krzywą wykładniczą liczby cykli

$$n(N) = c \exp [a (N - N_0)] \quad (17)$$

gdzie:

- $n(N)$ – łączna liczba pęknięć drutów na rozpatrywanym odcinku liny,
- c, a – parametry strukturalne modelu,
- N – liczba cykli pracy liny,
- N_0 – liczba cykli, po której wystąpiły pierwsze pęknięcia drutów.

Analizując przebiegi procesów narastania zmęczeniowych pęknięć drutów zarówno w warunkach badań laboratoryjnych, jak i w czasie eksploatacji ruchowej, stwierdzono, że dla obiektu nieodnawialnego, jakim jest lina wyciągowa nośna, rozkładem czasu zdatności może być trójparametrowy rozkład Weibulla [1]. W takim przypadku parametr a jest nazywany parametrem kształtu, zaś c parametrem skali. Trzeci parametr N_0 nazywa się parametrem przesunięcia. Wynika stąd, że w przypadku trójparametrowego rozkładu Weibulla uszkodzenie obiektu może wystąpić dopiero po upływie początkowej bezawaryjnej eksploatacji w przedziale $(0, N_0)$.

Wykorzystując parametry modeli empirycznych (tabl. 5) opracowano niezawodnościowe modele zmęczenia takie, jak:

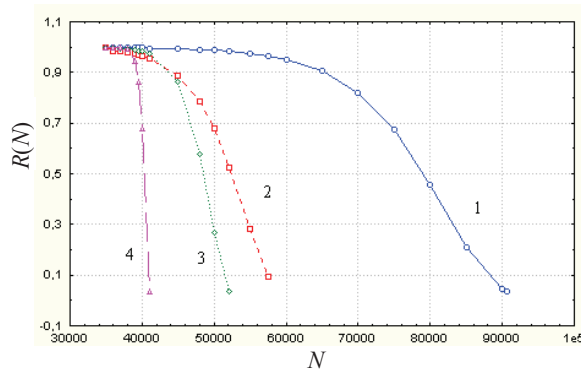
- funkcja niezawodności

$$R(N) = \exp[-n(N)] \quad (18)$$

- funkcja zawodności czyli prawdopodobieństwo zerwania liny

$$F(N) = 1 - R(N) \quad (19)$$

Porównanie wykresów funkcji niezawodności próbek liny typu E (Warrington – Seale o średnicy 50 mm), badanych przy różnych współczynnikach bezpieczeństwa, przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wykres funkcji niezawodności próbek liny WS 6x36+FN badanych przy współczynnikach bezpieczeństwa $m = 8,5$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3) i $5,0$ (4); N – liczba cykli, $R(N)$ – funkcja niezawodności

Fig. 9. Diagram of reliability function of sample of WS 6x36+FN line researched at m safety ratio equal $8,5$ (1): $7,0$ (2): $6,0$ (3): $5,0$ (4); N – cycle number, $R(N)$ – reliability function

Z wykresu wynika, że zmniejszanie się współczynnika bezpieczeństwa w warunkach badań laboratoryjnych, przy małej wartości stosunku D/d , wynoszącym około 30, silnie wpływa na przebieg funkcji niezawodności.

W tabelicy 6 podano natomiast wartości prawdopodobieństwa $F(N)$ wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń, zerwania się poszczególnych próbek liny WS6x36+FN, badanych przy współczynnikach bezpieczeństwa $m = 8,5; 7,0; 6,0$ i $5,0$.

Tablica 6. Prawdopodobieństwo zerwania się odcinków liny 6x36+FN badanych przy różnych współczynnikach bezpieczeństwa w maszynie zmechanizowanej typu P4 GIG-2

Liczba cykli zmęzeniowych N	Prawdopodobieństwo zerwania $F(N)$			
	$m = 5,0$	$m = 6,0$	$m = 7,0$	$m = 8,5$
35000	0	0	0	0
36000	0	0	0,014	0
37000	0,001	0,005	0,018	0,020
38000	0,008	0,007	0,022	0,020
39000	0,053	0,011	0,028	0,030
39500	0,135	0,014	0,032	0,030
40000	0,319	0,017	0,036	0,035
41107	0,964	0,027	0,046	0,040
45000		0,139	0,112	0,060
50000		0,731	0,322	0,012
52161		0,965	0,477	0,017
55000			0,720	0,025
57577			0,904	0,035
60000				0,049
70000				0,179
80000				0,544
90000				0,955
90724				0,964

Uwaga: wartości pogrubione oznaczają prawdopodobieństwo zerwania badanej próbki.

WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

1. Współczynnik bezpieczeństwa liny wyciągowej jest pojęciem bardzo ważnym, mającym istotne znaczenie zarówno na etapie projektowania, doboru lin, jak i eksploatacji górniczych wyciągów szybowych. Obecnie przez współczynnik bezpieczeństwa górniczych lin wyciągowych rozumie się stosunek rzeczywistej siły zrywającej linę w całości P_c do maksymalnego obciążenia statycznego Q .
2. Badania teoretyczne i wieloletnie doświadczenia ruchowe, prowadzone w różnych krajach wykazały, że współczynnik bezpieczeństwa nie może mieć jednakowej wartości. Powinien być uzależniony od typu wyciągu i jego przeznaczenia, warunków przeginania liny, głębokości ciągnięcia, a także od konstrukcji liny. Znalazło to odzwierciedlenie we wzorach na obliczanie wymaganego współczynnika bezpieczeństwa, które w różnych krajach są różne.

3. Z przeprowadzonej analizy wynika, że współczynniki bezpieczeństwa maleją z głębokością ciągnięcia i w szybach głębokich osiągają bardzo małe wartości ($m = 4$ do 3), co nasuwa pytanie, jaki jest wpływ zmiany współczynnika bezpieczeństwa na trwałość i niezawodność lin stalowych.
4. Przeprowadzone w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych GIG badania doświadczalne wykazały, że wraz ze wzrostem obciążenia rozciągającego linę, czyli zmniejszania się współczynnika bezpieczeństwa, w tych samych warunkach przeginalnia maleje trwałość zmęczeniowa lin stalowych. Procentowy spadek trwałości zmęczeniowej jest większy niż procentowa zmiana współczynnika bezpieczeństwa.
5. Badania doświadczalne wykazały, że dobre przybliżenie zależności zmiany trwałości zmęczeniowej od zmiany współczynnika bezpieczeństwa, uzyskuje się na modelach empirycznych (regresyjnych) w formie krzywej wykładniczej lub potęgowej.
6. Wraz ze spadkiem wartości współczynnika bezpieczeństwa szybciej pojawiają się pierwsze pęknięcia drutów, natomiast ich sumaryczna liczba tuż przed zerwaniem próbki maleje.
7. Spadek wartości współczynnika bezpieczeństwa w warunkach badań laboratoryjnych wywiera silny wpływ na przebieg funkcji niezawodności. Prawdopodobieństwo $F(N)$ zerwania próbki badanej, przy współczynniku bezpieczeństwa $m = 5$, bliskie jedności, wystąpiło przy przeszło dwukrotnie mniejszej liczbie cykli zmęczeniowych niż próbki badanej przy współczynniku bezpieczeństwa $m = 8,5$.

Literatura

1. Bobrowski D. (1985): *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach*. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. Dwornikow W.I., Krcelin E.R. (1997): *Teoreticzeskije osnovy dinamiki szachtnowo podjemnowo kompleksa*. Sofia.
3. Hankus J. (2003): *Wpływ zmiany współczynnika bezpieczeństwa na trwałość lin stalowych*. Materiały Sympozjum pt. „Polski system bezpieczeństwa górniczych wyciągów szybowych”. Kraków, AGH, z. 31.
4. Hankus J. (1991): *Badania zmęczeniowe lin stalowych według programu Międzynarodowej Organizacji OIPEEC*. Przegląd Górniczy nr 6.
5. Hankus J. (2000): *Budowa i własności mechaniczne lin stalowych*. Katowice, GIG.
6. Hankus J. i inni (2003): *Badania wpływu zmian współczynnika bezpieczeństwa na trwałość i niezawodność lin stalowych*. Dokumentacja o symbolu komputerowym: 12010303–181. Katowice, GIG.
7. Hankus J. (2001): *Międzynarodowa Konferencja Transportu Szybowego MINE HOISTING 2000*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 2.
8. Kowalczyk J., Z. Steininger (1963): *Liny stalowe*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
9. Kowalczyk J., Szoltysik P. (1974): *Wpływ dwustronnego przeginalnia i zmiennych naprężeń rozciągających na trwałość zmęczeniową lin*. Prace GIG. Komunikat nr 612. Katowice.
10. Kowalskij B.S. (1973): *Srok służby kanata pri pieremiennoj nagruzkie*. Stalnyje Kanaty nr 10. Technika, Kijów.

11. Prawo geologiczne i górnictwo. Przepisy wykonawcze do Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. (Dz. U. Nr 139, poz. 1169). Katowice, GIG 2002.
12. South African Standard SABS 0294 Edition 2000. The performance, operation, testing and maintenance of drum winders relating to rope safety.
13. Stanisław A. (2000): *Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STAISTICA PL na przykładach medycznych* t. 1 (1998), t. 2. Kraków, Stat Soft Polska Sp. z o.o.
14. Warszński M. (1988): *Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych*. Warszawa, PWN.
15. Żurawlew R.A., Babajew N.G. (1969): *O zapasach proczności kanatów*. Stalnyje Kanaty nr 6. Technika, Kijów.

Recenzent: dr inż. Mariusz Szot