

GRZEGORZ OLSZYNA
TOMASZ ROKITA
ANDRZEJ TYTKO

Nowe podejście do oceny trwałości eksploatacyjnej lin stalowych

Problematyka przyszłego przewidywania stanu technicznego lin w czasie ich eksploatacji jest bardzo istotnym zagadnieniem związanym z bezpieczeństwem użytkowania i obsługi urządzeń. Liny stalowe jako elementy nośne podlegają procesom degradacji przez różnego rodzaju formy zużycia w procesie eksploatacji. Zmienne obciążenia powodują złożony stan naprężeń w drutach, co przekłada się na różne naprężenia rozciągające, skręcające czy naciski powierzchniowe pomiędzy drutami. Liny również narażone są na trudne warunki pracy, np. środowisko korozyjne, zużycie zmęczeniowe, co prowadzi w konsekwencji do osłabienia ich własności użytkowych. Liny jako elementy odpowiedzialne wymagają dokładnego, a zarazem prostego sposobu prognozowania ich bezawaryjnej pracy w prosty i jednoznaczny sposób.

Niniejszy artykuł dotyczy zagadnień nowego podejścia do wyznaczania trwałości zmęczeniowej lin stalowych. Tematyka bezpieczeństwa na temat lin stalowych od wielu lat jest zagadnieniem trudnym i niejednoznacznym do wyznaczenia, nie znając trwałości zmęczeniowej obiektu. W artykule omówiono metody doświadczalne i praktyczne do wyznaczania trwałości zmęczeniowej lin stalowych.

Słowa kluczowe: liny stalowe, trwałość zmęczeniowa, liny kompaktowane, zużycie

1. WPROWADZENIE

W ostatnich kilkunastu latach w dziedzinie eksploatacji lin stalowych obserwujemy stały wzrost jakości ich wykonania. Objawia się to wzrastającym czasem eksploatacji nawet w najtrudniejszych warunkach jak szyby kopalniane. Odnosi się to do wszystkich typowych zastosowań lin stalowych, a szczególnie lin stosowanych w górnictwie głębokim, w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego oraz różnego rodzaju systemach linowych suwnic. Jednocześnie w ofercie największych producentów lin pojawiły się nowe konstrukcje charakteryzujące się większą trwałością zmęczeniową. Te nowe konstrukcje to z reguły liny wielowarstwowe składające się z dużej liczby spletek zwitych ze stosunkowo cienkich drutów o dużej wytrzymałości na rozciąganie. W linach wielowarstwowych niektórych firm, na przykład Wireco, Tuffelberger, Arcelor Mittal, stosowane są dodatkowo wkładki z tworzyw sztucznych, które obniżają wartości nacisków pomiędzy drutami. Bardzo często spletki te wykonywane są w technologii procesu kompaktowania.

Technologia ta polega na częściowym zgnieciu wcześniej wykonanych spletek o styku liniowym. Podstawowe sposoby kompaktowania spletek przedstawiono w tekście. Z pojawieniem się nowych konstrukcji lin stalowych zmianie uległy również ich charakterystyki zużywania się. Najczęstszą przyczyną zużycia lin stalowych jest zmęczenie materiału, z którego wykonane są druty, prowadzące do ich pęknięć. W nowoczesnych konstrukcjach stosuje się druty o małych średnicach i wysokiej wytrzymałości, często wynoszącej 2160 MPa lub więcej. Powoduje to także podwyższenie trwałości zmęczeniowej drutów. W połączeniu ze zmniejszonymi naprężeniami stykowymi pomiędzy drutami liny te mają dłuższą trwałość, nie wykazując oznak zużycia, takich jak złomy zmęczeniowe. Ta dłuższa praca powoduje też, że liny użytkowane zwłaszcza w środowiskach wilgotnych w górniczych wyciągach szybowych podlegają szybszemu procesowi zużycia korozyjnego. Liny pracujące w wyciągach bębnowych ulegają także zużyciu o charakterze ściernym, które objawia się występowaniem masowych ubytków przekroju głównie na powierzchni drutów. W klasycznej

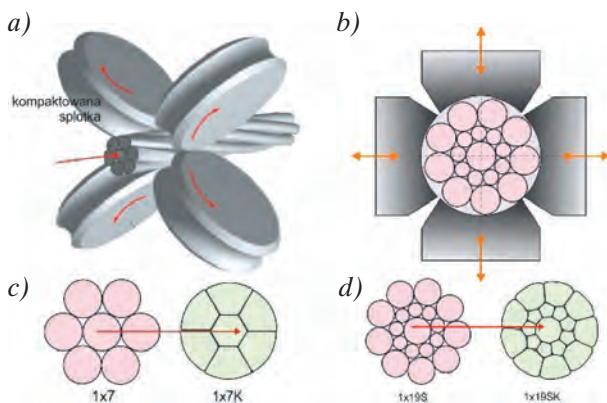
eksploatacji lin stalowych powszechnie stosuje się pojęcie trwałości zmęczeniowej, które zostało wyjaśnione szerzej w dalszej części artykułu. Parametr ten ma charakter opisowy, ale pozwala na porównanie konstrukcji lin pod względem długości czasu pracy. Nie jest jednak możliwe określenie bezpiecznej długości tego czasu pracy liny w konkretnych warunkach. Dodatkowo na determinizm procesu zużycia lin stalowych nakłada się niepewność statystyczna. W eksploatacji lin stalowych powszechną praktyką jest badanie ich stanu technicznego (poziomu zużycia) różnymi metodami. Powszechnie stosuje się badania nieniszczące – wizualne VT i badania magnetyczne MRT. Wyniki tych badań służą do określenia rodzaju i poziomu zużycia danej liny. Zużycie to, rozumiane jako ubytek przekroju nośnego liny, w konsekwencji prowadzi do jej osłabienia, czyli do przenoszenia przez nią obciążeń. Wartość tego wskaźnika wynika bezpośrednio ze stopnia zużycia, ale jest on trudny do określenia w sposób ilościowy metodami nieniszczącymi. Jedyny sposób to badania wytrzymałościowe odłożonych lin i ekstrapolowanie ich wyników na podobne przypadki. W kolejnym rozdziale przedstawiono przykładowe wyniki statystycznej metody określenia osłabienia liny na podstawie rzeczywistego poziomu jej zużycia. Okazuje się, że dla większości rodzajów (zmęczenie, korozja, starcia) i form (uszkodzenia wewnętrzne, zewnętrzne, symetrycznie położone i niesymetrycznie) fizycznego zużycia osłabienie liny jest generalnie niedoszacowane w stosunku do wielkości ubytku przekroju nośnego liny. Wymaga to więc oszacowania wartości przez prowadzącego badania na podstawie wyników badań magnetycznych lub wizualnych. Rzeczoznawca musi więc dysponować odpowiednią wiedzą. Autorzy artykułu postulują nowe podejście do oceny trwałości eksploatacyjnej lin, które polega na holistycznym (kompleksowym) sposobie interpretacji wszystkich elementów eksploatacyjnych, jakie charakteryzują pracę danej liny. Głównie chodzi o dokładność i powtarzalność metod oceny zużycia, przełożenie tych wyników na rzeczywiste osłabienie liny oraz uwzględnienie niepewności oszacowania tych wskaźników. Ma to na celu zapewnienie, że termin wycofania liny będzie bezpieczny, tak aby pozostawała ona z wystarczającą rezerwą czasu pracy. Większość przepisów dotyczących odkładania lin stalowych podejmuje ten problem dość lakonicznie, a kryteria odkładania określone są punktowo. Jako przykład autorzy podają obowiązujące w Polsce i w RPA przepisy dotyczące lin pracujących w górniczych wyciągach szybowych. Z tej analizy porównawczej wynika, że polskie kryteria odkładania górniczych lin wyciągowych

w końcowej fazie ich eksploatacji dopuszczają sytuację, w której liny te mogą znacznie przekroczyć wartość graniczną. Wynika to z niedoszacowania osłabienia na podstawie oceny zużycia oraz nieuwzględnienia niepewności stochastycznej tego oszacowania. Nowe proponowane podejście w zasadniczej części ma za zadanie nie dopuścić do takiej sytuacji. Być może w niektórych przypadkach należałoby zrewidować obowiązujące w górnictwie kryteria odkładania lin stalowych górniczych wyciągów szybowych.

2. WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE LIN STALOWYCH WYKONANYCH ZE SPLOTOK KOMPAKTOWANYCH

Współcześnie polski przemysł wydobywczy jest zarządzany biznesowo. Oznacza to maksymalizację zysku i minimalizację nakładów pracy. Spostrzeżenie to odnosi się również do rodzajów stosowanych w górniczych wyciągach szybowych lin stalowych. Nadrzędnym celem jest bezpieczeństwo ich eksploatacji zgodnie z obowiązującymi przepisami przy jak najdłuższym resursie pracy. Coraz częściej stosuje się liny wielowarstwowe o złożonej budowie, w tym liny o splotkach kompaktowanych, czyli liny o długim okresie pracy w porównaniu z linami tradycyjnymi. Zmniejsza to generalnie koszty. W Polsce na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat liny takie zastosowano już w kilkudziesięciu instalacjach. Liny te nie tylko pracują dłużej, ale i ich procesy zużycia, zwłaszcza zmęczeniowego, przebiegają inaczej niż w przypadku typowych, popularnie dotychczas stosowanych lin trójkątnosplotkowych. Autorzy artykułu szerzej omawiają niektóre cechy eksploatacyjne lin wykonanych ze splotek kompaktowanych. Jak do tej pory nie przeprowadzono kompleksowych badań określających wpływ konstrukcji tych lin na ich parametry wytrzymałościowe, niezawodność, trwałość, a zwłaszcza na możliwości określenia stanu w trakcie eksploatacji powszechnie stosowanymi metodami wizualnymi VT i magnetycznymi MRT. Na tym tle wyróżniała się monografia [1] oraz artykuł [2], które jednak są tylko studium pojedynczych przypadków zastosowań. Podstawową cechą wyodrębniającą konstrukcje tych lin w odniesieniu do dotychczas stosowanych jest występowanie powierzchniowych styków między współpracującymi drutami w splotkach wykonanych o liniowym styku drutów, a następnie plastycznie deformowanych różnymi metodami. Wykonanie lin stalowych, zwitych ze splotek kompaktowanych, jest droższe niż produkcja równoważnych lin o splotkach o liniowym styku drutów. W wyniku odkształcenia plastycznego

splotki wykonywane z drutów o liniowym styku w kolejnych warstwach tworzą styk powierzchniowy między odkształconymi drutami. Taki stan osiąga się dzięki wprowadzeniu istotnych i zwiększających koszty produkcji zmian technologicznych w wytwarzaniu splotek. W procesie tym stosuje się kilka technologii. Ogólnie sprowadzają się one do mechanicznego ściskania splotki o liniowym styku drutów w kierunku promieniowym, co powoduje ich plastyczne odkształcenie. W wyniku procesu kompaktowania następuje trwałe odkształcenie przekroju poprzecznego drutów w splotce. Skutkuje to spadkiem średnicy splotki, ale jej metaliczny przekrój poprzeczny pozostaje taki sam. Druty tworzące splotkę zmieniają swój przekrój z okrągłego na kompaktowy i kontaktują się ze sobą poprzez styki powierzchniowe. Redukuje to naprężenia powierzchniowe drutów w splotkach. Przykładowo dwie technologie wykonywania splotek kompaktowanych (walcowanie oraz tzw. kowarkowanie) przedstawiono na rysunku 1a i b, natomiast na rysunku 1b i c przedstawiono dwa, najczęściej kompaktowane, typy splotek o styku liniowym drutów. Są to splotki 1+6 oraz konstrukcja Seale (1+9+9).



Rys. 1. Dwie przykładowe technologie kompaktowania splotek o liniowym styku drutów: a) metoda walcowania splotek [3]; b) metoda kowarkowania; c), d) przykłady kompaktowania splotek o budowie 6x7 i 6x19S [2, 4]

Przedstawione na rysunku splotki wykonane są z maksymalnym 100-procentowym zgniotem. Oznacza to, że wszystkie druty w splotce odkształcone są tak bardzo, że pomiędzy nimi nie ma wolnej przestrzeni.

Uzyskiwany zgniot splotki w dowolnej technologii kompaktowania zawiera się zazwyczaj w przedziale 6–30% i określony jest równaniem (1). Zgniot ten liczony jest jako procentowa zmiana przekroju koła opisanego na splotce w wyniku kompaktowania (S_0 [mm²] – S_k [mm²]) do zmiany, jaką przekrój ten

osiągnąłby, gdyby dokonano całkowitego zamknięcia splotki (S_0 [mm²] – S_{\min} [mm²]).

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0 - S_{\min}} \cdot 100\% \quad (1)$$

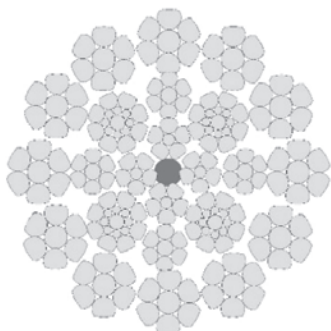
gdzie:

- S_0 – przekrój okręgu opisanego na splotce [mm²],
- S_k – przekrój splotki po kompaktowaniu [mm²],
- S_{\min} – minimalny przekrój splotki, jaki można uzyskać po kompaktowaniu do całkowitego zamknięcia splotki [mm²].

Największy zgniot występuje w drutach warstw zewnętrznych splotki i stopniowo maleje w tych drutach położonych głębiej, w miarę zbliżania się do drutu rdzeniowego. Jest to przedstawione również na modelach procesu kompaktowania, wykonanych metodą elementów skończonych, gdzie widoczny jest promieniowy rozkład wzrostu naprężeń w trakcie kompaktowania [5]. W większości dostępnych na rynku lin o splotkach kompaktowanych stosowany zgniot deformuje plastycznie jedynie druty zewnętrzne splotek.

Kiedy całą linę stalową poddaje się zgniotowi, powstaje lina kowarkowana [6]. Skutkiem procesu kompaktowania jest zmniejszenie średnicy splotek i wykonanych z nich lin, zwiększenie współczynnika wypełnienia przekroju splotki, a tym samym gotowej liny, oraz uzyskanie gładkiej powierzchni zewnętrznej w stosunku do lin o splotkach konwencjonalnych. To z kolei poprawia współczynnik tarcia między liną a bębnum lub krążkiem linowym. Zwiększa się też odporność liny na korozję. Ponadto, ze względu na ograniczenie wolnej przestrzeni między drutami, wystąpienie styku powierzchniowego poprawia rozkład naprężeń na współpracujących powierzchniach. Lina stalowa, pracująca na kole linowym, jest często przeginana, co powoduje większe obciążenia na styku pomiędzy drutami, prowadząc do poślizgu, a w konsekwencji do zużycia ściernego i zmęczenia materiału [7]. Przykładowy przekrój liny kompaktowanej przedstawiono na rysunku 2 [8]. Jest to lina nośna oznaczona przez producenta jako „NRHD24CS” o splotkach zewnętrznych z układem drutów (1+6). W warstwie wewnętrznej liny zastosowano splotki konstrukcji Seale w układzie (1+8+8). Linę tę charakteryzuje duża odporność na ściskanie i ścieranie przy wielowarstwowym nawijaniu na bębny oraz odporność na korozję. Liny takie są też odporne na owalizację przekroju na bębnie. W tej konstrukcji splotki w warstwach zwinięte są w przeciwnym kierunku, gładka powierzchnia splotek kompaktowanych obniża naprężenia stykowe. W materiałach producentów i kartach katalogowych nie podano wielkości zgniotu. Nie podano też technologii kompaktowania,

a te dwa czynniki: technologia wykonania i zgniot mają podstawowy wpływ na trwałość pracujących lin stalowych wykonanych w tej technologii. Pomijanie tak istotnego parametru, jakim jest zgniot dla poszczególnych rodzajów splotek, nie dostarcza badającym oraz interpretującym wyniki badań, np. magnetycznych, żadnych dodatkowych wskazówek, jak mogą się rozkładać złomy zmęczeniowe w przekroju poprzecznym liny. Liny kompaktowane w porównaniu z równoważnymi linami o normalnej budowie splotek są mniej odkrętne, mają mniejszą sztywność i są bardziej odporne na korozję. Są to właściwości pożądane we wciągarkach bębnowych wszelkiego typu, ale nie do końca wpływa to na zwiększenie trwałości zmęczeniowej w warunkach szybowych. W trakcie badania tych lin pojawia się również problem z interpretacją wyników badań magnetycznych. Jest to spowodowane tym, że uszkodzenia powstają głównie na styku warstw splotek, a długości szczelin między końcami pękniętych drutów wynoszą około 1 mm, co stanowi poważne wyzwanie dla wykrywania metodą magnetyczną [9, 10]. Dodatkowym problemem jest sam charakter zużycia zmęczeniowego. Tematykę tego zagadnienia omówiono w dalszej części artykułu.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny liny nośnej typu „NRHD24CS” [8]

3. TRWAŁOŚĆ LIN STALOWYCH

Pojęcie trwałości w eksploatacji maszyn jest intuicyjnie oczywiste, ale jest dość trudne do zdefiniowania, gdyż wymaga podania licznych parametrów uszczegółwiających dotyczących danego elementu: materiału oraz technologii wykonania, warunków i środowiska eksploatacji, charakteru obciążeń itp. Jeszcze trudniej jest zdefiniować pojęcie trwałości lin stalowych. Poniżej podano kilka przykładów stosowanych w praktyce definicji tego pojęcia.

Klasyczna definicja trwałości zmęczeniowej lin stalowych to czas lub liczba cykli przepracowanych przez linę stalową w określonych warunkach do umownego zniszczenia lub do osiągnięcia określonego poziomu

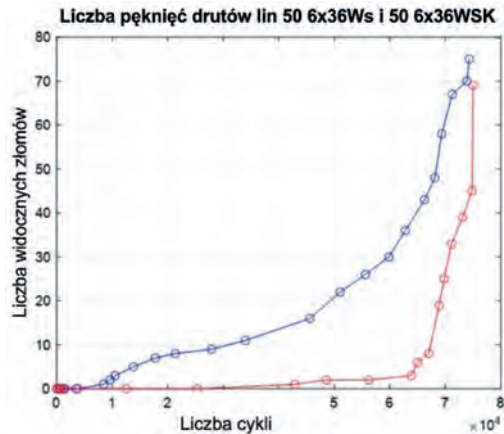
zużycia [11]. W praktyce częściej stosuje się wytrzymałościową definicję trwałości zmęczeniowej. Oznacza ona czas pracy (resurs) liny stalowej, wyrażony liczbą cykli pracy lub czasem użytkowania, aż do jej całkowitego zniszczenia, możliwy do osiągnięcia w określonych warunkach środowiskowych przy zmiennych obciążeniach. Teoretycznie posiadanie danych na temat trwałości zmęczeniowej liny stalowej powinno rozwiązywać podstawowy problem eksploatacyjny, czyli określenie, kiedy należy wymienić linę na nową. Odpowiedź na to pytanie brzmi: przed upłynięciem tego terminu (lub po przepracowaniu określonej liczby cykli). Ale skąd zdobyć wiedzę na temat tej wartości? Jest to bardzo trudne.

Istnieje kilka sposobów wyznaczenia trwałości zmęczeniowej lin stalowych. Najważniejsze przedstawiono poniżej.

Metoda eksploatacyjna polega na wykorzystaniu arkusza rozkładu liczby pęknięć drutów w funkcji czasu [12].

Metoda laboratoryjna polega na wykonaniu badań trwałości zmęczeniowej w kontrolowanych warunkach przy użyciu maszyn zmęczeniowych. Doświadczalnie można wyznaczyć zależność pomiędzy liczbą widocznych pęknięć drutów a pozostałą wytrzymałością liny [13]. Badania takie są drogie i czasochłonne. Dotyczą zwykle małej próbki lin i nie uwzględniają specyficznych warunków szybowych. Przykład takich badań przedstawiono na rysunku 3 [3]. Wykresy przedstawiają zużycie lin, wyrażone liczbą złomów zmęczeniowych, w funkcji liczby przepracowanych cykli. Wykres w kolorze niebieskim przedstawia krzywą zużycia liny o średnicy 50 mm i budowie 6x36WS. Wykres w kolorze czerwonym to krzywa zużycia równoważnej liny o średnicy 50 mm wykonanej ze splotek kompaktowanych o budowie 6x36WSK. Pomimo że nie ma danych o wielkości zgniotu i metodzie kompaktowania, na wykresach widać typowy przebieg zużycia lin o splotkach kompaktowanych w porównaniu z linami ze splotek zwykłych. Proces zużycia zmęczeniowego lin o splotkach kompaktowanych przebiega w taki sposób, że przez mniej więcej 2/3 czasu pracy lin druty nie pękają. Kumulacja zmęczenia w materiale drutów odbywa się w sposób niewidoczny. Pęknięcie zmęczeniowe drutów zaczyna się po tej fazie, ale ma zwykle gwałtowny przebieg, często charakteryzowany jako „wybuchowy”. Przyczynę takiej formy zużycia liny w czasie dobrze opisują modele komputerowe zużycia zmęczeniowego lin opisane poniżej. Oznacza to także, że badający linę przez długi czas jej użytkowania nie ma informacji o tym, że proces zużycia zmęczeniowego już zachodzi. Dodatkowo w splotkach kompaktowanych pęknięte druty nie rozsuwają się na duże odległości, a szczeliny między ich końcami

nie przekraczają 1 mm. Jeśli do oceny poziomu zużycia stosowana jest metoda magnetyczna, takie uszkodzenia są bardzo słabo widoczne w sygnale czujników indukcyjnych typu LD.

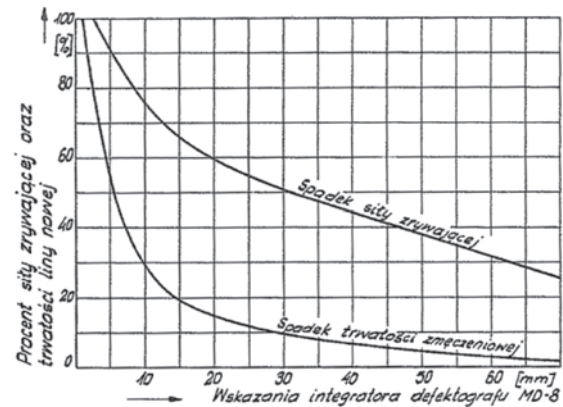


Rys. 3. Przykład badań trwałości zmęczeniowej lin stalowych tej samej konstrukcji wykonanych ze splotek okrągłych zwykłych (kolor niebieski) i ze splotek częściowo kompaktowanych (kolor czerwony) [3]

Metody aproksymacji matematycznej procesu zużycia liny opierają się na analizie szeregów czasowych opisujących ten proces przy użyciu różnych technik, a następnie ekstrapolacji wyznaczonej funkcji. Wykorzystywane są m.in. procesy typu ARIMA, metody ekonometryczne, takie jak metoda wag harmonicznnych czy metoda wyrównywania wykładniczego itp. [4, 14].

Na rysunku 4 przedstawiono w formie wykresu wyniki badań trwałości zmęczeniowej jako poziomu zużycia konkretnej liny [14]. Podejście takie zaproponowano po raz pierwszy w diagnostyce lin stalowych górniczych wyciągów szybowych. Innowacyjność ta polega na połączeniu trzech pojęć: trwałości zmęczeniowej, zużycia eksploatacyjnego i osłabienia wywołanego spadkiem siły zrywającej linę. Wykresy opierają się na wynikach uzyskanych w trakcie zmęczeniowego badania lin. Stopień zużycia określono na podstawie wskazania tzw. sygnału integrowanego defektografu MD8 [15–16]. Krzywa dolna przedstawia bardzo szybki nieliniowy spadek trwałości zmęczeniowej wraz z poziomem zużycia. Niestety brak jest danych dotyczących rodzaju badanej liny, szczegółów samych badań, błędów oceny oraz sposobu wyznaczenia trwałości. Z wykresu wynika, że zużyciu liny, które odpowiada osłabieniu szacowanemu na 25%, towarzyszy spadek trwałości zmęczeniowej o ponad 90%. Wykres pokazuje również, że spadek trwałości zmęczeniowej jest bardzo szybki w pierwszej fazie eksploatacji liny, natomiast w fazie końcowej ulega spowolnieniu. Takie zachowanie się lin stalowych było trudne do wyjaśnienia

aż do momentu opracowania metody komputerowego modelowania procesu zmęczeniowego zużycia lin stalowych [17].

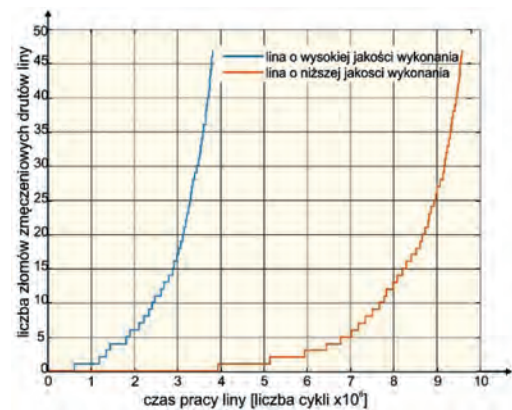


Rys. 4. Spadek trwałości zmęczeniowej i osłabienia liny jako funkcja jej zużycia [14]

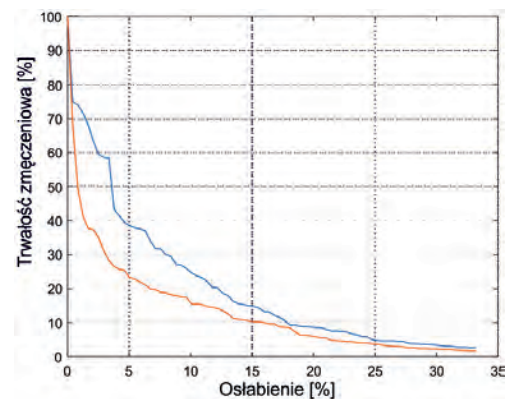
Modelowanie zużycia zmęczeniowego polega na wykorzystaniu iteracyjnych modeli komputerowych opartych na hipotezie zmęczeniowej Wöhlera (dla drutów) i hipotezie kumulacyjnej Palmgrena–Minera, PM (zasada sumowania się naprężeń w poszczególnych drutach). Modele takie opisano m.in. w monografii [4]. Przykładowy wynik takich badań modelowych ilustruje rysunek 5. Przedstawia on dwie realizacje zmiany zużycia liny, wyrażone jako liczba pojawiających się pęknięć zmęczeniowych drutów w zależności od przetworzonej liczby cykli. Należy zaznaczyć, że w tych modelach poziom zużycia liny mierzony liczbą złomów zmęczeniowych jest równoważny osłabieniu. Wykresy uzyskano za pomocą modelu zużycia zmęczeniowego liny wielowarstwowej 34x7, wykonanej z jednakowych drutów o wytrzymałości $R_m = 1900$ MPa, o różnej jakości charakteryzującej się dużym rozrzutem obciążeń poszczególnych drutów (kolor niebieski) i podwyższonej jakości wykonania (kolor czerwony). Modele te dobrze oddają charakter procesu zużycia zwłaszcza lin wielowarstwowych wykonanych ze splotek kompaktowanych. Na rysunku 5 widać, że zmienna jakościowa wydłuża zdecydowanie czas pracy tak wykonanych lin w porównaniu z linami o niższej jakości. Na rysunku 6 przedstawiono te same realizacje procesu zużycia zmęczeniowego, ale jako przebieg zmiany trwałości zmęczeniowej w funkcji osłabienia tych lin. Odpowiada to dolnemu wykresowi przedstawionemu na rysunku 4. Prezentowane wykresy potwierdzają tezę, że liny o wysokiej jakości wykonania, ale o wyrównanej wartości naprężeń w poszczególnych drutach, w pierwszej fazie swojej pracy szybciej wyczerpują rezerwy trwałości zmęczeniowej niż liny o niższej jakości wykonania. Niemniej jednak pracują dłużej. Nieregularności widoczne na obu wykresach wynikają z rozrzutu sto-

chastycznego obciążeń przypadających na poszczególne druty i w każdym cyklu obliczeniowym są inne, choć mieszczą się w zakresie postulowanej jakości wykonania. Doświadczalnie wyznaczoną wytrzymałość zmęczeniową i zużycie lin stalowych kompaktowanych oraz zależność pomiędzy liczbą widocznych pęknięć drutów a pozostałą wytrzymałością linii przedstawiono w artykule [18]. Modelowanie trwałości zmęczeniowej pozwala na uzyskanie tego typu informacji oraz danych niedostępnych innymi metodami, na przykład o tym, jaki jest wpływ jakości wykonania linii, sposobu wykonania drutów, nierównomierności obciążeń poszczególnych splotek itp. Krzywe zużycia dla przykładu z rysunków 5 i 6 zestawiono wspólnie na rysunku 7, tym razem w funkcji czasu pracy linii (liczby cykli). Umieszczono na nim również liniową funkcję zmiany trwałości zmęczeniowej dla takich samych linii, różniących się jakością wykonania – wysoką i niższą. Liniowość tych charakterystyk wynika z przyjętej zmiennej czasu pracy jako liczby cykli. Badania modelowe można prowadzić aż do „zerwania się linii” wskutek maksymalnego osłabienia, co w warunkach rzeczywistych nie jest możliwe, gdyż linie są wcześniej odkładane na poziomie osłabienia wynoszącym około 20%. Wyniki uzyskane metodą symulacji numerycznej według [4] potwierdzają również obserwacje, że osłabienie linii na poziomie 20% siły zrywającej linę jest jednoznaczne ze spadkiem trwałości zmęczeniowej nawet powyżej 90%. Jest to niezwykle ważne w kontekście obowiązujących w Polsce kryteriów odkładania lin górniczych wyciągów szybowych. Jak można zauważyć na rysunku 7, linie o wyższej jakości wykonania pracują nawet wielokrotnie dłużej niż linie o przeciętnej jakości, ale gdy ich osłabienie przekracza 20% (wartość odkładania lin nośnych górniczych wyciągów szybowych wg przepisów WUG), pozostała trwałość zmęczeniowa jest znacznie mniejsza. Jest to niezwykle ważne ze względu na coraz częstsze wykorzystywanie lin o splotkach kompaktowanych jako lin nośnych. Konstrukcja tych lin sprzyja uśrednianiu przenoszonych obciążeń na poszczególne druty i splotki, co prowadzi do lepszego wyrównania naprężeń pomiędzy nimi. Wyjaśnia to nietypowość charakterystyki zużycia zmęczeniowego linii o splotkach kompaktowanych (rys. 3). Proces kompaktowania splotek powoduje wyrównanie przenoszenia obciążeń, w tym obciążeń zmiennych. Zmęczenie materiału poszczególnych drutów kumuluje się bez widocznych zewnętrznych objawów, aż do momentu, gdy po osiągnięciu maksymalnego rezerwu pracy, opisanego hipotezą Palmgrena–Minera, dochodzi do pojawienia się pęknięć zmęczeniowych zgodnie z równaniem Wöhlera. Prędkość przyrostu pęknięć zmęczeniowych można

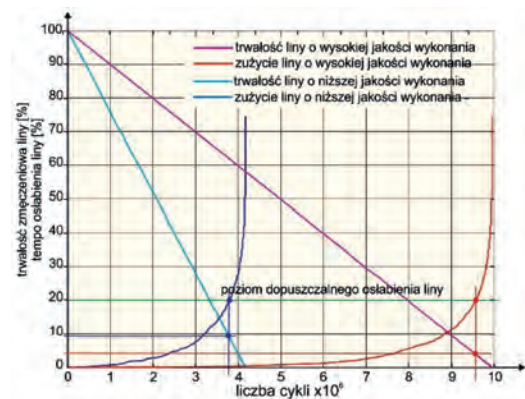
określić z użyciem współczynnika intensywności naprężeń według równania Parisa [19]. W porównaniu z linami wykonanymi ze zwykłych splotek czas pracy linii kompaktowanych jest dłuższy, ale bardziej gwałtowny w ostatniej fazie.



Rys. 5. Przebieg zużycia lin o różnej jakości wykonania w funkcji przepracowanej liczby cykli na podstawie wyników symulacji numerycznej wg modelu iteracyjnego [4]



Rys. 6. Spadek trwałości zmęczeniowej lin o przebiegu zużycia jak na rysunku 5 jako funkcja jej osłabienia (na podstawie wyników symulacji numerycznej wg modelu iteracyjnego [4])



Rys. 7. Spadek trwałości zmęczeniowej i zużycia lin o różnej jakości wykonania w funkcji czasu pracy (na podstawie wyników symulacji numerycznej wg modelu iteracyjnego [4])

Metoda obliczania trwałości zmęczeniowej jako gwarantowanej liczby cykli do osiągnięcia kryterium odkładania polega na zastosowaniu równania regresyjnego o parametrach estymowanych na podstawie badania konkretnej liny w warunkach laboratoryjnych na maszynie zmęczeniowej. Metoda ta została opracowana na Uniwersytecie w Stuttgarcie [20] i polecana przez producenta lin CASAR. W ogólnym przypadku sposób obliczenia trwałości zmęczeniowej liny dla danych warunków pracy jest znany, ale zastosowane w wzorach wartości licznych współczynników nie są publikowane.

4. POZIOM ZUŻYCIA LIN STALOWYCH A ICH OSŁABIENIE

Zużycie lin stalowych jest to nieuchronny proces degradacji ich właściwości fizycznych, geometrycznych i eksploatacyjnych. Zużycie jest powodowane procesami zmęczeniowymi, korozją, ubytkami wywołanymi starciami oraz utratą podstawowych cech geometrycznych, takich jak: średnica [mm], długość skoku [mm], sztywność wzdłużna i poprzeczna, właściwości smaru, zużycie rdzenia. Poziom zużycia liny ocenia się na podstawie liczby widocznych złomów drutów, zmiany średnicy liny [%], zmiany długości skoku [%], wydłużenia [%], wielkości ubytków przekroju drutów na skutek starć drutów [mm²], ubytku przekroju ferromagnetycznego [mm²], ubytku przekroju nośnego liny [mm², %], stanu smarowania, stanu rdzenia, momentu odkrętu itp. Ocena ta jest obiektywna, gdy badający stosuje metody aparaturowe, np. badania magnetyczne. Może być także subiektywna, jeżeli oceniający stosuje tylko metody wizualne, a badania magnetyczne traktuje jedynie jako narzędzie do określania najbardziej zużytego fragmentu liny. Z eksploatacyjnego punktu widzenia najlepszą miarą poziomu zużycia jest określenie ubytku przekroju nośnego liny [mm², %]. Posiadanie takiej miary prowadziłoby w sposób oczywisty do wyznaczenia osłabienia liny według równania (2) jako spadek zdolności liny do przenoszenia obciążeń wzdłużnych na skutek zmian zużyciowych.

$$\Delta F = \frac{F_{rz0} - F_{rz}}{F_{rz0}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

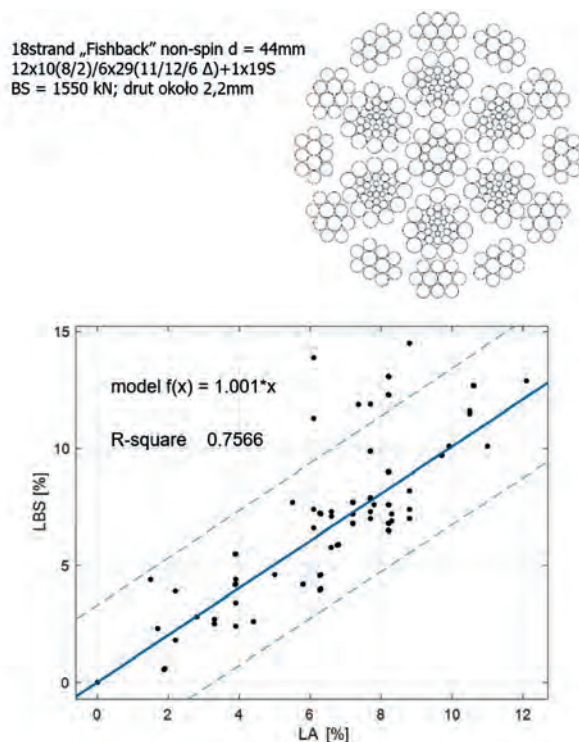
- ΔF – osłabienie liny stalowej [%],
- F_{rz} – rzeczywista siła zrywająca linę w całości [kN],
- F_{rz0} – rzeczywista siła zrywająca nową linę w całości (podana przez producenta) [kN].

Niestety osłabienie liny pracującej można wyznaczyć jedynie pośrednio na podstawie wyników badań

wizualnych (liczba pękniętych drutów) lub magnetycznych (stopień zużycia liny wyznaczany wg normy PN-92/G-46603). Obie metody nie są dokładne – metoda wizualna jest subiektywna, a dodatkowo ilościowy związek między tak określonym osłabieniem a zużyciem ma charakter regresyjny i jest obarczony znaczną niepewnością. Dokładność tej relacji zależy zarówno od poziomu zużycia liny, sposobu rozmieszczenia uszkodzeń, jak i od konstrukcji, średnicy, rodzaju zużycia oraz metody oceny stopnia zużycia. Zużycie liny ma istotny wpływ na jej osłabienie, jednak między tymi wielkościami nie istnieje jednoznaczna zależność. Wskazane jest zatem określenie relacji między osłabieniem a zużyciem na podstawie wyników kontrolowanych badań. Powinny one dotyczyć podstawowych form zużycia w konkretnych zastosowaniach lin stalowych. Jedyną racjonalną drogą jest określenie poziomu zużycia liny dla danej wartości i odpowiadającego mu osłabienia. Należy mieć na uwadze, że osłabienie liny to miara jej zdolności do przenoszenia siły wzdłużnej. Można ją precyzyjnie wyznaczyć jedynie na podstawie rzeczywistej wartości. Aby ostateczne wyniki miały sens stochastyczny dla jednego typu liny i danego rodzaju uszkodzeń należałoby wykonać co najmniej kilkanaście takich badań. W oczywisty sposób wpływa to na koszty, więc takie badania wykonywane są rzadko, a ich wyniki są niechętnie publikowane. Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki takich badań wykonanych w RPA [21], a opracowane statystycznie przez autorów niniejszego artykułu. Badania te polegały na zrywaniu w całości odcinków lin o odmiennej budowie, które sztucznie uszkodzono, przecinając druty w różnej liczbie i konfiguracji. Inne prezentowane poniżej wyniki dotyczą badań przeprowadzonych w całości przez autorów tego artykułu. Badaniem objęto kilka różnych konstrukcji lin stalowych o różnych formach zużycia. Badania polegały na ocenie poziomu zużycia lin metodą magnetyczną defektografem MD120 zgodnie z normą PN-92/G-46603, a następnie na zerwaniu drutów w celu wyznaczenia rzeczywistego osłabienia danego odcinka liny według równania (2). Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki. Należy zaznaczyć, że w literaturze dotyczącej problemów oceny stanu lin autorzy tego opracowania nie zetknęli się z podobnym podejściem. Przykładowe wyniki badań autorów przedstawiono na rysunkach 8–11. Odnoszą się one do różnych rozwiązań konstrukcyjnych lin stosowanych w górniczych wyciągach szybowych – głównie bębnowych. Na rysunkach przedstawiono u góry – opis, symbol i szkic przekroju liny, a u dołu wykres relacji regresyjnej: osłabianie [%] versus zużycie [%]. Na wykresach na osi pionowej skrót LBS to osłabienie (*loss of metallic section*), a skrót LA to zużycie (*loss of area*).

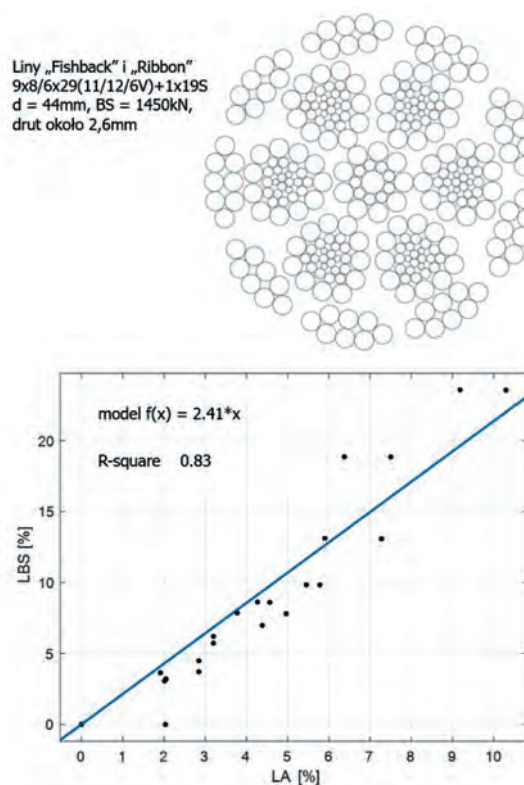
Na wykresach zamieszczono również równanie modelu regresji liniowej pierwszego stopnia i wartość współczynnika determinacji liniowej wyznaczony dla tego modelu regresyjnego.

Rysunek 8 przedstawia liniowy model relacji pomiędzy osłabieniem a zużyciem liny typu Fishback (popularna w wyciągach głębokich, stosowana i produkowana w RPA, ma podobne właściwości jak lina przedstawiona na rysunku 2). Zamodelowane zużycie liny wywołane jest przeciętymi drutami w splotkach trójkątnych na styku warstw. Uszkodzenia są równomiernie rozłożone w przekroju poprzecznym liny. Taki model zużycia odpowiada typowemu procesowi zmęczeniowego zużywania się tego typu lin, który objawia się głównie złomami drutów występującymi na styku warstw splotek. Osłabienie liny określono na podstawie prób zrywania odcinków pracujących lin w całości i w porównaniu do odcinka liny fabrycznie nowej. Współczynnik nachylenia kierunkowego w omawianym modelu regresji wynosi 1,001, czyli poziom zużycia liny w tym przypadku odpowiada osłabieniu. Ze względu na rozrzut wyników niepewność oszacowania osłabienia wynosi 2% odchylenia standardowego. Na wykresie (rys. 8) przerywanymi liniami przedstawiono granice przedziału wynoszące 95%.



Rys. 8. Relacja pomiędzy osłabieniem a zużyciem lin stalowych spowodowanym przeciętymi drutami na styku warstw splotek określona na podstawie wyników badań wytrzymałościowych ([21], opracowanie statystyczne: autorzy publikacji)

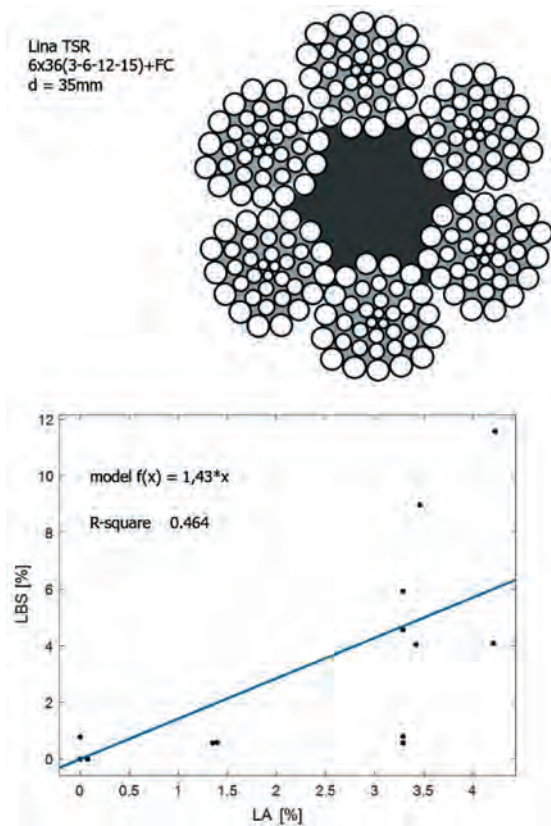
Rysunek 9 przedstawia liniowy model relacji pomiędzy osłabieniem a zużyciem liny typu Ribbon (popularna lina w wyciągach głębokich stosowana i produkowana w RPA ma podobne właściwości jak lina przedstawiona na rysunku 2). Zamodelowane zużycie liny wywołane jest przeciętymi drutami leżącymi na powierzchni zewnętrznych warstw splotek. Uszkodzenia są równomiernie rozłożone na obwodzie liny. Osłabienie liny określono na podstawie prób zrywania odcinków lin w całości w relacji do liny fabrycznie nowej. Współczynnik nachylenia kierunkowego wynosi 2,41, czyli poziom osłabienia liny w tym przypadku jest średnio 2,41 razy wyższy od stanu jej zużycia.



Rys. 9. Relacja pomiędzy osłabieniem a zużyciem lin stalowych spowodowanym przeciętymi drutami na powierzchni splotek określona na podstawie wyników badań wytrzymałościowych ([21], opracowanie statystyczne: autorzy publikacji)

Rysunek 10 przedstawia liniowy model relacji pomiędzy osłabieniem a zużyciem liny o trójkątnej budowie splotek. Jest to popularna lina stosowana w wyciągach głębokich zarówno w urządzeniach bębnowych, jak i wielolinowych z pędniami ciernymi. Badana lina pracowała w układzie wielowarstwowego nawijania na bębnie. Wykazywała wyłącznie zróżnicowane zużycie ściernie o wartości starć powyżej 1/3 średnicy drutu zewnętrznego na całym obwodzie. Zużycie liny określono na podstawie badań całej długości liny, po jej

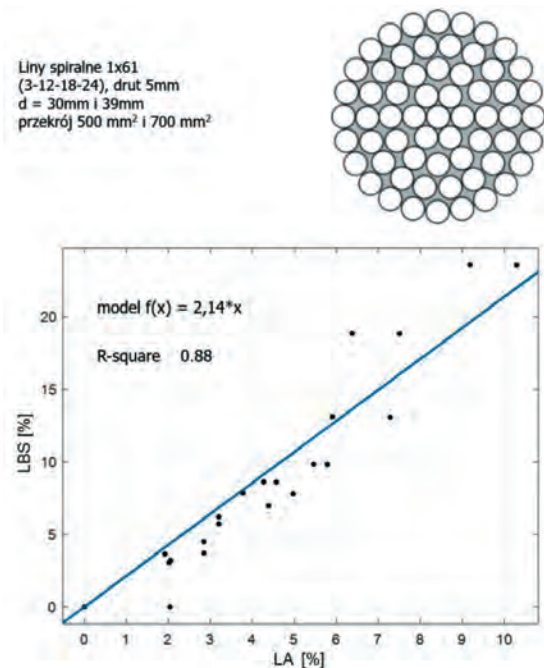
zdjęciu z urządzenia. Badania wykonano defektografem MD120, interpretując wyłącznie sygnał czujnika halotronowego LMA zerowanego względem przekroju niepracującej liny (odcinek liny z okolic bębna pędnego). Osłabienie liny oszacowano na podstawie prób zrywania odcinków lin w całości w relacji do odcinka liny z okolic bębna, który nie wykazywał żadnego zużycia. Współczynnik nachylenia kierunkowego liniowego modelu regresji wynosi 1,43, czyli poziom osłabienia liny dla tego przypadku jest średnio 1,43 razy wyższy od poziomu zużycia. Należy zwrócić uwagę na niską wartość współczynnika determinacji liniowej. Oznacza to, że poziom osłabienia liny determinuje nie tylko ubytek przekroju metalicznego wywołany starciami, ale również charakter rozkładu tego ubytku w przekroju i na długości niemożliwy do określenia na podstawie sygnału czujnika LMA.



Rys. 10. Relacja pomiędzy osłabieniem a zużyciem lin stalowych spowodowanym starciami drutów na powierzchni splotek (opracowanie statystyczne: autorzy publikacji)

Rysunek 11 przedstawia liniowy model relacji pomiędzy osłabieniem a zużyciem liny jednozwitej. Jest ona powszechnie stosowana jako lina odciągowa wysokich budowli wolnostojących lub jako lina wantowa w pływających dźwigach i maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego. Badana lina wykazywała

wyłącznie zużycie korozyjne pojawiające się na styku warstw drutów. Zużycie liny określono na podstawie badań całej długości liny defektografem MD120 wyłącznie za pomocą czujnika indukcyjnego LD metodą sumowania impulsów na odcinku 30 średnic liny. Osłabienie liny oszacowano na podstawie prób zrywania wszystkich drutów z różnych odcinków liny w relacji do odcinka niewykazującego zużycia. Współczynnik nachylenia kierunkowego wynosi 2,14, czyli poziom osłabienia liny dla tego przypadku jest średnio 2,14 razy wyższy od zużycia

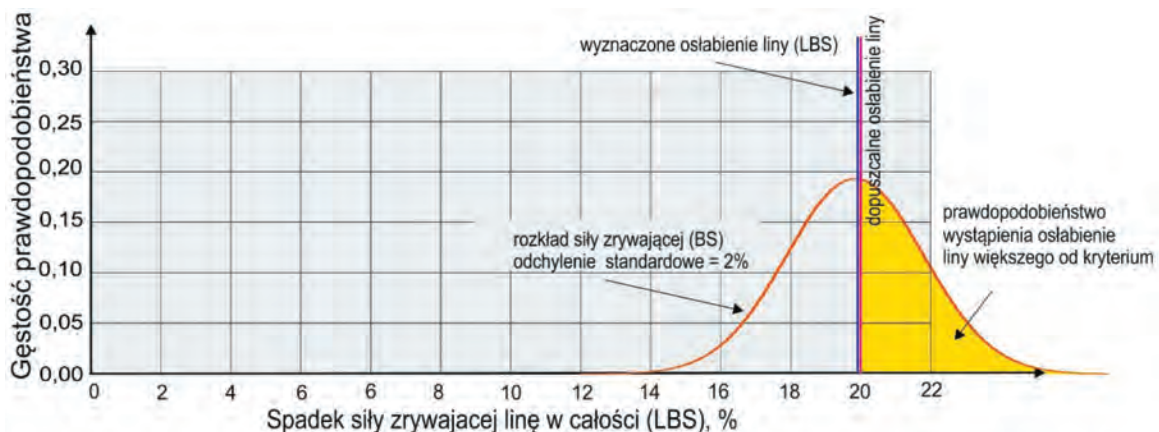


Rys. 11. Relacja pomiędzy osłabieniem a zużyciem lin stalowych spowodowanym starciami drutów na powierzchni splotek (opracowanie statystyczne: autorzy publikacji)

Przedstawione przykładowe zależności pomiędzy wartością osłabienia lin stalowych a poziomem ich zużycia wskazują na duży wpływ rodzaju (formy) zużycia oraz rozkładu uszkodzeń w przekroju poprzecznym liny na relację pomiędzy tymi zmiennymi i wielkość niepewności statystycznej wyznaczenia tego związku. Wyniki te wskazują na znaczny udział czynnika losowego zarówno na wartość oszacowania zużycia, jak i osłabienia. Oznacza to, że np. zużycie w postaci złomów drutów o tej samej liczbie, ale zlokalizowanych we wnętrzu liny i na jej powierzchni, ma diametralnie różny wpływ na wartość osłabienia. Podobnie jest z formą zużycia. Takie samo liczbowo określone zużycie wywołane korozją daje inne osłabienie niż spowodowane starciami lub złomami drutów. Ponieważ o dyskwalifikacji liny decyduje kryterium w postaci osła-

bienia, powyższe aspekty powinny być uwzględnione przez rzeczoznawców. Dużo łatwiej jest uwzględnić, wykazany powyżej, wpływ losowości. Zobrazowano to na rysunku 12, który jest przykładem wnioskowania, pozwalającego nie tylko na wyznaczenie średniego poziomu osłabienia na podstawie oszacowanego zużycia, przy uwzględnieniu zależności zużycie–osłabienie, ale także na określenie prawdopodobieństwa niedoszacowania tego poziomu osłabienia. W tym przykładzie przedstawiono sytuację, w której rzeczoznawca, na podstawie swoich badań, ocenił zużycie liny wielowarstwowej wywołane złomami drutów leżącymi na styku warstw, np. na 20% ubytku przekroju nośnego. W przypadku urządzeń wyciągowych eksploatowanych w Polsce wartość kryterium odkładania lin nośnych to spadek o 20% współczynnika bezpieczeństwa, co jest równoważne z 20-procentowym osłabieniem. Pozostaje pytanie, czy linę należy odłożyć, czy jeszcze nie. Dla tego przypadku znana jest relacja osłabienie–zużycie przedstawiona na rysunku 8 (model liniowy $f(x) = 1,001 \cdot x$),

czyli średnie osłabienie jest równe wyznaczonemu zużyciu. Trzeba jeszcze uwzględnić dodatkowo tylko rozrzut losowy tych wartości. Równanie regresyjne zostało wyznaczone z niepewnością 2%, bo tyle wynosi odchylenie standardowe, można więc wyznaczyć prawdopodobieństwo niedoszacowania tego osłabienia, czyli prawdopodobieństwo wystąpienia osłabienia większego niż 20%. Na rysunku 12 prawdopodobieństwo to przedstawia żółte pole. Wynosi ono dokładnie 50%. Jednocześnie szansa, że osłabienie liny jest mniejsze niż 20%, wynosi mniej niż 50%. Natomiast prawdopodobieństwo, że rzeczywisty poziom osłabienia znajduje się w przedziale 18–22% wynosi około 68%. Z tego rysunku wynika również, że z 95% prawdopodobieństwem osłabienie liny przekracza 24%, czyli aż o 4%, wartość określoną przepisami. Ponieważ zużycie liny będzie tylko rosło, rzeczoznawca powinien podjąć decyzję o jej wymianie albo o wydłużeniu czasu jej pracy, ale powinno być to uwarunkowane dodatkowymi badaniami stanu technicznego.



Rys. 12. Ilustracja stochastycznej interpretacji osłabienia liny dla danego poziomu zużycia wywołanego uszkodzeniami o charakterze pęknięć występujących na styku warstw splotek

5. PODSUMOWANIE

1. Badania modelowe procesów zużycia zmęczeniowego lin stalowych pokazują, że kryteria odkładania lin nośnych górniczych wyciągów szybowych stosowane w Polsce (przepisy WUG, spadek współczynnika bezpieczeństwa o 20%) pokazują, że liny te w momencie odkładania mają zapas trwałości zmęczeniowej mniejszy niż 10%.
2. Kryteria odkładania lin nośnych górniczych wyciągów szybowych stosowane w Polsce (przepisy WUG) w porównaniu z innymi, np. obowiązującymi w RPA [22, 23], mają charakter punktowy i nie uwzględniają czynników losowych mających wpływ na wszyst-

- kie etapy wykonywania i eksploatacji lin. Czynniki te nieuchronnie prowadzą do powstawania statystycznej niepewności szacowania poziomu zużycia, a przez to wartości osłabienia pracujących lin.
3. Badania modelowe procesów zużycia zmęczeniowego lin stalowych pokazują, że jednym z ważnych czynników mających wpływ na czas ich pracy jest jakość wykonania rozumiana jako zastosowanie w trakcie wykonywania liny technologii zmniejszających rozrzut obciążeń przypadających na poszczególne druty i splotki liny. Spostrzeżenie to dotyczy zwłaszcza współczesnych lin wielowarstwowych, lin z wkładkami z tworzyw sztucznych, wykonanych głównie ze splotek kompaktowanych.

4. Badania laboratoryjne i eksploatacyjne dotyczące osłabienia lin nośnych górniczych wyciągów szybowych w powiązaniu z charakterem procesów zużyciowych wskazują na niedoszacowanie poziomu osłabienia przy ocenie zużycia metodami wizualnymi i magnetycznymi. Jest to szczególnie widoczne w przypadku korozji, starć oraz nierównomiernego rozłożenia złomów drutów w przekroju poprzecznym liny.
5. Autorzy niniejszego artykułu postulują przeprowadzenie kompleksowych badań lin wykonanych ze spletek kompaktowanych po ich wycofaniu z eksploatacji, aby ocenić skuteczność obecnie stosowanych metod oceny zużycia w precyzyjnym określeniu rzeczywistego osłabienia tych lin na podstawie badań wytrzymałościowych.

Literatura

- [1] Hankus J.: *Liny wyciągowe nośne o powierzchniowym styku drutów*. GIG, Katowice 2003.
- [2] Kubiś B., Olszyna G., Szade P., Tytko A.: *Fatigue Life of Compacted Wire Ropes for Applications in Deep Mining*. Management Systems in Production Engineering 2023, 31, 1: 95–101. <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0012>.
- [3] Kubiś B.: *Wpływ wstępnej deformacji spletek w linach kompaktowanych na ich trwałość i parametry wytrzymałościowe*. GIG, Katowice 2019 [niepublikowana praca doktorska].
- [4] Tytko A.: *Liny stalowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021.
- [5] Erdönmez C.: *Analysis and design of compacted IWRC meshed model under axial strain*. International Journal of Mechanics and Materials in Design 2020, 16: 647–661, <https://doi.org/10.1007/s10999-019-09481-x>.
- [6] Chen L., Magliulo M., Elig M., Beex L. A.A.: *A mechanical model for compaction of strands for wire ropes*. International Journal of Solids and Structures 2023, 269. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112178>.
- [7] Kumar K., Goyal D., Banwait S.S.: *Effect of key parameters on fretting behaviour of wire rope*. Archives of Computational Methods in Engineering 2020, 27: 549–561, <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09326-y>.
- [8] Tobys J., Kocur G.: *Protokół NR 35/PZ/2016/P-S z oceny przydatności lin nośnych przed ich zastosowaniem w górniczym wyciągu szybowym awaryjno-rewizyjnym szybu SG-2 KGHM „Polska Miedź” S.A. Oddział Zakład Górniczy „Polkowice-Sieroszowice” w Polkowicach*. Polkowice 2016 [praca niepublikowana].
- [9] Carbogno A., Pyplacz J., Nowacki J.: *Liny kompaktowane w górniczych wyciągaczach szybowych*. Hutnik – Wiadomości Hutnicze 2013, 80, 1: 17–20.
- [10] Nowak M., Lipiński L.: *Problemy eksploatacji lin nośnych o powierzchniowym styku drutów*. W: *Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie*, red. A. Tytko, M. Wójcik. Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego sp. z o.o., Łędziny 2015: 73–80.
- [11] Kawecki Z., Stachurski J.: *Defektoskopia magnetyczna lin stalowych*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1969.
- [12] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu w podziemnych zakładach górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118.
- [13] Szade P., Szot M., Kubiś B.: *Thermoelastic effect in compacted steel wire ropes under uniaxial loading*. Quantitative Infra-Red Thermography Journal 2020, 18, 4: 252–268, <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1768495>.
- [14] Hansel J.: *Podstawy teoretyczne prognozowania czasu pracy lin stalowych*. Zeszyty Naukowe AGH, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, nr 84, Kraków 1977.
- [15] Ridge I.M.L., Tytko A.: *Use of magnetic NDT to determine the lay length of a stranded wire rope*. Journal of The British Institute of NDT 2001, 43, 12: 806–813.
- [16] Tytko A.: *Application of signal analysis in magnetic testing of wire ropes*. Workshop of Nondestructive Testing of Material and Structures. AMAS Course – NTM’02, Polish Academy of Sciences. Warszawa, 20–22 maja 2002.
- [17] Tytko A.: *Modelowanie zużycia zmęczeniowego i diagnostyka lin stalowych*. Rozprawy, Monografie, Nr 65. Wydawnictwa AGH, Kraków 1998.
- [18] Costello G.A.: *Theory of Wire Rope*. Springer, New York 1997.
- [19] Paris P.C., Erdogan F.: *A critical analysis of crack propagation laws*. Journal of Basic Engineering 1963, 85: 528–533.
- [20] Feyrer K.: *Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability*. Springer 2007, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-33831-4>.
- [21] Van Zyl M.: *Discard criteria for mine winder ropes. Final Report GAP502*. Research Agency MIKE VAN ZYL INCORPORATED, SA 2000, https://mhsc.org.za/sites/default/files/public/research_documents/Gap%20502%20Discard%20criteria%20for%20mine%20winder%20ropes%20Report_0.pdf [1.02.2023].
- [22] SABS 0294: *Proposed Code of practice for the performance, operation, testing and maintenance of drum winders relating to rope safety*. South African Bureau of Standards, SA Pretoria 1998.
- [23] SABS 0293: *Code of Practice for the Condition Assessment of Steel Wire Ropes on Mine Winders*. The South African Bureau of Standards, SA 1999.

dr inż. GRZEGORZ OLSZYNA
dr hab. inż. TOMASZ ROKITA, prof. AGH
prof. dr hab. inż. ANDRZEJ TYTKO

Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
{olszyna, rokitom, tytko}@agh.edu.pl