

# Badania trwałości zmęczeniowej typowych lin stalowych stosowanych w górniczych wyciągach szybowych

Grzegorz Olszyna , Andrzej Tytko 

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków

---

**Streszczenie:** Kryzys energetyczny w Europie wynikający z wprowadzenia surowych reguł dotyczących importu węglowodorów oraz stosowania węgla kamiennego jako głównego źródła energii spalanej w atmosferze tlenowej ciągle się pogłębia. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w Polsce, gdzie ponad 40% energii elektrycznej pochodzi z elektrowni węglowych. W pełni uzasadnione jest więc podejmowanie działań w celu utrzymania zdolności wydobywczych istniejących szybów przy jednoczesnym zapewnieniu najwyższego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji. W artykule podjęto problematykę trwałości zmęczeniowej konstrukcji lin nośnych stosowanych w górniczych wyciągach szybowych. Przedstawiono w nim aktualne wyniki badań obecnie produkowanych i eksploatowanych typów lin uzyskane podczas prób na maszynie zmęczeniowej. Ich interpretacja pozwala na wyjaśnienie kilku istotnych zagadnień, spośród których najważniejsze dotyczy mechanizmu zużywania się lin. W badaniach zastosowano statystyczne metody opisu zmęczeniowego zużycia lin nośnych w funkcji liczby cykli pracy. Znajomość tego procesu ma kluczowe znaczenie, ponieważ jego charakter jest nieliniowy, a bezpieczeństwo eksploatacji zależy od podjęcia właściwej decyzji we właściwym momencie użytkowania.

**Słowa kluczowe:** liny stalowe, trwałość, zmęczenie, procesy losowe, niezawodność

## FATIGUE LIFE TESTS OF TYPICAL STEEL WIRE ROPES USED IN MINING SHAFT HOISTS

**Abstract:** The energy crisis in Europe, resulting from the introduction of strict rules on the import of hydrocarbons and the use of hard coal as the main source of energy burned in an oxygen atmosphere is still deepening. This phenomenon is particularly evident in Poland, where over 40% of electricity is generated by coal power stations. Therefore, considerations regarding maintaining the production capacity of existing shafts while ensuring the highest level of operational safety remain fully justified.

This article addresses the fatigue durability of rope structures used as hoisting ropes in mining shaft hoists. It presents current test results for the rope types currently produced and used, obtained during fatigue testing. The obtained results and their interpretation facilitate the clarification of several essential issues, the most significant of which concerns the mechanism of rope wear. The research used statistical methods to describe fatigue wear of hoisting ropes as a function of the number of operating cycles. Knowledge of this process is crucial because its nature is nonlinear, and the safe operation depends on making the right decision at the right moment of use.

**Keywords:** steel wire ropes, endurance, fatigue life, random processes, reliability

---

[https://doi.org/10.7494/978-83-68219-80-7\\_6](https://doi.org/10.7494/978-83-68219-80-7_6)

## 1. Wprowadzenie

Od kilku lat obserwuje się dalsze nasilenie kryzysu energetycznego, którego skutki są szczególnie mocno odczuwalne w Polsce, gdzie większość energii elektrycznej (ponad 40%) wytwarzana jest z węgla kamiennego, stanowiącego również podstawowe źródło ciepła w gospodarstwach domowych na obszarach wiejskich. W tej sytuacji w perspektywie najbliższych kilku, a nawet kilkunastu lat będzie konieczne zapewnienie odpowiedniego poziomu wydobycia tego surowca w naszym kraju. Należy więc kontynuować prace nad utrzymaniem zdolności wydobywczych istniejących szybów, tak aby jednocześnie zapewnić niezawodność urządzeń i wysoki poziom bezpieczeństwa ich eksploatacji.

Aby osiągnąć ten cel, prowadzone są liczne badania dotyczące bezpiecznej eksploatacji różnego rodzaju urządzeń linowych. Przyczyną katastrof górniczych jest często zerwanie lin nośnych, których zły stan znacząco pogarsza poziom bezpieczeństwa w kopalni (Wang i in. 2014). W maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego liny pracują w układach wielokrążkowych. Znając parametry liny oraz układ krążków w takich systemach, można określić jej obciążenie (Peterka i in. 2020). W przypadku maszyn stosowanych w kopalniach odkrywkowych układy kół linowych stanowią zespoły mechaniczne kluczowe dla utrzymania jakości i bezpieczeństwa pracy urządzeń (Olszyna i Tytko 2022). Tak duże urządzenia wymagają przeprowadzania ekspertyz technicznych w celu określenia możliwości wydłużenia ich żywotności (Radu i in. 2024).

Problematyka trwałości zmęczeniowej stalowych lin nośnych stosowanych w górniczych wyciągach szybowych pozostaje wciąż aktualna i nie w pełni rozpoznana. W użyciu są różne konstrukcje, w tym liny trójkątnosplotkowe (TSR – *triangular strand rope*) oraz o liniowym styku drutów w splotce (WS – *Warrington-Seale*). W środowisku specjalistów zajmujących się eksploatacją wyciągów szybowych w Polsce od wielu lat trwa dyskusja dotycząca praktyki stosowania tego rodzaju lin, jednak oczywiste jest, że muszą one spełniać podstawowe wymagania określone w przepisach. Zostały one szczegółowo omówione w załączniku nr 4 do Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017, poz. 1118).

Liny TSR i WS są dobrze poznane pod względem konstrukcyjnym, jednak ponieważ składają się z wielu drutów o różnych średnicach, ich ocena metodami magnetycznymi i wizualnymi wciąż jest przedmiotem dyskusji. W artykule wykorzystano unikatowe wyniki badań zmęczeniowych wymienionych rodzajów lin. Ich analiza i interpretacja, zgodnie z zamierzeniem autorów, mają na celu wyjaśnienie kilku istotnych problemów budzących zainteresowanie użytkowników. Najważniejszym z nich jest określenie optymalnego momentu wymiany lin – niezbyt wcześnie, aby uniknąć niepotrzebnych kosztów i w pełni wykorzystać potencjał eksploatacyjny liny, ale też niezbyt późno, by nie dopuścić do powstania zagrożenia. Na rysunku 1 przedstawiono fotografie przekroju poprzecznego i powierzchni jednej z lin, które poddano badaniom zmęczeniowym – liny o konstrukcji splotek 6×36WS.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny i powierzchnia liny o konstrukcji splotek 6×36WS

## 2. Metodyka badań

Badaniom poddano liny trójkątne splotkowe (TSR) o punktowym styku drutów w splotkach oraz liny typu *Warrington-Seale* (WS) o styku liniowym. Wytwarzają je wszyscy wiodący producenci lin stalowych na świecie. Obie konstrukcje charakteryzują się wysoką jakością wykonania oraz trwałością eksploatacyjną, jednak obszary ich zastosowań są całkowicie odmienne. Liny TSR zdominowały wielolinowe górnicze wyciągi szybowe z napędem ciernym Koepfego, natomiast liny WS szczególnie dobrze sprawdzają się jako liny podnoszące w różnego rodzaju urządzeniach dźwigowych i dźwignicowych. W górnictwie znalazły również zastosowanie w wyciągarkach bębnowych z wielowarstwowym nawijaniem, wykorzystywanych w głębokich i bardzo głębokich szbach (Tytka 2021).

Układ z kołem ciernym w takich maszynach składa się z odcinków prostych i giętych. W zewnętrznych warstwach drutów wszystkich lin powstają naprężenia zginające, a w linach o budowie trójkątne splotkowej w drutach wewnętrznych także tzw. naprężenia zginające II rodzaju. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę naprężenia stykowe. Naprężenia w drutach liny są różne w poszczególnych fazach pracy urządzenia (okresy jazdy ze stałą prędkością, przyspieszania oraz hamowania) (Wang i in. 2012), a naprężenia zginające zależą od średnicy kół liniowych oraz rozstawu kątów środkowych (Zhang i in. 2019). Podczas przeprowadzania testów na tempo zużycia zmęczeniowego lin mają także wpływ parametry związane z budową danej maszyny zmęczeniowej (Wang i in. 2013), więc wyniki badań mogą być porównywane jedynie wtedy, gdy uzyskano je w takich samych warunkach.

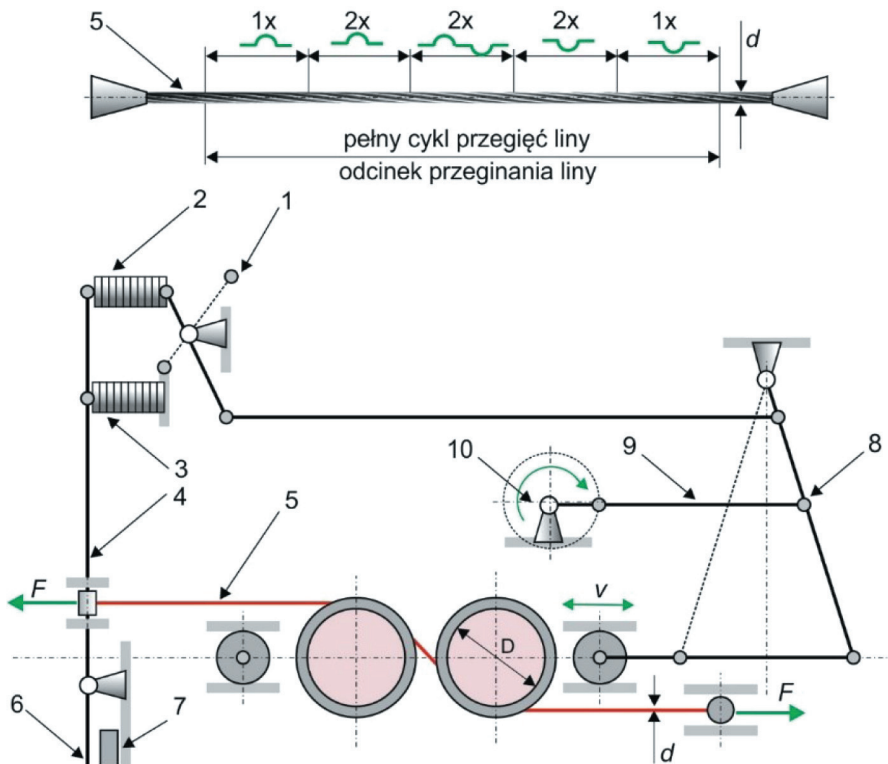
Pomiędzy stykającymi się drutami dochodzi do poślizgu, co prowadzi do lokalnego różnicowania się naprężeń, a w konsekwencji do zmęczenia materiału i zużycia ściernego sąsiadujących drutów (Argatov i in. 2011). Na powierzchni kontaktu wykładziny czarnej z liną występują również uszkodzenia wynikające z odkształceń sprężystych, które mogą się także pojawić wskutek poddawania liny momentowi od skręcania w czasie pracy układu (Peng i in. 2007).

Badania zmęczeniowe lin będących przedmiotem niniejszej analizy przeprowadzono w Laboratorium Lin i Urządzeń Szybowych Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach.

Badania lin, które wszystkie miały średnicę większą niż 40 mm, wykonano na maszynie zmęczeniowej typu P4-GIG-2. W urządzeniu tym liny poddawane są dwustronnemu (dwukierunkowemu) zginaniu przy działaniu siły rozciągającej o charakterze statycznym lub pulsującym. Wyposażone jest ono w mechanizm umożliwiający obrót próbki wokół własnej osi.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej P4-GIG-2, natomiast jej podstawowe parametry techniczne zestawiono w tabeli 1. Służy ona do testowania lin o średnicach od 40 mm do 65 mm. Długość badanej próbki liny między uchwytami wynosi 6,5 m, natomiast długość odcinka podlegającego przeginananiu mieści się w zakresie od 4,6 m do 5,0 m w zależności od średnicy kół zginających.

Aby zapobiec przegrzewaniu się liny i wytapianiu smaru podczas pracy urządzenia, wyposażono je w system chłodzenia. Badania zmęczeniowe lin stalowych w warunkach laboratoryjnych mają kluczowe znaczenie dla określenia ich trwałości zmęczeniowej i właściwego doboru rozwiązań do różnego typu urządzeń (Kamarudin i in. 2019).



**Rys. 2.** Schemat kinematyczny maszyny zmęczeniowej P4-GIG-2

- 1 – wahacz górny; 2 – sprężyna pulsacyjna; 3 – sprężyna napinająca; 4 – wahacz tylny;  
5 – badana lina; 6 – wahacz środkowy; 7 – belka oporowa; 8 – wahacz przedni;  
9 – łącznik; 10 – napęd

**Tabela 1**  
Podstawowe parametry techniczne maszyny zmęczeniowej P4-GIG-2

Parametr	Jednostka	Wartość
Długość próbki między uchwytami ( $l_0$ )	[m]	6,5
Długość przeginanego odcinka	[m]	4,6–5,0
Skok wózka maszyny	[m]	2
Stosunek średnicy koła do średnicy liny ( $D/d$ )	–	30
Kąt opasania liny na kole	[°]	62–65
Zakres średnic badanych lin	[mm]	40–65
Prędkość jednostkowa cykli zmęczeniowych	[cykli/min]	10

Zamontowaną w uchwytach linę obciążano siłą statyczną oraz siłą pulsującą uzyskiwaną za pomocą pary sprężyn – napinającej i pulsacyjnej. Wartość obciążenia była uzależniona od konstrukcji i średnicy badanej liny oraz dobierana na podstawie tablic parametrów obciążeniowych dostępnych w dokumentacji maszyny. Obciążenia pulsacyjne nie mogły przekraczać 25% wartości obciążenia statycznego.

W trakcie badań liny poddawano naciągowi składającemu się ze składowej stałej i zmiennej. Środkowa część liny w jednym cyklu pracy podlegała dwukrotnemu przegięciu na kołach linowych (rys. 2). W celu ograniczenia nagrzewania się próbki spowodowanego tarciem wewnętrznym stosowano chłodzenie liny, tak aby jej temperatura nie przekraczała 50°C.

Badanie każdej próbki kończono w momencie zniszczenia liny, co uznawano za osiągnięcie granicznego stanu zmęczenia. Za całkowite zniszczenie liny uznaje się pełne zerwanie co najmniej jednej splotki lub brak możliwości dalszego obciążania liny siłą poosiową.

Podobne badania lin były prowadzone też m.in. przez Kubisia (2019). Określenie trwałości zmęczeniowej jest kluczowe dla bezpieczeństwa, ponieważ postępowanie procesu zmęczenia nie jest wykrywalny w fazie eksploatacji – lina nie wykazuje żadnych widocznych uszkodzeń aż do momentu pęknięcia drutu (Lombardi i in. 2013). Trwałość zmęczeniowa lin stalowych jest prognozowana głównie na podstawie wyników badań niszczących oraz niszczących (Zhao i in. 2021), które są prowadzone w celu określenia przewidywanego czasu pracy lin w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

### 3. Wyniki badań i dyskusja

Badaniom zmęczeniowym poddano liny zestawione w tabeli 2. Wszystkie uzyskane wyniki zostały opracowane statystycznie, natomiast wyniki badań lin oznaczonych jako TSR52A, TSR56A oraz WS56AOL przedstawiono i szczegółowo omówiono w dalszej części pracy.

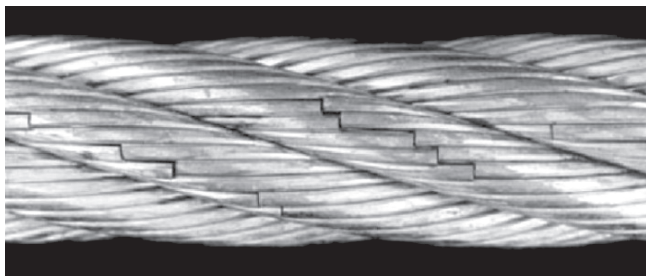
**Tabela 2**  
Rodzaje lin poddanych badaniom zmęczeniowym i ich parametry

Oznaczenie liny	Rodzaj i średnica liny [mm]	Długość próbki między uchwytami $l_0$ [mm]	Przekrój $S_{re}$ [mm <sup>2</sup> ]	Siła zrywająca $P_w$ [kN]	Wytrzymałość $R_m$ [MPa]	Siła w linie $F_r$ [kN]	$n$	Pulsacja [Hz]
TSR52A	TSR52		1188,0	1905,41		317,57	6,0	0
TSR52B				1745,34		290,89		43,60
TSR52C				1891,94		315,32		b.d.
TSR54A	TSR54	6500	1278,0	2098,82	1570	299,83	7,0	0
TSR54B				1967,68		281,10		59,97
TSR54C				2038,76		356,00		56,22
TSR54D				1967,68		281,10		b.d.
TSR54E				2394,46		342,06		56,21
TSR56A	TSR56		1424,0	2296,48		328,00	7,0	0
TSR56B				1349,5		330,86		b.d.
TSR56C				1331,0		312,84		66,17
WS56AOL	WS56	6490	1331,0	2257,16	1670	312,84	7,5	62,57
WS54ALL	WS54		1228,0	2002,62	1570	333,77	6,0	66,75
WS54BOL								
WS50NFC								
WS60EPIWRC	WS60	6500	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
WS60NFC								

gdzie:  
 TSR – liny trójkatnosplotkowe,  
 WS – liny *Warrington-Seale*,  
 LL – lina współzwita,  
 OL – lina przeciwzwita,  
 NFC – rdzeń włókienny naturalny,  
 EPIWRC – rdzeń w postaci niezależnej liny pokrytej tworzywem,  
 b.d. – brak danych,  
 A, B, C, D, E – kolejne próbki lin o tej samej konstrukcji

Podczas badań okresowo dokonywano pomiarów średnicy oraz długości skoku liny, zawsze w tym samym miejscu. Ponadto rejestrowano lokalizację i liczbę widocznych pęknięć zmęczeniowych oraz przyrost długości liny. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono trwałość zmęczeniową jako liczbę cykli pracy do momentu zniszczenia liny lub zakończenia eksperymentu.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy fragment liny. Na odcinku, który znajdował się pomiędzy kołami linowymi maszyny zmęczeniowej P4-GIG-2, widoczne są pęknięte druty. Należy podkreślić, że identyfikacja pęknięć na podstawie badań wizualnych (VT – *visual testing*) (zob. Tytko i in. 2023) oraz ich zliczenie nie jest łatwe i ma istotny wpływ na dokładność wykonywanych pomiarów.



**Rys. 3.** Pęknięcia zmęczeniowe drutów widoczne na odcinku liny pomiędzy kołami linowymi przewojowymi maszyny zmęczeniowej P4-GIG-2

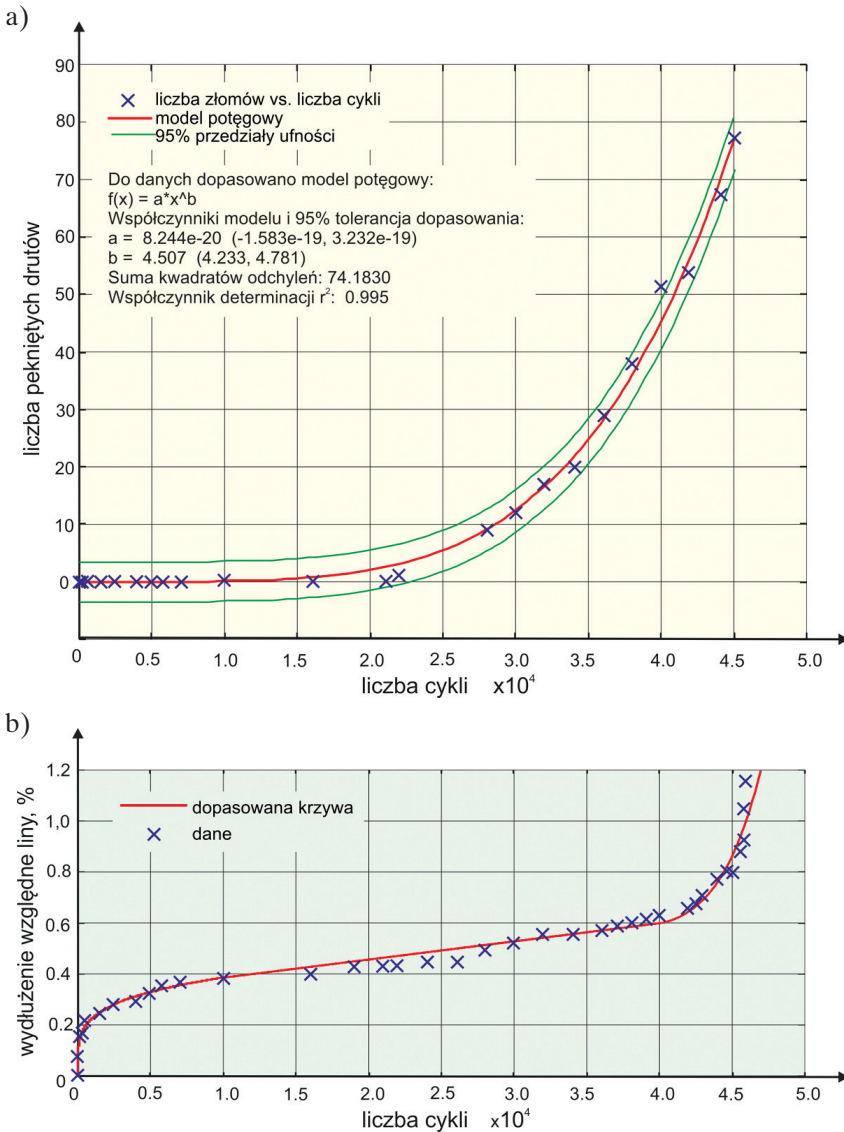
Zmęczenie materiału jest wywołane zmiennym stanem naprężeń od zginania, skręcania i nacisków, które powstają w wyniku przesuwania się liny po kołach linowych, oraz od pulsujących naprężeń rozciągających działających na linę w trakcie pracy (Breim 2007). Badania przeprowadzone na pojedynczych drutach wykazały, że przed wystąpieniem uszkodzenia ulegają one znacznemu odkształceniu plastycznemu (Teissier i in. 2017).

Wybrane wyniki badań trwałości zmęczeniowej dwóch lin typu TSR i jednej typu WS zostały opracowane w formie wykresów obrazujących narastanie pęknięć drutów oraz względne wydłużenie liny w funkcji liczby cykli zmęczeniowych (rys. 4–6). Na rysunku 4a przedstawiono wykres przyrostu liczby pęknięć widocznych na powierzchni liny trójkątnospłotkowej o średnicy 52 mm (TSR52A) w zależności od wykonanej liczby cykli według równania (1), a na rysunku 4b – wydłużenie względne ( $\epsilon$ ) tej liny w zależności od liczby cykli. Wydłużenie względne ( $\epsilon$ ) jest obliczane jako przyrost długości liny w odniesieniu do jej długości początkowej.

$$n = a \cdot N^b \quad (1)$$

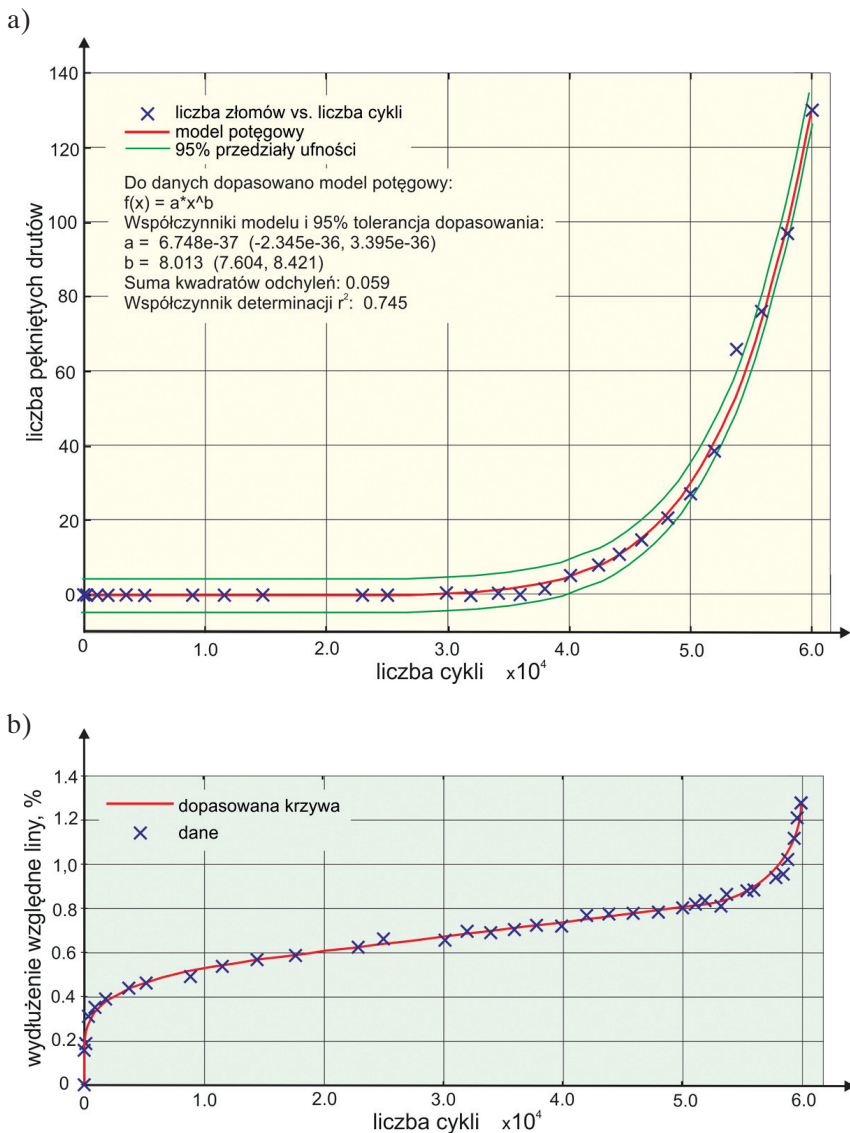
gdzie:

- $n$  – liczba pęknięć zmęczeniowych,
- $a, b$  – współczynniki równania,
- $N$  – liczba cykli zmęczeniowych.



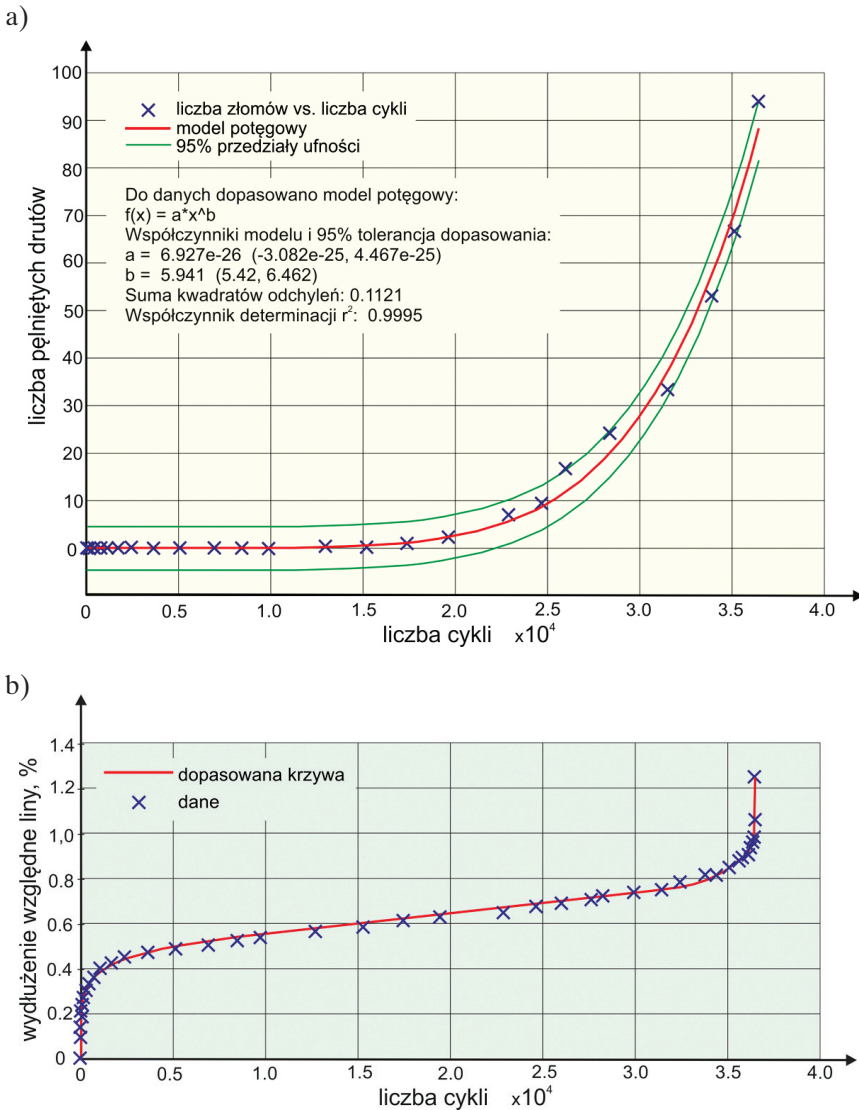
**Rys. 4.** Wyniki badań na maszynie zmęczeniowej P4-GIG-2 dla liny trójkątnosplotkowej o średnicy 52 mm (TSR52A):  
 a) krzywa zależności liczby pękniętych drutów od liczby cykli;  
 b) krzywa zależności wydłużenia względnego ( $\epsilon$ ) od liczby cykli

Na rysunku 5a przedstawiono wykres przyrostu liczby pęknięć widocznych na powierzchni liny trójkątnosplotkowej o średnicy 56 mm (TSR56A) w zależności od wykonanej liczby cykli według równania (1), a na rysunku 5b – wydłużenie względne ( $\epsilon$ ) tej liny w zależności od liczby cykli.



**Rys. 5.** Wyniki badań na maszynie zmęczeniowej P4-GIG-2 dla liny trójkątospłotkowej o średnicy 56 mm (TSR56A):  
 a) krzywa zależności liczby pękniętych drutów od liczby cykli;  
 b) krzywa zależności wydłużenia względnego ( $\epsilon$ ) od liczby cykli

Na rysunku 6a przedstawiono wykres przyrostu liczby pęknięć widocznych na powierzchni liny przeciwzwitej typu WS o średnicy 56 mm (WS56AOL) w zależności od wykonanej liczby cykli według równania (1), a rysunku 6b – wydłużenie względne ( $\epsilon$ ) tej liny w zależności od liczby cykli.



**Rys. 6.** Wyniki badań na maszynie zmęczeniowej P4-GIG-2 dla liny przeciwwziewnej typu WS o średnicy 56 mm (WS56AOL):  
 a) krzywa zależności liczby pękniętych drutów od liczby cykli;  
 b) krzywa zależności wydłużenia względnego ( $\epsilon$ ) od liczby cykli

Uzyskane wyniki potwierdzają, że charakterystyki zmęczeniowe badanych lin najlepiej opisuje równanie (1). Na wykresie zmęczenia liny przedstawiono estymowany przebieg dopasowanej funkcji oraz 95-procentowe przedziały istotności tego dopasowania. W każdym analizowanym przypadku przedziały te okazały się bardzo wąskie.

Na wykresach umieszczono również parametry estymowanego modelu oraz dwie statystyki oceny dobroci dopasowania.

Nie zaprezentowano wyników dopasowania modeli do rzeczywistych przebiegów względnego wydłużenia lin, ponieważ dobór modelu w tym przypadku miał charakter arbitralny, co wynikało z przyjęcia wielomianu wysokiego stopnia.

Typowe charakterystyki wydłużenia lin dzielą się na trzy wyraźne okresy (fazy):

- faza I: krótki okres początkowy o szybkim wzroście wydłużenia;
- faza II: długi, niewielki, liniowy wzrost wydłużenia;
- faza III: okres przyspieszonego wydłużenia.

W fazie I dochodzi do wyrównania naciągów poszczególnych drutów i splotek. Pokonują one występujące wewnątrz liny siły tarcia, dzięki czemu zostają skompensowane różne długości drutów, a druty i splotki układają się w linie w taki sposób, że następuje wyrównanie w nich stanu naprężenia. W przeprowadzonych badaniach faza ta trwała do momentu osiągnięcia wydłużenia względnego lin w zakresie od 0,4% do 0,5%.

W fazie II (najdłuższej) obserwuje się niewielki, liniowy wzrost wydłużenia lin o kolejne około 0,4%. Pod koniec tego okresu na linie pojawiają się pierwsze pęknięcia zmęczeniowe.

W fazie III (najkrótszej) następuje nieliniowy wzrost wydłużenia względnego nawet o około 0,5% do momentu odłożenia lub zniszczenia próbki. W całej fazie powstają kolejne pęknięcia zmęczeniowe drutów, przy czym tempo ich pojawiania się narasta potęgowo, a lina traci zwartość. Okres ten jest stosunkowo krótki, dlatego dla bezpieczeństwa liny (zwłaszcza pracujące w górniczych wyciągach szybowych) powinny być odkładane wcześniej, bez względu na zaobserwowany poziom ich zużycia.

#### 4. Wnioski

Prezentowane wyniki badań odnoszą się wyłącznie do lin trójkątnosplotkowych oraz lin o konstrukcji *Warrington-Seale*. Z przedstawionych przebiegów wynika, że liny trójkątnosplotkowe charakteryzują się większą trwałością zmęczeniową.

Proces narastania liczby zidentyfikowanych wizualnie pęknięć zmęczeniowych drutów w linach o typowym wykonaniu splotek (styk punktowy lub liniowy) przedstawiony w funkcji liczby przepracowanych cykli ma charakter funkcji potęgowej o dość łagodnej charakterystyce, co pozwala na śledzenie tempa tego procesu. Obserwacja dwóch procesów zużycia (tj. wydłużenia względnego i narastania liczby powstających pęknięć zmęczeniowych) pozwala trafnie określić właściwy moment wymiany liny. Z analizy przedstawionych wyników można wnioskować, że oba zjawiska są ze sobą ściśle powiązane.

Procedury stosowane obecnie w ramach wspomnianej oceny stanu technicznego liny są związane z procesami zużycia zmęczeniowego, ale nie uwzględniają wyników badań zmęczeniowych. Istnieją jednak metody ciągłego aparaturowego pomiaru zmian długości skoków pracującej liny, np. pomiar metodą laserowego skanowania powierzchni liny.

## Literatura

- Argatov I.I., Gómez X., Tato W., Urchegui M.A., 2011, *Wear evolution in a stranded rope under cyclic bending: Implications to fatigue life estimation*, *Wear*, vol. 271, iss. 11–12, s. 2857–2867. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.045>.
- Breim U., 2007, *Torque cycle fatigue of wire ropes*, [w:] Ridge I.M.L. (ed.), *OIPEEC Conference Proceedings. How to Get the Most out of Your Ropes: Rope-Machine Interaction, Rope Maintenance and Lubrication*, OIPEEC, Reading, UK, s. 99–106.
- Kamarudin M., Jamaluddin M.J., Tamin M.N., 2019, *Fatigue assessment of steel wire rope*, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2068, iss. 1, art. 020109. <https://doi.org/10.1063/1.5089408>.
- Kubiś B., 2019, *Wpływ wstępnej deformacji spletek w linach kompaktowanych na ich trwałość i parametry wytrzymałościowe*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice [praca doktorska].
- Lombardi L., Clerici F., 2013, *An innovative method for wire rope fatigue life evaluation*, [w:] Ridge I.M.L. (ed.), *Proceedings of the OIPEEC Conference 2013. Simulating Rope Applications*, OIPEEC, Oxfordshire, UK, s. 115–128.
- Olszyna G., Tytko A., 2022, *A tool for determining the number of bends and places of accumulation of potential wear of steel ropes operating in the luffing systems of basic opencast mining machines*, *Mining Machines*, vol. 40, iss. 4, s. 229–237. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.4.5>.
- Peng Y.-x., Zhu Z.-c., Chen G.-a., Cao G.-h., 2007, *Effect of tension on friction coefficient between lining and wire rope with low speed sliding*, *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 17, iss. 3, s. 409–413. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60115-1](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60115-1).
- Peterka P., Krešák J., Vojtko M., Halek B., Heinz D., 2020, *The failure analysis of the drilling rig hoisting steel wire rope*, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 22, iss. 4, s. 667–675. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.10>.
- Radu S.M., Vilceanu F., Toderas M., Lihoacă A., Dinescu S., 2024, *Determining the level of structural and mechanical degradation of steel in the supporting structure of mining excavation machinery*, *Processes*, vol. 12, iss. 1, art. 153. <https://doi.org/10.3390/pr12010153>.

- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017, poz. 1118).
- Teissier J.M., Ridge I.M.L., Evans J.J., Fournier M., 2017, *The effect of wire break distribution on the breaking strength of a wire rope*, [w:] Dohm M.A.R. (ed.), *Proceedings of the OIPEEC Conference 2017. Rope – Present and Future*, OIPEEC, Didcot Oxfordshire, UK, s. 267–293.
- Tytko A., 2021, *Liny stalowe. Budowa, właściwości, eksploatacja, zastosowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Tytko A., Olszyna G., Kocór G., Szot M., 2023, *Some stochastic aspects of safety work of steel wire ropes used in mining-shaft hoists*, *Sustainability*, vol. 15, iss. 9, art. 7590. <https://doi.org/10.3390/su15097590>.
- Wang D., Zhang D., Zhang Z., Ge S., 2012, *Effect of various kinematic parameters of mine hoist on fretting parameters of hoisting rope and a new fretting fatigue test apparatus of steel wires*, *Engineering Failure Analysis*, vol. 22, s. 92–112. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.01.008>.
- Wang D., Zhang D., Wang S., Ge S., 2013, *Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires*, *Engineering Failure Analysis*, vol. 27, s. 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.014>.
- Wang, D., Zhang D., Ge S., 2014, *Effect of terminal mass on fretting and fatigue parameters of a hoisting rope during a lifting cycle in coal mine*, *Engineering Failure Analysis*, vol. 36, s. 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.11.006>.
- Zhang J., Wang D., Song D., Zhang D., Zhang Ch., Wang D., Araújo J.A., 2019, *Tribofatigue behaviors of steel wire rope under bending fatigue with the variable tension*, *Wear*, vol. 428–429, s. 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.004>.
- Zhao D., Liu Y.-X., Ren X.-T., Gao J.-Z., Liu S.-G., Dong L.-Q., Cheng M.-S., 2021, *Fatigue life prediction of wire rope based on grey particle filter method under small sample condition*, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 23, iss. 3, s. 454–467. <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.6>.